



Diseño de una estación de carga mediante energía fotovoltaica para un sistema de electromovilidad náutica en el transporte de pasajeros en Cartagena.

**Ramon Porras Puello
Jhon Alexander Sanchez Mc Nis**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Ingeniería Electromecánica
Cartagena, Colombia
2021

Diseño de una estación de carga mediante energía fotovoltaica para un sistema de electromovilidad náutica en el transporte de pasajeros en Cartagena.

**Ramon Porras Puello
Jhon Alexander Sanchez Mc Nis**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Electromecánico

Director (a):
Ing. Juan Vicente Cajal Barros

Línea de Investigación:
Energías renovables y alternativas.
Grupo de Investigación:
Grupo de Investigación en Bioinstrumentación y Control - GIBIO

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Ingeniería Electromecánica
Cartagena, Colombia

2021

DEDICATORIA

En primer lugar quiero darle gracias a Dios, por la oportunidad que me regalo de vivir esta experiencia tan maravillosa, la cual me permitió continuar creciendo como persona y como profesional, de igual manera quiero agradecer a mis padres RENE ANTONIO PORRAS NARVAEZ Y SILVIA PUELLO SALAS, quienes son un ejemplo de la perseverancia y constancia, que con mucho esfuerzo y esmero, me ayudaron e impulsaron en este sueño, también quiero agradecer a mi esposa DAYANA LUCIA OTERO, mis hermanos RENES PORRAS PUELLO y HARLYN PORRAS PUELLO, y demás miembros de mi familia, quienes comprendieron y valoraron los esfuerzos que se realizaron para alcanzar el objetivo, en todo este proceso quiero resaltar la importancia y de mi compañero JHON SANCHEZ y apoyo de nuestros profesores y docentes, en especial al ingeniero BASHIR YACUB, con quien construimos este sueño.

Gracias a Dios y a todos

Ramón Porras Puello

DEDICATORIA

Con mucho cariño y gratitud a Dios, quien es la guía y la fuerza de nuestra vida, nos da salud y nos ha guiado a conseguir grandes conocimientos para lograr tan anhelado logro de mi vida.

A mi familia que ha sido clave en el desarrollo de este proyecto y fieles testigos de esta superación y deseo de dar cada día lo mejor de mi para lograr la realización y culminación de este proyecto.

A mis maestros, amigos y todas aquellas personas que han sido participes activas de la consecución de este objetivo, quienes me animaron, me apoyaron y muchas veces me brindaron palabras de aliento durante todo este camino recorrido.

Jhon Sánchez

Agradecimientos

Quiero agradecerle a nuestro padre celestial por la salud, la sabiduría y la educación que me permitió recibir para llegar hasta la culminación de este proyecto, deseo expresar mi más grande gratitud por todas estas bendiciones.

Muchos agradecimientos por el acompañamiento que me ha brindado mi familia durante toda mi carrera, quienes estuvieron para mí siempre que lo necesite durante este proceso, gracias por su gran apoyo.

También deseo expresar mis más sinceros agradecimientos a la Universidad Antonio Nariño por permitirme formarme como profesional dentro de sus estándares educativos del saber.

Agradezco encarecidamente y siempre le estaré muy agradecido por el gran apoyo los jurados de este proyecto, a mi director de proyecto: **Juan Vicente Cajal** y al Ingeniero **Bashir Yacub Bermúdez** por su colaboración durante el desarrollo del presente, el tiempo y conocimientos empleados en hacer de este proyecto un gran logro.

Gracias.

Resumen

El presente proyecto de investigación trata sobre el diseño de una estación de carga mediante energía fotovoltaica para un sistema de electromovilidad náutica para una futura implementación en el transporte de pasajeros desde y hacia las islas cercanas a Cartagena, como respuesta al problema medio ambiental, económico, social y de políticas públicas que representa el uso de motores de combustión interna. Básicamente se propone diseñar el conjunto de propulsión eléctrica motor-batería para el tipo de embarcación comúnmente usada y su respectiva estación de carga, a partir de energía fotovoltaica.

En el proceso se selecciona un tipo de motor eléctrico acorde con las características del bote elegido y su sistema de almacenamiento energético. En el diseño de la estación de carga se sigue la metodología del diseño de sistemas fotovoltaicos aislados, se dimensiona el campo generador fotovoltaico, se calcula el número de paneles FV, la capacidad del banco de la batería de almacenamiento, el regulador y cargador de baterías del bote.

Finalmente, se presenta un costeo de los principales equipos que conforman al sistema de electromovilidad y de la estación de carga, como contribución hacia la toma de decisiones de implementar este tipo de solución al transporte marítimo de pasajeros.

Palabras claves: electromovilidad náutica, motor eléctrico, propulsión eléctrica, energía fotovoltaica, baterías estacionaria, estación de carga, capacidad de almacenamiento, regulador de carga, inversor.

Abstract

This research project deals with the design of a charging station using photovoltaic energy for a nautical electromobility system for a future implementation in the transport of passengers to and from the islands near Cartagena, as a response to the environmental, economic problem, social and public policy that represents the use of internal combustion engines. Basically, it is proposed to design the motor-battery electric propulsion assembly for the type of boat commonly used and its respective charging station, based on photovoltaic energy.

In the process, a type of electric motor is selected according to the characteristics of the chosen boat and its energy storage system. In the design of the charging station, the methodology of isolated photovoltaic systems design is followed, the photovoltaic generator field is dimensioned, the number of PV panels, the capacity of the storage battery bank, the regulator and battery charger are calculated. of the boat.

Finally, a costing of the main equipment that makes up the electromobility system and the charging station is presented, as a contribution to making decisions to implement this type of solution to maritime passenger transport.

Key words: nautical electromobility, electric motor, electric propulsion, photovoltaic energy, stationary batteries, charging station, storage capacity, charge controller, inverter.

Contenido

	Pág.
Introducción.....	12
i. Planteamiento del problema	13
ii. Justificación	14
iii. Objetivos.....	15
Objetivo General.....	15
iv. Alcance y limitaciones	16
v. Metodología	17
1. MARCO TEÓRICO.....	18
1.1. Sistemas de electromovilidad náutica.....	18
1.2. Caracterización del transporte de pasajeros en el área insular de Cartagena	20
1.3. Energía Solar	22
1.4. Energía fotovoltaica:.....	26
1.4.1. Celdas Fotovoltaicas:	27
1.4.2. Regulador de carga:.....	30
1.4.3. Batería (Acumulador):	32
1.4.4. Inversor:	33
2. DESARROLLO DEL PROYECTO DE INGENIERÍA.....	35
2.1. Diseño del sistema de electromovilidad náutica	35
2.2. Aspectos requeridos para el diseño	35
2.3. Selección del bote:.....	36
2.4. Sistema de Propulsión eléctrica	38
2.4.1. Selección del motor de propulsión:	39
Green Flash 42kW	40

2.4.2 Selección de batería para el motor Green Flash 42 kW	43
2.4.3. Cargador de baterías del bote	46
2.5. Diseño de la Estación de carga.....	48
2.5.1. Requerimientos para la estación de carga:.....	48
2.5.2. Diseño de la estación de carga:.....	49
3. COSTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTROMOVILIDAD NÁUTICA	70
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
1.2 Recomendaciones.....	72
Bibliografía.....	74

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Bote Corvina 255.....	21
Figura 2. Isla de Tierra Bomba	22
Figura 3. Radiación solar en la tierra	23
Figura 4. Niveles de radiación en el planeta	24
Figura 5. Irradiación anual media en Colombia	24
Figura 6. Tipos de radiación solar	25
Figura 7. Célula solar monocristalina.....	27
Figura 8. Curva V-I de un panel FV	28
Figura 9. Conexión en series de paneles FV	30
Figura 10. Conexión en paralelo de paneles FV	30
Figura 11. Regulador de carga	31
Figura 12. Curva V-I Regulador PWM y MPPT	32
Figura 13. Acumulador	33
Figura 14. Forma de ondas de Inversores CA/CC	33
Figura 15. Inversores CA/CC.....	34
Figura 16. Bote Dorado 250D.....	38
Figura 17. Motor Green Flash 42 kW.....	43
Figura 18. Batería B-LFP48-200.....	45
Figura 19. Diagrama de bloques del sistema FV	50
Figura 20. Perfil de carga de la estación FV	52
Figura 21. Ángulo de inclinación del panel FV	54
Figura 22. Sistema de Información Geográfica Fotovoltaica (PVGIS).....	55
Figura 23. Pantallazo consulta sobre irradiación solar mensual	56
Figura 25. Valores de irradiación horizontal, directa, con ángulos de inclinación.....	59
Figura 26. Irradiación solar del mes más bajo	59
Figura 27. Panel solar Gold Shingled 635-660W, modelo MS650PM6-S6.....	63
Figura 28. Configuración elegida de conexión de paneles.....	64
Figura 29. Batería de Pb ácido Gel 6-GFM-250 12V/250AH.....	66
Figura 30. Regulador de carga Spriter Series 60-120, modelo 48V100.....	69

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Resumen especificaciones botes.....	37
Tabla 2. Especificaciones técnicas Bote Dorado 250D.....	39
Tabla 3. Especificaciones de motores eléctricos	40
Tabla 4. Comparativo entre motores eléctricos.....	41
Tabla 5. Resumen comparativo motores Motor DB 25 RL y Green Flash 42 kW.....	42
Tabla 6. Características técnicas del motor Green Flash 42 kW.....	42
Tabla 7. Dimensiones y especificaciones preliminares de baterías B-LFP48-200	43
Tabla 8. Datos técnicos Batería B-LFP48-200.....	45
Tabla 9. Especificaciones del cargador Car Battery Charger - KP2000K.....	47
Tabla 10. Especificaciones detalladas del cargador Car Battery Charger - KP2000K.....	47
Tabla 11. Datos de irradiación solar de PVGIS.....	58
Tabla 12. Especificaciones técnicas Panel modelo MS650PM6-S6.....	62
Tabla 13. Tipos de baterías.....	65
Tabla 14. Resumen datos Regulador de carga	68
Tabla 15. Especificaciones Regulador Spriter Series 60-120, modelo 48V100.....	68
Tabla 16. Costos de la estación de carga y electromovilidad.....	70

Introducción

El cambio climático es uno de los aspectos que más preocupa a la humanidad en los últimos años, es frecuente observar cómo afecta a todas las regiones del mundo, principalmente con manifestaciones de olas de calor, incendios forestales, sequías prolongadas, inundaciones o aumentos del nivel del mar, lo que trae consecuencias graves a muchas especies de plantas y animales, poniendo en riesgo la agricultura, la ganadería y por ende, la seguridad alimentaria. Los daños causados a las propiedades, las infraestructuras y la salud suponen gastos muy elevados para la sociedad y la economía [1]. Por ello que el Acuerdo de París tenga como objetivo evitar que el incremento de la temperatura media global del planeta supere los 2 °C mediante acciones encaminadas a reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Uno de los grandes contaminantes son los vehículos de combustión interna, su grado de contaminación es tan alto que el transporte en América Latina y el Caribe representa más del 20% de las emisiones de CO₂ en la región [2].

Por lo anterior, los organismos multilaterales han hecho recomendaciones orientadas a la adopción de políticas públicas por parte de los países para reemplazar los vehículos de combustión interna existentes por un tipo de transporte que haga uso de energías renovables, más amigables con el medio ambiente y de bajas GEI, como son los vehículos híbridos y los eléctricos [3].

En este sentido, Colombia aprobó la Ley 1964 de 2019, orientada a sentar un marco regulatorio sobre el uso de vehículos eléctricos en el territorio nacional.

Por todo lo anterior, el objetivo del presente proyecto de investigación consistió en el diseño de una estación fotovoltaica para la recarga de botes eléctricos. La metodología empleada para el desarrollo de este proyecto se enfocó en seleccionar primeramente, un conjunto motor eléctrico y batería para la propulsión del bote empleado en el transporte de pasajeros en las costas de la ciudad. Posteriormente, se diseñó la estación de carga con sistema de almacenamiento para recargas nocturnas del bote. Finalmente se hizo un inventario de costos asociados a la futura implementación del sistema de electromovilidad propuesto.

i. Planteamiento del problema

Por su posición geográfica, a orillas del mar Caribe, el Distrito de Cartagena de Indias cuenta con un área insular importante en dónde se asientan numerosas comunidades. Esto hace que la única vía de comunicación entre las islas y tierra firme sea a través del mar. Las actividades comerciales y de turismo hacen que exista un transporte activo de carga y de pasajeros, entre las islas y el continente. Este transporte se realiza principalmente en lanchas rápidas, con motores fuera de borda.

Uno de los principales problemas del uso de motores de combustión interna es el alto costo de los combustibles, lo que afecta económicamente a la población que se dedica a esta actividad. Otro factor a tener en cuenta es la no disponibilidad en las islas y en puerto de un sistema seguro y confiable de suministro de combustible. Esto hace que el tanqueo de combustible provoque derrames en el agua, tanto de gasolina como de aceites y grasas, pues, por ser menos densos que el agua e inmiscibles con ella, se difunden por la superficie, y pueden cubrir grandes superficies. Esto reduce la re-oxigenación del agua, disminuyendo el oxígeno disuelto y absorbiendo la radiación solar. Todo esto afecta la vida coralina y la actividad fotosintética marina y, en consecuencia, la producción interna de oxígeno disuelto [10].

Así mismo, es importante destacar las cargas ambientales producidas por el uso de combustible de origen fósil; unas en forma de emisiones de GEI que incluyen altos niveles de óxidos de nitrógeno y azufre (NOx y SOx), que están relacionados con casos de asma, cáncer de pulmón y enfermedades cardíacas; y otras en grandes cantidades de CO₂ absorbidas por el agua del mar formando H₂CO₃ o ácido carbónico, sustancia que altera el ecosistema matando o dañando peces y plantas [11]. Además de la contaminación acústica marina que tiene repercusiones en la flora y fauna [12].

Teniendo en cuenta el compromiso de Colombia de reducir hasta en un 20% las emisiones de CO₂ para el año 2030, de promover el desarrollo de la electromovilidad como una

alternativa de transporte náutico en el país y de las necesidades del transporte náutico en Cartagena y sus islas, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo diseñar una estación de carga mediante energía fotovoltaica para un sistema de electro movilidad náutica en el transporte de pasajeros en Cartagena?

ii. Justificación

La electromovilidad náutica a partir de energía fotovoltaica en reemplazo de la movilidad con motores de combustión interna, sin duda traerá beneficios en los siguientes aspectos: En el aspecto medio ambiental se hace uso y aprovechamiento de una fuente de energía limpia, inagotable y altamente disponible en el área de aplicación, lo cual la hace conveniente tanto para la economía, la sociedad y la naturaleza. La discusión sobre alternativas de generación de energía es un tema prioritario a nivel global [13], y hace parte de los 17 objetivos de desarrollo sostenible adoptados por las Naciones Unidas en 2015 [14]. Así mismo, apunta al compromiso de Colombia de reducir hasta en un 20% las emisiones de CO₂ para el año 2030 y de promover el desarrollo de la electromovilidad como una alternativa de transporte en el país, en el marco de la Ley 1964 de 2019.

La electromovilidad náutica en reemplazo de la movilidad con motores de combustión interna apunta también al cumplimiento del Acuerdo de París, que tiene como objetivo evitar que el incremento de la temperatura media global del planeta supere los 2 °C por acciones de las emisión de gases de efecto invernadero. Además se busca disminuir la dependencia de las energías fósiles y la contaminación de los lechos de aguas por vertimientos de combustibles.

En el aspecto socioeconómico, la electromovilidad náutica favorece a las comunidades que habitan en las áreas insulares y a todo el gremio de pequeños y medianos transportadores, dado el alto costo de los combustibles y la no disponibilidad de la cadena de abastecimiento y distribución en las zonas insulares. El transporte de combustibles hacía las islas mediante acciones artesanales, no convencionales representa un peligro inminente para la integridad de las personas. Así mismo, la no disponibilidad de combustibles en las islas en momentos

oportunos pueden acarrear efectos negativos hacia la población, sobre todo cuando se trata de emergencias de salud, desastres naturales o de orden público.

Por tanto, la electromovilidad náutica en tramos cortos entre las islas cercanas a Cartagena supone un gran aporte en la solución de estos problemas, teniendo en cuenta la cantidad de trayectos que se realizan por día [15]. De esta manera, se busca contribuir con una propuesta que apunta a muchas aristas, dado que la movilidad de personas y carga, en términos de volumen y estructura, tiene un peso importante en el contexto del desarrollo sostenible, dados los efectos ambientales, sociales y económicos que implica [16].

Aunque ya en muchos países se viene empleando la electromovilidad como alternativa de transporte, en Colombia todavía no se evidencia el uso de estas tecnologías en el transporte marítimo. Por lo tanto, la presente propuesta apunta a generar resultados que avalen la viabilidad tecnológica de la implementación de la electromovilidad marítima para el transporte de pasajeros. De esta forma, desde la academia se contribuye con el punto inicial para la solución de un problema que tiene implicaciones, como se dijo anteriormente, en los aspectos socioeconómicos y ambientales.

iii. Objetivos

Objetivo General

Diseñar una estación de carga mediante energía fotovoltaica para un sistema de electromovilidad náutica en el transporte de pasajeros de Cartagena.

Objetivos Específicos

- Identificar y caracterizar el tipo de embarcación empleada en el transporte de pasajeros entre Cartagena y la zona insular.
- Establecer los requerimientos técnicos para el diseño del sistema de electromovilidad náutica y de la estación de carga con energía fotovoltaica.
- Plantear el diseño del sistema de propulsión eléctrica y de la estación de carga.
- Realizar una selección técnica de los componentes principales del sistema y una evaluación de costos asociados a la implementación del proyecto que muestre su viabilidad económica.

iv. Alcance y limitaciones

El presente documento contiene la identificación de un bote y su sistema de propulsión eléctrica (Motor eléctrico y batería) y su estación de carga eléctrica como propuesta para ser implementado y operado en el transporte de pasajeros en las islas cercanas a Cartagena. El conjunto de estación de carga y sistema de electromovilidad náutica que se propone comprende:

- Identificación y selección del tipo de embarcación.
- Identificación y selección del tipo del tipo de motor eléctrico.
- Identificación y selección de la fuente de energía eléctrica (banco de baterías) para el motor eléctrico del bote.
- Determinación del aporte solar en la zona de instalación (horas pico de sol, ángulo de inclinación con respecto al ecuador).
- Dimensionamiento de la estación de carga (Potencia del campo generador fotovoltaico, conjunto número de paneles fotovoltaicos, banco de baterías, regulador de carga e inversor).
- Costeo de los principales equipos que conforman al sistema de electromovilidad y de la estación de carga, como contribución hacia la toma de decisiones de implementar este tipo de solución al transporte de pasajeros.

v. Metodología

El diseño de una estación de carga fotovoltaica para una aplicación de electromovilidad náutica en el transporte de pasajeros en tramos cortos a islas cercanas a Cartagena se dividió en las siguientes fases:

Fase I: Identificación y caracterización del tipo de embarcación empleada en el transporte de pasajeros entre Cartagena y las islas más cercanas. Se realizó una visita de campo a los puertos de embarques usados en el transporte de pasajeros. Se consultaron a transportadores sobre tipos de embarcaciones usadas, tipos de motores, capacidad de carga del bote (cantidad de pasajeros), velocidad, frecuencia de operación, entre otros. A través de información secundaria, se consultaron datos técnicos de las embarcaciones empleadas y se hizo la selección de un tipo de bote para el sistema de electromovilidad náutica.

Fase II: Establecimiento de los requerimientos técnicos para el diseño de la estación de carga. Se realizaron consultas sobre sistemas de electromovilidad náutica disponibles en el comercio, se seleccionó un tipo de motor eléctrico, acorde con las características del bote seleccionado, con el perfil de la misión de navegación (velocidad, frecuencia, tiempo de viaje, carga, entre otros). En la selección del motor se tuvo en cuenta la potencia requerida de propulsión, la potencia eléctrica de consumo, y los niveles voltaje y corriente de operación. También se establecieron los requerimientos de la batería de alimentación del motor eléctrico (Capacidad, voltaje, tiempo de carga) y la autonomía del sistema. Así mismo se establecieron los requerimientos para el diseño de la estación de carga, se consultaron bases de datos de libre acceso sobre el aporte de la energía solar en la zona de influencia del presente proyecto, se tuvo en cuenta datos sobre radiación solar y horas pico de sol en la región. Adicionalmente se establecieron los datos de consumo del sistema de carga.

Fase III: Diseño de la estación de carga. En esta fase se dimensionó el sistema generador fotovoltaico teniendo en cuenta los requerimientos de potencia establecidos y el aporte de

la energía solar en la zona de influencia. Se calcularon el conjunto de paneles fotovoltaicos, banco de baterías, regulador de carga y el inversor.

Fase IV: Evaluación del costo aproximado de la implementación de una embarcación provista de electromovilidad y de la estación de carga. En esta fase se consultaron precios en portales y páginas web de empresas fabricantes y comercializadoras de los distintos elementos que conforman la estación de carga y del sistema de electromovilidad de pasajeros. De esta manera, se costó de manera aproximada la implementación del sistema propuesto.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Sistemas de electromovilidad náutica

Actualmente existen cuatro tipos de diseños básicos para automóviles eléctricos: vehículos híbridos eléctricos (HEVs), vehículos híbridos eléctricos enchufables (PHEVs), vehículos eléctricos de batería pura (BEVs) y vehículos de pila de combustible de hidrógeno (FCEVs). Sin embargo, para la normativa colombiana, la definición de un vehículo eléctrico es:

Un vehículo impulsado exclusivamente por uno o más motores eléctricos, que obtienen corriente de un sistema de almacenamiento de energía recargable, como baterías, u otros dispositivos portátiles de almacenamiento de energía eléctrica, incluyendo celdas de combustible de hidrógeno o que obtienen la corriente a través de catenarias. Estos vehículos no cuentan con motores de

combustión interna o sistemas de generación eléctrica a bordo como medio para suministrar energía eléctrica [4].

Los vehículos eléctricos que se vienen usando en el país para el transporte terrestre, generalmente son autos, motocicletas y bicicletas. Sin embargo, en el transporte marítimo no se registra el uso de este tipo de tecnologías, siendo que a nivel mundial ya se encuentran soluciones tecnológicas en uso. Para nadie es una mentira que el transporte marítimo no es ajeno a la problemática que suscita el uso de combustibles derivados del petróleo. Se sabe que la actividad marítima mundial genera cantidades considerables de emisiones de GEI y, con el consumo de combustibles fósiles, contribuye al cambio climático. El transporte marítimo es responsable de cerca del 3% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero [5]. Por lo anterior, la movilidad eléctrica marítima se proyecta como el futuro del transporte marítimo.

Así mismo, el uso de energías renovables, principalmente energía fotovoltaica, viene tomando importancia en el mundo, sustentado en la tesis de que este tipo de energía es amigable con el medio ambiente, es inagotable y está disponible permanente. La movilidad eléctrica alimentada con fuentes de generación de energía fotovoltaica será la combinación perfecta para contrarrestar la emisión de GEI y mitigar el avance del cambio climático.

A nivel de Europa ya se encuentra operando las primeras naves 100% eléctricas; empresas como Port Liner de Holanda es pionera en el desarrollo de barcos eléctricos e híbridos. Sin embargo, los buques de largo recorrido en alta mar actualmente no tienen la opción de atracar regularmente para cargar sus baterías. Por lo que es poco probable que se electrifiquen completamente en un futuro próximo y la electrificación se limitará a las pequeñas embarcaciones que realicen viajes cortos, como los transbordadores [6]. En tal sentido, ha tomado auge el desarrollo de botes eléctricos de baja y mediana capacidad, como los fabricados por la empresa inglesa Ruban Bleu, quienes cuentan con una línea de botes eléctricos; se destacan los modelos Sensas, de 4,5 metros de eslora, un motor de 1,6 kW, baterías de 320 amperios y 24 voltios, velocidad máxima de 8 km/h, autonomía para 8 horas y una capacidad para 6 personas [7]. Otros modelos son The Ace, The Scoop, The Most, The Legend y The Navette. Por su parte la empresa alemana Torqquedo ofrece propulsores eléctricos para veleros, desde botes hasta yates de hasta 120 pies. Cuenta con

el sistema Deep Blue, el primer sistema de propulsión eléctrica de alto rendimiento producido industrialmente para lanchas a motor, disponible como sistemas internos y externos de hasta 100 kW [8]. En el contexto nacional, se realizó el proyecto DeveloPPP, el cual estuvo orientado al desarrollo de la electromovilidad en el Río Caquetá, como una alternativa de transporte náutico en el país [9].

La electromovilidad hace referencia al uso de sistemas de impulso o tracción que utilizan energía eléctrica aplicados a distintos medios de transporte. Por lo general, se utiliza un motor eléctrico que proporciona movimiento al vehículo utilizando electricidad como fuente de energía [17]. Un caso particular lo constituyen los sistemas de electromovilidad náutica, los cuales actualmente se encuentran en pleno proceso de expansión debido a los grandes beneficios que representa en aspectos energéticos, ambientales y socioeconómicos.

Un sistema de electromovilidad náutica viene conformado principalmente por una embarcación (marítima y/o fluvial), un motor eléctrico encargado de la propulsión, un sistema de monitoreo de variables asociadas a la navegación (velocidad) y al estado energético del banco de baterías, un banco de baterías y una estación de carga.

1.2. Caracterización del transporte de pasajeros en el área insular de Cartagena

Para el caso que concierne al objeto de estudio del presente proyecto se centra en el tipo de embarcación empleada en el transporte de pasajeros entre Cartagena y su zona insular.

El tipo de embarcación corresponde a botes construidos, generalmente en fibra de vidrio, con capacidad para transportar hasta 24 pasajeros; usan motores fuera de borda de dos y cuatro tiempos. Estas lanchas son similares a la mostrada en la figura 1, la cual corresponde al modelo Corvina 255 de la empresa Eduardoño y que son ampliamente usadas para el

transporte de pasajeros. Estos botes tienen una capacidad de carga entre 0,5 y 1,5 toneladas de carga útil y pueden alcanzar hasta 50 nudos de velocidad. Este tipo de botes también se emplean ampliamente en actividades deportivas y en labores de pesca, principalmente, en la pesca artesanal.

Figura 1. Bote Corvina 255



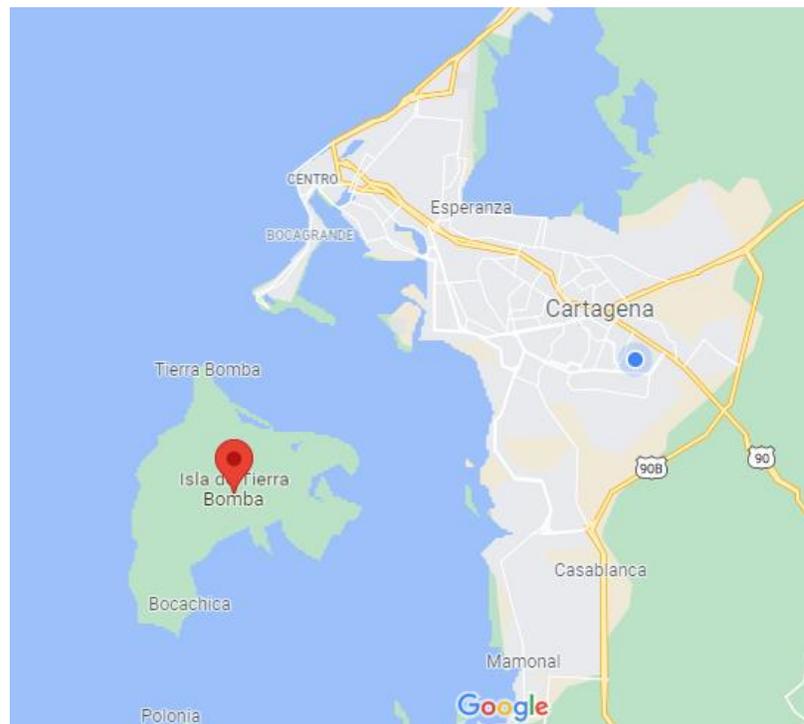
Fuente: Eduardoño (2021) [18]

El transporte de pasajeros entre Cartagena y las Islas inicia desde las 5:00 am y tiene que ver con personas que realizan actividades laborales, comerciales, educativas, médicas, transporte de mercancías, productos alimenticios, víveres y abarrotes y finalmente, un tercer grupo muy representativo de pasajeros lo conforman los que realizan turismo. El mayor flujo de pasajeros, sin importar el tipo de actividad, se da entre las horas 6:00 am a 10:00, luego en horas del mediodía baja para nuevamente reactivarse entre las 15:00 a 17:00 horas.

El trayecto escogido para efectos del presente proyecto es el comprendido entre Cartagena y la Isla de Tierra Bomba, por ser esta una isla altamente poblada, con cerca de 9.000 habitantes, y con grandes requerimientos de movilidad de pasajeros y de cargas menores,

destacando que la Isla es un popular destino turístico; sus atractivos turísticos principales son sus playas marinas y monumentos históricos como el Castillo de San Fernando de Bocachica. La Isla se encuentra ubicada en las coordenadas $10^{\circ}21'11''\text{N}$ $75^{\circ}34'12''\text{O}$, frente a la costa de Cartagena de Indias, en sentido suroeste y a una distancia de 1,5 km de la costa. Cómo se muestra en la figura 2.

Figura 2. Isla de Tierra Bomba



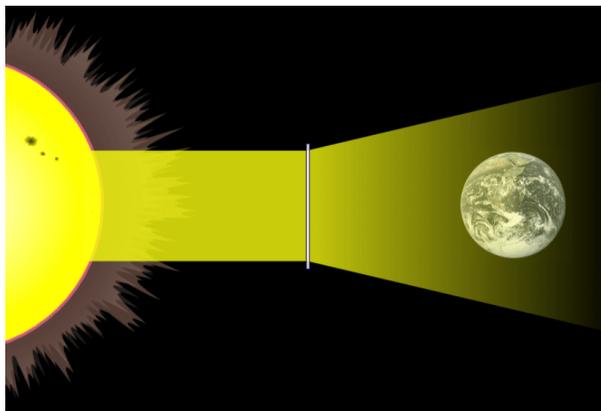
Fuente: Google-Maps (2021) [19]

1.3. Energía Solar

Cada año, 3.8×10^{24} julios de energía en forma de radiación electromagnética proveniente del sol atraviesa la atmósfera terrestre. Esto es aproximadamente 10,000 veces el presente consumo de energía anual del planeta. El poder proporcionado por la luz solar se conoce como "irradiancia", cuyas unidades son vatios por metro cuadrado (W/m^2).

La radiación electromagnética se propaga transportando energía y cubre un espectro que va de longitudes de onda muy cortas ($10^{-5} m$), hasta longitudes de onda correspondientes a centenares de metros. (ver figura 3).

Figura 3. Radiación solar en la tierra

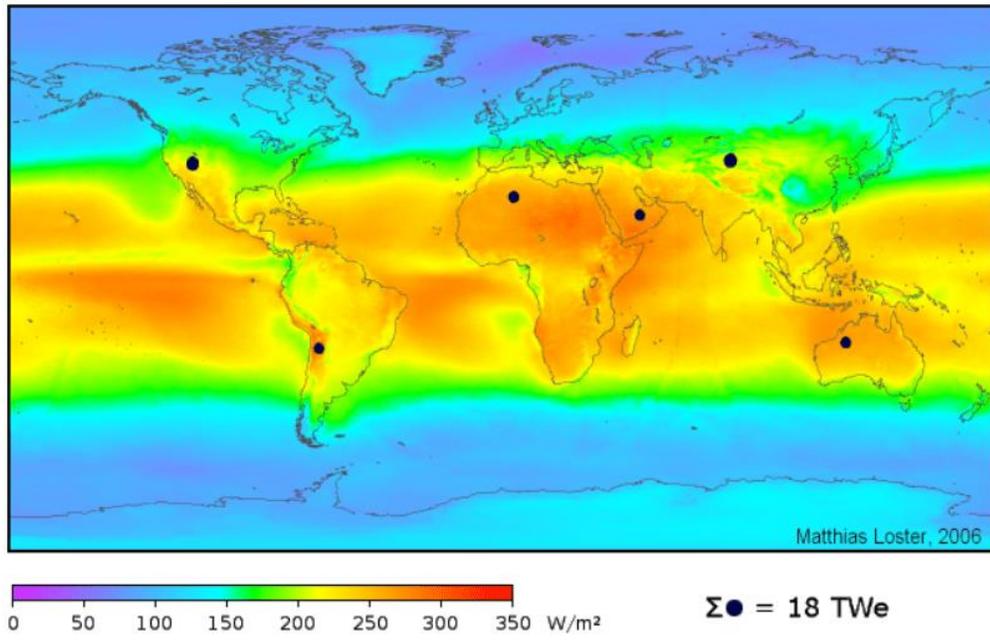


Fuente: <https://www.meteorologiaenred.com/wp-content/uploads/2015/08/radiacion.png> [20]

La zona de la tierra más irradiada se encuentra entre los trópicos de Cáncer y Capricornio (Figura 4), que tiene la particularidad de recibir perpendicularmente los rayos del Sol en algún momento del año. Debido a la forma elíptica de la órbita de la tierra y su movimiento de rotación, la radiación varía según la posición de la tierra por lo que Colombia al estar ubicada en una latitud ecuatorial recibe una radiación constante durante todo el año por lo que el funcionamiento de la energía solar fotovoltaica no se ve con mucha afectación negativa.

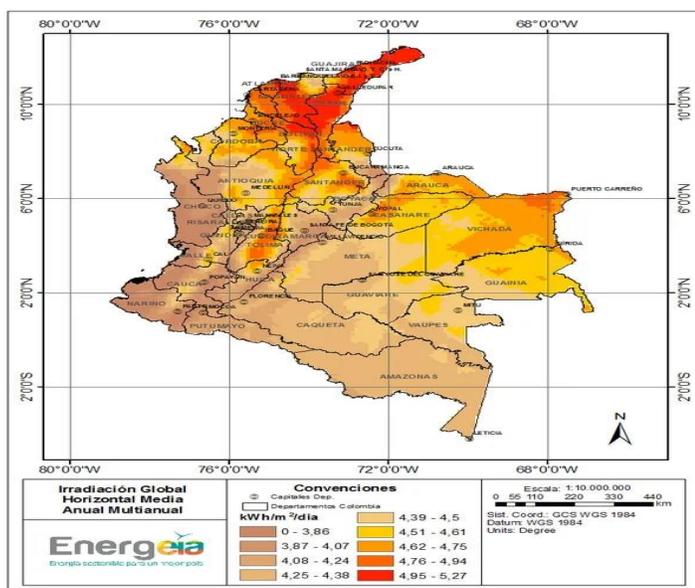
A nivel de Colombia, la región que recibe la mayor cantidad de irradiación solar se concentra en la costa atlántica, principalmente en los departamentos de la Guajira y Bolívar, donde tienen una incidencia entre 4,95 y 5,27 kW/m²/día, por lo que en estas zonas la energía solar fotovoltaica tendría una mayor eficiencia por lo que podrá producir una mayor cantidad de energía eléctrica que podrá ser utilizada en redes eléctricas o equipos electrónicos (ver figura 5).

Figura 4. Niveles de radiación en el planeta



Fuente: https://www.meteorologiaenred.com/wp-content/uploads/2015/08/radiacion_en_tierra.png
[21]

Figura 5. Irradiación anual media en Colombia



Fuente: (EnergEIA, 2018) [22]

La radiación solar se puede clasificar según su forma de incidencia sobre la superficie de la Tierra, existiendo las siguientes formas (ver figura 6):

- Radiación directa: es la que proviene directamente del Sol sin haber sufrido dispersión en su trayectoria a través de la atmósfera. Esto ocurre cuando el sol es totalmente visible. Radiación difusa: es la radiación absorbida y dispersada por la atmósfera que llega a la superficie terrestre después de sufrir múltiples desviaciones en su trayectoria
- Radiación reflejada o "albedo": es aquella reflejada por la superficie y depende del coeficiente de reflexión de la superficie.
- Radiación global: es la suma de la radiación directa, difusa y de albedo.

Figura 6. Tipos de radiación solar



Fuente: (EnergEIA, 2018) [23]

Al considerar un plano perpendicular a los rayos del Sol fuera de la atmósfera, el valor promedio de la intensidad de la radiación solar es de 1353 W/m^2 . Sin embargo, la posición del sol varía durante el día y durante ciertos periodos del año, por lo tanto también varía el ángulo con el cual los rayos solares inciden sobre una superficie como las los paneles fotovoltaicos. La energía recibida depende de varios factores, como los factores astronómicos como latitud, día y hora en que ocurre la radiación y la nubosidad del cielo.

1.4. Energía fotovoltaica:

Es la energía eléctrica generada directamente en un dispositivo llamado célula solar a partir de la radiación solar que incide sobre ella, que permiten el movimiento de electrones permitiendo que se genere una fuente de energía eléctrica, para este efecto, se necesitan placas de silicio que permiten el movimiento de los electrones para generar voltaje y corriente eléctrica [24]. Se da por el efecto fotovoltaico, que es la generación de corriente eléctrica a partir del efecto Fotoeléctrico. La energía recibida depende de la orientación y de la inclinación de los módulos fotovoltaicos con respecto al sol.

1.4.1. Celdas Fotovoltaicas:

Las células fotovoltaicas suelen estar hechas de cristales de silicio dopado que se han cortado en obleas delgadas y planas. Las celdas fotovoltaicas son junturas PN (ver figura 7), diseñadas para recibir la luz solar y generar corriente eléctrica. Múltiples celdas conforman un panel fotovoltaico. Los paneles solares no son más que varias celdas trabajando de forma conjunta para generar un mayor potencial eléctrico [25]. Las células fotovoltaicas se producen en varios tamaños estándares

Figura 7. Célula solar monocristalina



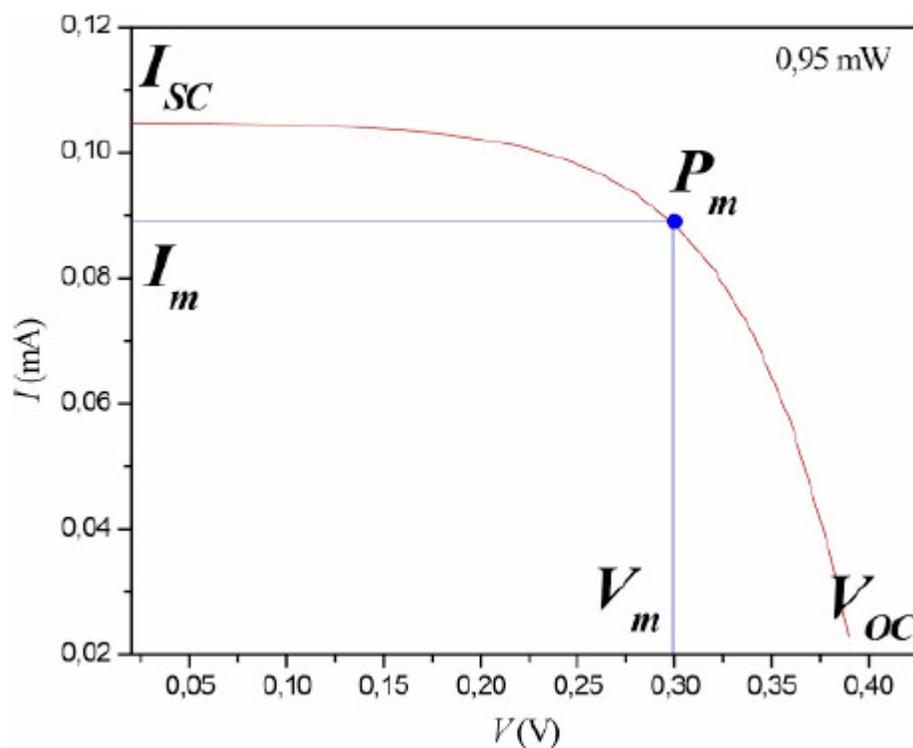
Fuente: (Dexen Energy, 2021) [26]

Los fabricantes de paneles solares suelen entregar información técnica a cerca de las principales especificaciones que tienen los paneles fotovoltaicos. Entre los más importantes parámetros usados en el dimensionamiento de instalaciones fotovoltaicas se pueden mencionar:

- Corriente de cortocircuito (I_{sc}): es la corriente que circula entre los bornes del panel, cuando estos se cortocircuitan ($V=0$). Es la máxima intensidad que se puede obtener de un panel.
- Tensión de circuito abierto (V_{oc}): es el voltaje que se obtiene entre los bornes del panel solar cuando estos se encuentran en circuito abierto ($I=0$) o no hay carga conectada. Es la mayor tensión que se puede obtener de la placa cuando trabaja como generador.
- Tensión Nominal (V_N): es el valor de la tensión a la cual trabaja el panel.

- Corriente de Potencia Máxima (I_{mp}): es el valor de la corriente que puede suministrar el panel cuando trabaja a máxima potencia (P_m).
- Voltaje de Potencia Máxima (V_{MP}): es el valor de voltaje cuando la potencia también es máxima (P_{Max}) y el panel está suministrando la máxima intensidad de corriente.
- Potencia Máxima (P_{max}): es el máximo valor obtenido al multiplicar la intensidad I_{mp} (Intensidad en el punto de máxima potencia) y V_{mp} (Tensión en el punto de máxima potencia). También se le llama Potencia de Pico del panel (W_p). (ver figura 8).
- Punto de máxima potencia (P_M): es el punto de trabajo en el que la potencia entregada por la placa fotovoltaica a la carga externa, es máxima, (ver figura 8).
- Factor de forma (FF, del inglés, Fill Factor): es la relación entre la potencia máxima (o el producto de la corriente y la tensión en el punto de máxima potencia) y el producto de ISC y VOC. Su valor es más alto cuanto mejor es la celda fotovoltaica.
- Eficiencia: relación entre la potencia eléctrica entregada por el panel solar y la potencia de la radiación que incide sobre él.

Figura 8. Curva V-I de un panel FV



Fuente: Henry Louie [27]

Cómo se dijo anteriormente, la potencia de salida de un módulo fotovoltaico depende tanto de la irradiancia como de la resistencia de la carga. Dado que ambos pueden variar, la potencia nominal de un módulo fotovoltaico debe corresponder a un conjunto de condiciones de funcionamiento específicas. La potencia nominal, o capacidad, de un módulo fotovoltaico es la potencia máxima que se puede producir bajo "Condiciones de prueba estándar" (STC). Las condiciones de prueba estándar se definen como:

- Irradiancia de 1000 W/m^2
- Temperatura de la celda de 25°C

Los paneles fotovoltaicos disponibles comercialmente actualmente no superan los 660 W de capacidad nominal. Para mini-redes que requieren más capacidad, varios módulos se combinan para formar una matriz fotovoltaica. Los módulos se pueden combinar en serie, en paralelo o una combinación de los mismos, como se muestra en la figura 9 y 10.

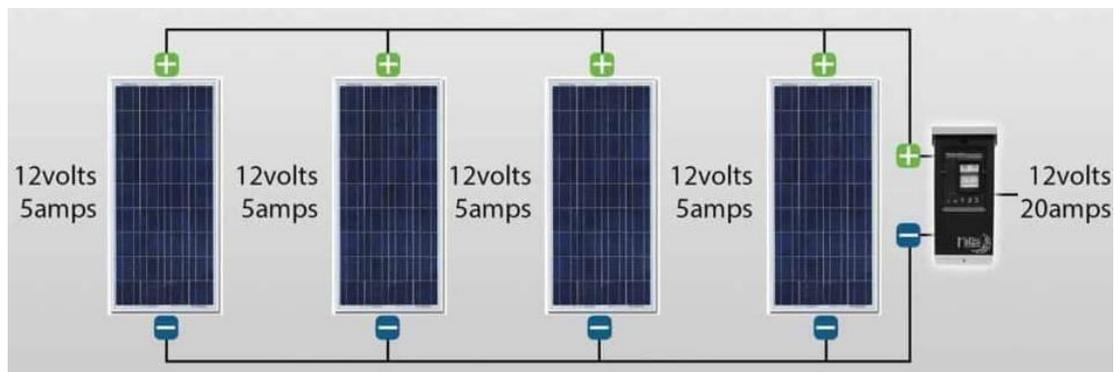
Los módulos fotovoltaicos conectados en serie se denominan "cadenas". Si los módulos están físicamente idéntico y expuesto a las mismas condiciones, entonces el voltaje de salida de la cadena es el voltaje de un módulo individual multiplicado por el número de módulos [27].

Figura 9. Conexión en series de paneles FV



Fuente: Elaborada por los autores

Figura 10. Conexión en paralelo de paneles FV



Fuente: Elaborada por los autores

1.4.2. Regulador de carga:

Es un componente que se encarga de administrar de forma eficiente la energía eléctrica hacia las baterías prolongando su vida útil. Cumple dos funciones básicas:

1. En la carga: garantizar una carga suficiente al acumulador y evitar las situaciones de sobrecarga.
2. En la descarga: asegurar el suministro eléctrico diario suficiente y evitar la descarga excesiva de las baterías.

Además las siguientes funciones:

- Gestiona el consumo directo de las placas y las baterías.
- Carga optima de la batería.
- Bloqueo de corriente inversa. Evita que la batería se descargue por las noches.
- Llevar control de consumo.
- Conectar y desconectar cargas según prioridades.
- Señalizar el estado de carga, flujo de carga de la batería a través del indicador respectivo.
- Informar sobre tensiones y corrientes de carga, descarga y dar alarmas.
-

La figura 11 muestra un controlador de carga MPPT de 100 V y 50 A.

Figura 11. Regulador de carga



Fuente: (Victron Energy, 2021) [28]

En el mercado existen reguladores de carga de tecnología PWM y MPPT. El regulador de carga PWM dispone en su interior de un diodo, haciendo que los paneles funcionen a la misma tensión que las baterías. Esto hace que los paneles no trabajen en su punto de máxima potencia sino a la que imponga la batería. Se genera una pérdida de 25-30% en la

potencia. La carga completa de la batería se hace de forma gradual, a pulsos de tensión. La corriente se va introduciendo poco a poco hasta que la batería se llena de manera óptima y estable.

Por el contrario, un regulador MPPT (Maximum Power Point Tracking, o seguidor del punto de máxima potencia), está compuesto de un convertidor de tensión CC-CC y de un seguidor del punto de máxima potencia. Este regulador trabaja a diferentes potencias (voltaje y amperaje) en el campo fotovoltaico y en las baterías (convertidor de tensión CC-CC), adaptando la tensión de funcionamiento en el campo fotovoltaico a la que proporcione la máxima potencia (ver figura 12). La diferencia principal del regulador MPPT con el PWM es que en términos de energía, la que entra y sale del controlador es la misma, pero en el MPPT la tensión y la corriente son diferentes en la entrada y en la salida. Además, los reguladores MPPT tienen un voltaje de entrada más grande que el de los reguladores de carga PWM, de manera que permite tener en serie varios paneles solares.

Figura 12. Curva V-I Regulador PWM y MPPT



Fuente: Elaborada por los autores

1.4.3. Batería (Acumulador):

Los dispositivos de almacenamiento de energía se incorporan a los sistemas off-grid para brindar flexibilidad entre el momento en que se produce y el que se consume. La energía

eléctrica generada en los paneles solares es regulada y pasa a las baterías dónde es almacenada para ser utilizada en otro momento. Existen varias tecnologías de almacenamiento de energía compatibles con los sistemas eléctricos. El tipo más común utilizado en sistemas fuera de la red son las batería plomo-ácido, baterías de Ion-Litio y baterías de NiCd. La figura 13 muestra ejemplos de baterías usadas en aplicaciones solares.

Figura 13. Acumulador



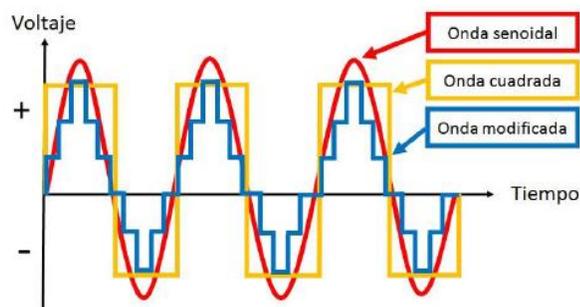
Fuente: (Enerver, 2021) [29]

1.4.4. Inversor:

Dispositivo electrónico que convierte la energía almacenada en las baterías o la que entregan los paneles FV en corriente alterna, para alimentar las cargas eléctricas o equipos electrónicos. Se utilizan en sistemas acoplados a CC para suministrar una carga de CA y en sistemas de CA a CC para facilitar el flujo de energía desde el bus de CC al bus de CA.

En el mercado existen tres tipos de tecnologías, de acuerdo al tipo de onda en el voltaje de salida: de onda cuadrada, de onda modificada y de onda senoidal pura. Las formas de ondas se muestran en la figura 14.

Figura 14. Forma de ondas de Inversores CA/CC



Fuente: Generatuluz (2021) [30]

Los inversores cumplen con las siguientes funciones [31]:

- Operar en un amplio rango de tensión DC de entrada.
- Poseer autoprotecciones y seguridad al usuario.
- Regular la tensión y la frecuencia de salida.
- Proporcionar potencia AC a las cargas eléctricas con buena calidad de suministro.
- Operar un amplio rango de condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa.
- Poseer interfaces con otros controles de sistemas.
- Satisfacer las necesidades de seguridad exigidas por la carga.

A modo de ejemplo, la figura 15 muestra diferentes tipos de inversores.

Figura 15. Inversores CA/CC



Fuente: (ErSolar, 2019) [32]

2. DESARROLLO DEL PROYECTO DE INGENIERÍA

2.1. Diseño del sistema de electromovilidad náutica

Se encuentran operando distintos tipos de embarcaciones que usan la electromovilidad o una combinación de ella con otras fuentes de energías, cómo es el caso de los sistemas híbridos. En la actualidad existen una gran variedad de embarcaciones impulsados por motores eléctricos, tales como barcos de carga, cruceros, yates, lanchas, entre otros. A continuación se describe el proceso del diseño de la propuesta de electromovilidad náutica para los fines planteados anteriormente.

2.2. Aspectos requeridos para el diseño

- La estación de carga debe suministrar la energía suficiente para cargar en los tiempos requeridos el sistema de almacenamiento de energía del bote.
- La estación de carga se podrá diseñar con o sin sistema de almacenamiento estacionario. Con sistema de almacenamiento estacionario, el bote podrá cargarse en horas de no operación (horas nocturnas). Sin sistema de almacenamiento estacionario, entonces el bote tendrá que cargarse durante las horas pico de sol, lo que abarataría el costo de implementación.
- La estación de carga incluye el dimensionamiento del sistema de almacenamiento estacionario, el regulador de carga y el inversor. El inversor deberá entregar una señal de voltaje acoplado al sistema de carga de las baterías del bote.
- El bote seleccionado tendrá la capacidad de carga suficiente para albergar además de los pasajeros, el peso extra que representa el sistema de almacenamiento de energía (Baterías). También debe poseer características para navegar en forma segura en la zona de operación.
- El motor eléctrico para la propulsión del bote debe generar la potencia suficiente para operar en condiciones similares a los botes que funcionan con combustible.

- El bote debe contar con un sistema de almacenamiento de energía que permita el funcionamiento del motor eléctrico durante al menos 3 horas, en condiciones de operación normal.

2.3. Selección del bote:

El comportamiento hidrodinámico de cualquier barco depende fundamentalmente de la forma geométrica del volumen sumergido. Cuando se trata de averiguar los movimientos hay que tener en cuenta la distribución de pesos, las inercias y las características del estado de la mar [33]. Todas estas consideraciones se tienen en cuenta a la hora de diseñar y construir botes, específicamente para el transporte de pasajeros en zonas costeras, de bajo oleaje, como ocurre en la zona insular aledaña a las costas de Cartagena de Indias.

El diseño de un bote que cumpla con las características para navegar y transportar pasajeros está fuera del alcance del presente proyecto, por tanto, se seleccionó un bote diseñado para tal fin. Para la selección del bote se consideraron los siguientes modelos de la marca Eduardoño Náutico, teniendo en cuenta que estas embarcaciones son las más empleadas en el transporte de pasajeros en el área costera de Cartagena de Indias. Esto tiene que ver con la existencia de un punto de fábrica de la marca mencionada en la ciudad.

- El bote de transporte Corvina 180 es una embarcación comercial de transporte para zonas costeras, ríos y lagos. El modelo posee pozo y repisa doble o escalones. El casco es altamente eficiente en consumo de combustible por el diseño en V modificada. Tiene una capacidad de transporte de 10 pasajeros.
- El bote de transporte Corvina 250/250X es una embarcación comercial de transporte para zonas costeras, ríos y lagos. El modelo posee pozo y repisa con espacio para almacenamiento, por lo que es posible emplearlo en faenas extensas de pesca debido al comportamiento marineró del casco. Esta lancha tiene una capacidad de transporte de 20 pasajeros.

- El bote de transporte Dorado 250D es una embarcación de transporte tanto para zonas costeras como para aguas abiertas, es multiuso y se puede adaptar a la mayoría de las tareas requeridas por los usuarios. Presenta casco en forma de V profunda, lo que lo hace seguro para navegar en aguas con fuerte oleaje. Tiene una capacidad de carga de hasta de 1400 kilos, 20 pasajeros y requiere bajas motorizaciones gracias al excelente diseño de su casco.
- Por su parte el bote Taxi 220 es una embarcación polivalente para zonas costeras, ríos y lagos. El modelo tiene una consola de control, cinco asientos para 15 pasajeros, un estante y un hueco disponible para instalar motores fuera de borda.

Un resumen de las especificaciones técnicas de los botes descritos anteriormente se muestra en la tabla 1. Para efectos de selección del tipo de bote, se tuvo en cuenta las dimensiones del bote, capacidad de carga útil y potencia requerida por el motor de propulsión.

Tabla 1. Resumen especificaciones botes

Especificaciones	Corvina 180	Dorado 250D	Corvina 250	Taxi 220
Slora	5,50 m	7,70 m	7,70 m	6,84 m
Manga	1,58 m	1,96 m	1,96 m	1,89 m
Puntal	0,69 m	1,02 m	1,02 m	0,94 m
Carga útil	770 kg	1400 kg	1400 kg	1050 kg
Potencia motor	<= 50 HP	<= 75 HP	<= 85 HP	<= 85 HP
Potencia motor Máxima	85 HP	75 HP	200 HP	150 HP

Fuente: Eduardoño (<https://www.eduardono.com/nautico/>)

Teniendo en cuenta los datos de la tabla 1, se opta por seleccionar el bote Dorado 250D por presentar una mejor relación entre la capacidad de carga útil (1400 kg) y la potencia recomendada para el motor de propulsión (<=75 HP). Este bote que puede navegar sin problemas en la zona objeto de estudio, también lo puede hacer en mar abierto y con fuerte

oleaje, lo que lo hace ideal para viajes hacia las Islas más alejadas de la costa, como las Islas del Rosario. La figura 16 muestra el bote seleccionado.

Figura 16. Bote Dorado 250D



Fuente: <https://www.yamahamarino.cr/product/dorado-250/>

2.4. Sistema de Propulsión eléctrica

Uno de los problemas más importantes que se presenta en el proyecto de un buque durante la fase inicial, es la determinación de la potencia de la maquinaria propulsora y de las características del propulsor para que el buque navegue a una determinada velocidad. Para ello es imprescindible conocer la resistencia al avance del buque a esa velocidad [33]. Para determinar la resistencia al avance de un buque se recurre a la experimentación con modelos físicos a escalas, en donde se realizan ensayos en Canales de Pruebas Hidrodinámicas, en los que se miden un conjunto de variables físicas, tales como resistencia al avance de la carena, par, empuje y revoluciones del propulsor, entre otros. Conociendo el comportamiento hidrodinámico del modelo, se extrapolan los valores de las magnitudes físicas medidas al buque real. Actualmente se usan herramientas computacionales como CFD, Computational Fluid Dynamics, en el que se pueden resolver los problemas de mecánica de fluidos mediante aproximación matemática. Es así como

actualmente se calculan de manera simple, rápida y más o menos acertados los valores de resistencia al avance y propulsión.

El cálculo de la resistencia al avance y de la propulsión de la lancha seleccionado está fuera del alcance de este proyecto por lo que se tomará como referencia la potencia de propulsión que recomienda el fabricante del bote seleccionado. Los valores requeridos de potencia máxima del motor para el bote Dorado 250D recomendados por el fabricante corresponden a motores de combustión interna de 2 y 4 tiempo y las potencias máximas son respectivamente 75 HP (≈ 55 kW) y 60 HP (≈ 45 kW), como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones técnicas Bote Dorado 250D

Eslora	7.70 m	25,26'
Manga	1.96 m	6,43'
Puntal Máx.	1,02 m	3,35'
Carga útil	1400 kg	3087 lb.
Potencia	*75HP-2T	*60HP-4T
Peso Aprox.	336 kg	741 lb.
Altura Espejo	0.51 m	20"

*Potencia máxima calculada con base en motores fuera de borda Yamaha

Fuente: (Eduardoño, 2021) [34]

2.4.1. Selección del motor de propulsión:

Cómo se sabe, los motores de propulsión eléctrica son más eficientes que los motores a gasolina, por lo que se puede seleccionar un motor eléctrico con un valor menor de potencia. Por tanto, teniendo en cuenta los valores máximos de potencia recomendado para el bote seleccionado (60 HP), se puede seleccionar un motor de propulsión eléctrica con potencia en el rango entre 20 y 40 HP. En el mercado se encuentran disponibles una gran gama de marcas y de modelos de motores eléctricos para aplicaciones en electromovilidad náutica, de acuerdo al tipo de aplicación, se consiguen soluciones de sistemas de propulsión para yates de hasta 40 m (120 pies) de eslora, donde se requiere un alto torque, o para lanchas rápidas, donde se requiere una velocidad alta.

En la selección del motor de propulsión se tuvo en cuenta las marcas Torqeedo, Aquawatt y e-Throneque, como se muestran en la tabla 3, en la que se observan tres tipos de motores con potencias comparables a motores a gasolina de 20, 30 y 40 HP, respectivamente.

Tabla 3. Especificaciones de motores eléctricos

Marca	Torqeedo	Aquawatt	e-Throne
Modelo	Motor DB 25 RL	Green Flash 42kW	EZ-Fuera de Borda (20HP)
Alimentación	360 VDC	144 VDC	48 VDC
Potencia en continuo de entrada	27.6 kW	50 kW	10,5 kW
Max. Potencia de propulsión	≈16,2 kW (≈21 HP)		6 HP
Potencia continua de desplazamiento	25,0 kW	42 kW	10,5 kW
Potencia comparada con motores de gasolina	40 HP	70 HP	15 – 20 HP
Max. Velocidad de propela	2400 rpm		2800 rpm
Máximo torque	198 Nm	250 daN	260 lb
Peso	139 kg	98 kg	48 kg
Tipo de Batería	Batería de litio 360 V/120 Ah	Batería de litio 144 V/200 Ah	Batería de Litio o AGM 48 VDC/220 A
Precio		15.696 Euros	3.880 Dollar (alibaba)

Fuente: elaborada por los autores modificada de [35], [36], [37]

De la tabla 3, se descarta el motor EZ-Fuera de Borda (20HP) por su baja potencia de propulsión. En la tabla 4 se hace un comparativo entre las potencias consumidas y los tiempos de operación entre los dos motores restantes, teniendo como referencia las características de las baterías indicadas por los fabricantes para cada motor.

Los criterios tenidos en cuenta para la selección del motor, en primera instancia, fueron el rendimiento de la batería asociada a cada motor operando en velocidades entre 4 y 10 nudos (7,4 a 18 km/h), que es la velocidad normal de operación de las lanchas que transportan pasajeros en la zona costera de Cartagena. Esto va asociado a la autonomía

o tiempo promedio de operación del bote. De la tabla 4, se observa que el motor DB 25 RL de la marca Torqeedo puede operar hasta 20 horas continuas en velocidades de 5 nudos, gastando unos 2 kWh, ó unas 6,7 horas consumiendo unos 6 kWh. En ambos casos, alimentado por una batería de 40 kW. Si se alimenta con dos baterías de 9.1 kW, es decir, 18.2 kW, puede operar hasta 4.5 horas, a una velocidad de 5 nudos (9.3 km/h). Por el contrario el motor Green Flash 42 kW alimentado por una batería de 23 kW puede operar hasta 4 horas, consumiendo 6 kW.

Tabla 4. Comparativo entre motores eléctricos

Desempeño	Batería	Potencia	Velocidad	Tiempo de operación
Motor DB 25 RL Torqeedo	Una batería de 40 kW (360 V)	25 kW (Velocidad Full)	10 nudos	1,6 horas
	Una batería de 40 kW (360 V)	2 kW – 6 kW	5 nudos	6,7 – 20 horas
	Dos baterías de 9.1 kW (355 V)	2 kW – 6 kW	4 nudos	4,5 horas
	Dos baterías de 9.1 kW (355 V)	18 kW (Velocidad full)	17 – 24 nudos	45 minutos
Green Fast 42 kW Aquawatt	Una batería de 23 kW (144 V/160 Ah)	(Velocidad full)	30 nudos	25 minutos
	Una batería de 23 kW (144 V/160 Ah)	23 kW	30 nudos	1 hora
	Una batería de 23 kW (144 V/160 Ah)	12 kW	10 nudos	2 horas
	Una batería de 23 kW (144 V/160 Ah)	6 kW	8 nudos	4 horas
	Una batería de 23 kW (144 V/160 Ah)	3 kW	4 nudos	8 horas

Fuente: elaborada por los autores modificada de modificada de [35], [36], [37]

Teniendo en cuenta que el motor Green Flash 42 kW tiene mayor rendimiento que el motor Torqeedo 25 DB RL, operando en condiciones similares de potencia y tiempo de crucero, se opta por seleccionar el motor Green Flash 42 kW por su menor consumo de potencia (6 kW/4 horas a velocidad de 8 nudos), mayor eficiencia operando en velocidades ideales de acuerdo al perfil de la misión del bote. Como se observa también, el motor el motor Green Flash 42 kW operando a una velocidad de 4 nudos consume unos 3 kW, lo que le alcanza para operar 8 horas continua. La tabla 5 resume los aspectos comparados entre los dos motores.

Tabla 5. Resumen comparativo motores Motor DB 25 RL y Green Flash 42 kW

Desempeño	Batería	Potencia	Velocidad	Tiempo de operación
Motor DB 25 RL Torqeedo	Dos baterías de 9.1 kW (18.2 kW)	2 kW – 6 kW	4 nudos	4,5 horas
Green Fast 42 kW Aquawatt	Una batería de 23 kW (144 V/160 Ah)	6 kW	8 nudos	4 horas

Fuente: Elaborada por los autores

El motor Green Flash 42 kW es un motor de inducción de AC refrigerado por agua de alta eficiencia. Tiene las piezas relevantes hechas de aluminio o acero inoxidable resistente al agua de mar, posee un controlador digital y ánodo de zinc. Como se indica en la tabla 6, es de 42 kW de potencia de salida (equivalente a 70 HP), consume una potencia en continua máxima de 50 kW, tiene un consumo máximo de 360 A.

Tabla 6. Características técnicas del motor Green Flash 42 kW

Technical Data	
Controls	Single lever control
Power input / output	50 kW / 42 kW
Transom height	20 inch
Nominal voltage	144 V
Current from battery max.	360 Amp
Weight	98 kg
Propeller size	12 inch
Maximum speed	30 knots
Range of use	Rivers, lakes, coast
Battery	Lithium battery 144 V 160-200 Ah

Fuente: Aquawatt (2021) [35]

Estos motores operan con voltaje continuo en el rango de 144 V y pueden alcanzar velocidades hasta de 30 nudos. El costo aproximado en el mercado está alrededor de €19,980 (COP 87.872.040). En la figura 17 se muestra el motor seleccionado.

Figura 17. Motor Green Flash 42 kW



Fuente: Aquawatt (2021) [35]

2.4.2 Selección de batería para el motor Green Flash 42 kW

El fabricante Aquawatt recomienda para el funcionamiento y rendimiento máximo de sus motores, baterías con tecnología de litio de alta capacidad, que son al mismo tiempo, seguras, confiables y de alto rendimiento. Tal como lo muestra la tabla 7, el motor modelo Green Flash 42 kW demanda, de acuerdo a recomendaciones del fabricante, de batería de litio 144 V 160-200 Ah. Estos tipos de baterías son fabricadas por muchas empresas, especialmente para soluciones de movilidad eléctrica automotriz y que han sido adaptadas para la propulsión eléctrica naval.

Se selecciona la batería modelo B-LFP48-200 y con ella se conformará un pack de tres baterías en series para conformar un banco de baterías de 144 V /200 AH. Las especificaciones de la batería modelo B-LFP48-200 se listan en la tabla 7.

Tabla 7. Dimensiones y especificaciones preliminares de baterías B-LFP48-200

Modelos	Voltaje (V)	Capacidad Nominal (AH)	Corriente de carga máxima (A)	Peso (kg)+/-5%	Dimensiones (+/-3mm)			Ciclo de Vida DOD 100%
					L(mm)	W(mm)	H(mm)	
B-LFP24-10	24	10	5	3	181	77	167	> 2000
B-LFP48-10	48	10	5	8,4	442	285	44	> 2000
B-LFP48-12	48	12	5	7	300	150	100	> 2000
B-LFP48-16	48	16	5	8	300	150	100	> 2000
B-LFP36-15	36	15	5	7	395	70	62	> 2000
B-LFP48-18	48	18	5	9	603	68	63	> 2000
B-LFP48-20	48	20	10	15	442	285	88	> 2000
B-LFP48-30	48	30	10	21	442	360	88	> 2000
B-LFP48-40	48	40	20	27	442	325	132	> 2000
B-LFP48-50	48	50	20	33,5	442	400	132	> 2000
B-LFP48-60	48	60	20	39	442	460	132	> 2000
B-LFP48-150	48	150	50	77	442	520	280	> 2000
B-LFP48-200	48	200	50	110	442	520	320	> 2000
B-LFP48-224	48	224	50	168	150	90	300	> 2000

Fuente: (Aliexpress, 2021) [39]

En la figura 18 se muestra el pack de tres baterías B-LFP48-200. Estas baterías tienen un precio unitario que oscila entre US\$2.800,00 - US\$ 3.500,00 en el portal Aliexpress.com

Para la selección de la batería se tuvo en cuenta el perfil de misión del bote (más o menos de 4 horas de operación diaria a una velocidad de crucero promedio menor a 10 km/h). Además se consideró la capacidad (kWh) y el desempeño en continua de cada modelo de batería. Teniendo en cuenta que el motor Green Flash 42 kW puede operar hasta 8 horas con tres baterías de 10 kW, se consideró, tal como lo recomienda el fabricante, es una buena opción, tanto en el aspecto económico, menos peso muerto para el bote, menores requerimientos de carga, lo que incide favorablemente en el dimensionado de la estación de carga. Esta batería de ión litio ofrece una capacidad de 10.0 kWh (48 V/200 Ah). Con tres baterías B-LFP48-200 (20 kWh) se puede alcanzar entre 1 a 4 horas de autonomía, alcanzando hasta 30 millas náuticas, dependiendo de la velocidad de la embarcación y de la carga transportada. De la misma manera, la potencia en continua que brindan (30 kW) alcanza para suplir las necesidades del motor seleccionado. De acuerdo

con el fabricante, estas baterías ofrecen mayor densidad energética, costos en kWh más bajos y altos estándares de seguridad y de resistencia al agua (IP67) [40]. En la figura 18 se muestra la batería seleccionada.

Figura 18. Batería B-LFP48-200



Fuente: (ALIEXPRESS, 2021) [39]

Los datos técnicos de la batería seleccionada (B-LFP48-200) se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Datos técnicos Batería B-LFP48-200

Electrical Characteristics	Nominal Voltage	48V
	Nominal Capacity	200Ah (C _s ,25°C)
	Energy	9600Wh
	Internal Resistance	≤500mΩ
	Cycle Life	>2500 cycles @0.2C 100%DOD
	Months Self Discharge	<3%
	Efficiency of Charge	100% @0.2C
	Efficiency of Discharge	96~99% @1C
Standard Charge	Charge Voltage	54.8±0.2V
	Charge Mode	0.2C to 54.8V, then 54.8,charge current 0.02C(CC/CV)
	Charger Current	20A
	Max. Charge Current	30A
	Charge Cut-off Voltage	55.5V±0.2V
Standard Discharge	Continuous Current	100A
	Max. Pulse Current	150A(<3s)
	Discharge Cut-off Voltage	37.5V

Fuente: (ENFsolar, 2021) [40]

2.4.3. Cargador de baterías del bote

Los vehículos eléctricos a baterías (BEV) y los vehículos híbridos enchufables (PHEV) requieren de suministro eléctrico mediante sistemas de carga o también denominado infraestructura de carga. Éstos se conforman de múltiples cargadores eléctricos que hacen de interfaz entre el vehículo y la red de suministro de electricidad [41]. En este caso, el cargador de baterías del bote tomará la energía del sistema de almacenamiento estacionaria de la estación de carga y no de la red convencional de distribución.

La selección del cargador de batería se hace teniendo en cuenta el voltaje nominal de salida. Para baterías de LiFePO₄ de 144 V, el voltaje nominal de carga debe estar aproximadamente en 175,2 V. Para este caso, se selecciona el cargador KP2000K, de 2000 W que es ampliamente usado en la carga de baterías de litio de los autos eléctricos. Como cada batería requiere 9600 Wh para cargarla, entonces se usarán tres cargadores de 200 W (uno para cada batería). De esta forma, cada cargador emplearía en promedio entre 4 a 5 horas durante el proceso de carga. Este cargador tiene un precio unitario que oscila entre US\$ 100,00 - US\$ 160,00 en el portal Alibaba.com

Las especificaciones del Cargador KP2000K se muestran en la tabla 9 y 10.

Tabla 9. Especificaciones del cargador Car Battery Charger - KP2000K

Nominal Tensión de salida	CV			CC	Corriente de transición/corte		Peso neto	Tamaño
	Plomo y ácido	Li- MnO ₂	LiFePO ₄	Un	Ácido de plomo (A)	Li (A)	(Kg)	(Mm)
12 V 12 V	14,7 V	16,8 V	14,6 V	80	20,0	5,0	6,5	330*175*115
24 V	29,4 V	29,4 V	29,2 V	60	12,0	3,0		
36 V 36 V	44,1 V	42,0 V	43,8 V	40	8,0	2,0		
48 V	58,8 V	54,6 V	58,4 V	30	6,0	1,5		
60 V	73,5 V	67,2 V	73,0 V	25	5,0	1,3		
144 V	176,4 V	176,4 V	175,2 V	10	2,0	0,5		
288 V	352,8 V	352,8 V	350,4 V	5	1,0	0,3		

Fuente: (Alibaba.com, 2021) [42]

Tabla 10. Especificaciones detalladas del cargador Car Battery Charger - KP2000K

Marca:	KINGPAN
Número de Modelo:	Car Battery Charger -KP2000K
Estándar de la toma de corriente:	UE / AU / UK / US
Uso:	Coche eléctrico, elevador de golf, carrito folk
Type:	Li-ion , Lead Acid & MH-Ni Battery Charger
Output Power:	2000W
Input Voltage:	110V, 220V or 90-264V
Efficiency:	85-95%
Size:	330*175*115mm
Protections:	Short circuit & Overload & Reverse polarity
Housing:	Alumium Silver
Net Weight::	6.5KG

Fuente: (Alibaba.com, 2021) [42]

2.5. Diseño de la Estación de carga

2.5.1. Requerimientos para la estación de carga:

A continuación, se describe el proceso de diseño del sistema de generación fotovoltaica para la propulsión eléctrica de embarcaciones navales menores.

El sistema de propulsión eléctrica del bote, conformado por el motor Green Flash 42 kW demanda al menos de tres baterías de 9600 kWh de capacidad (28.800 Wh). Teniendo en cuenta que el área de operación de la embarcación para la cual está orientado la presente propuesta, se ubica en zona insular o en costas donde no hay acceso al servicio de energía eléctrica, se justifica que el sistema de recarga de la embarcación sea alimentado por un sistema fotovoltaico off grid o aislado.

Por lo tanto, el principal requerimiento que debe satisfacer el campo fotovoltaico de la estación de carga es la generación de al menos 20 kWh por día. Esta estación podrá diseñarse con o sin almacenamiento, teniendo en cuenta que durante las horas de sol, la lancha estará operando por lo que se puede plantear una estación con almacenamiento para recargar a la batería de la lancha en horas de no operación, como por ejemplo, en horas nocturnas.

Otro requerimiento, no menos importante, es el tiempo de duración del proceso de recarga de las baterías. Se busca que al menos en poco más de cuatro horas, pueda alcanzarse un 80% de la capacidad de la carga (valor recomendado para la integridad de la batería). Esto sería posible mediante el uso de cargadores trifásicos de 11 kW, usando el cable BMW i Wallbox. Otra opción es mediante estaciones de recarga rápida (50 kW), con la cual se llega a la cifra récord de solo 42 minutos para llegar al 80% de la batería. Sin embargo, el uso frecuente de recargas rápidas no se recomienda para la batería, ya que se puede acortar la vida útil de las celdas de carga. Durante este proceso, el flujo de electricidad es muy intenso, por lo que la temperatura de la batería se eleva demasiado y de forma muy rápida.

Si, por el contrario, se trata de una carga estándar para enchufes domésticos (2,4 kW), la marca alemana sitúa en 4 horas para llegar a ese mismo porcentaje de la batería [42].

Algunas recomendaciones del fabricante BMW i para preservar la vida útil de las baterías es evitar que la batería se descargue por debajo del 10% de la carga, ya que podría dañar y reducir su capacidad. Las baterías de litio no tienen efecto memoria, por lo que no necesitas vaciarla completamente para rellenarla del todo cada vez que se use. Tampoco es recomendable realizar recargas completas como rutina. Lo más indicado es cargar la batería a un 80%. De esta manera, no se estropearán las celdas ni se descargará más rápido [43].

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, se seleccionan los siguientes requerimientos técnicos para la estación de carga del bote:

Capacidad del banco de batería de la estación de carga $\geq 20 \text{ kWh/d} + 20\%$

Potencia total requerida para carga de batería del bote (carga completa) = 20 kW

Recomendaciones del fabricante para recarga de las baterías:

- Potencia requerida para carga del 80% de tres batería = 23 kW
- Tipo de cargador disponible: cargadores de 110 V / 220 V de 2.000 W
- Tiempo de carga = 5 horas

De acuerdo a los requerimientos anteriores y con el propósito de garantizar la capacidad requerida al momento de la carga, se opta por diseñar la estación de carga, haciendo uso del tipo de cargador que se recomienda para el sistema Green Flash 42 kW, el cual opera a 110 V/220V, entrega 2 kW y suministra una carga de batería del 80% en un tiempo de 4 horas.

2.5.2. Diseño de la estación de carga:

De acuerdo a los requerimientos anteriores y con el propósito de garantizar la capacidad requerida al momento de la carga de la batería del bote, se opta por diseñar la estación de carga que se muestra en el diagrama de bloques de la figura 19. El diseño de la estación de carga estará conformado por un sistema de generación fotovoltaica autónomo (conjunto de paneles fotovoltaicos, un banco de baterías y conjunto cargador e inversor de corriente).

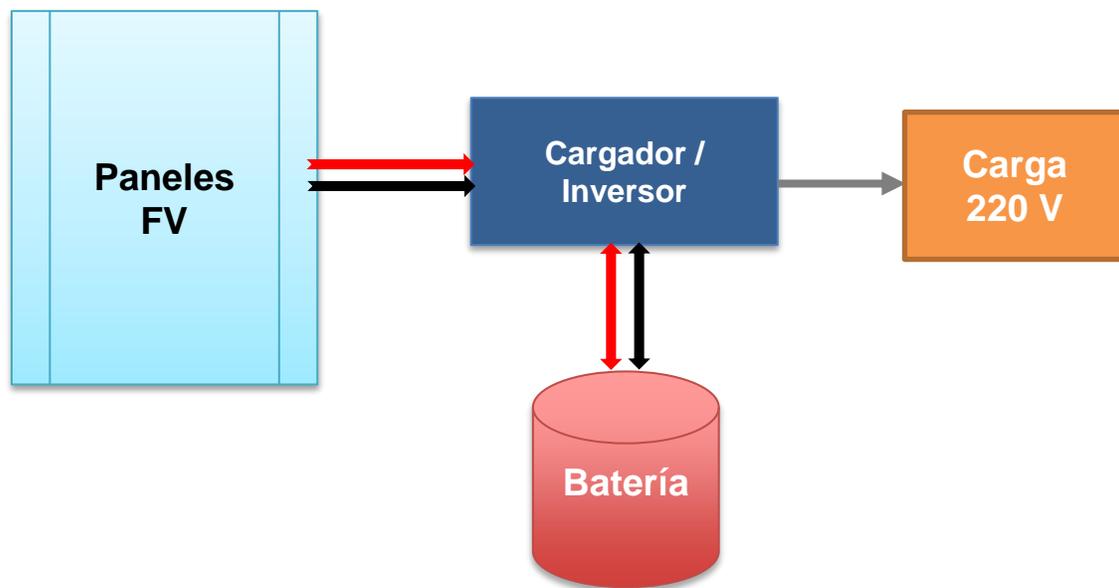
Por lo tanto, se propone los siguientes requerimientos técnicos para la estación de carga:

- Potencia del campo fotovoltaico: 23 kW/d + 20%
- Capacidad de almacenamiento suficiente.

Requerimientos de salida de la estación para recarga de batería del bote:

- Potencia de salida: 6 - 10 kW
- Voltaje de salida: 110 V / 220 V
- Tiempo de recarga \geq 5 horas

Figura 19. Diagrama de bloques del sistema FV



Fuente: Elaborada por los autores

2.5.2.1. Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

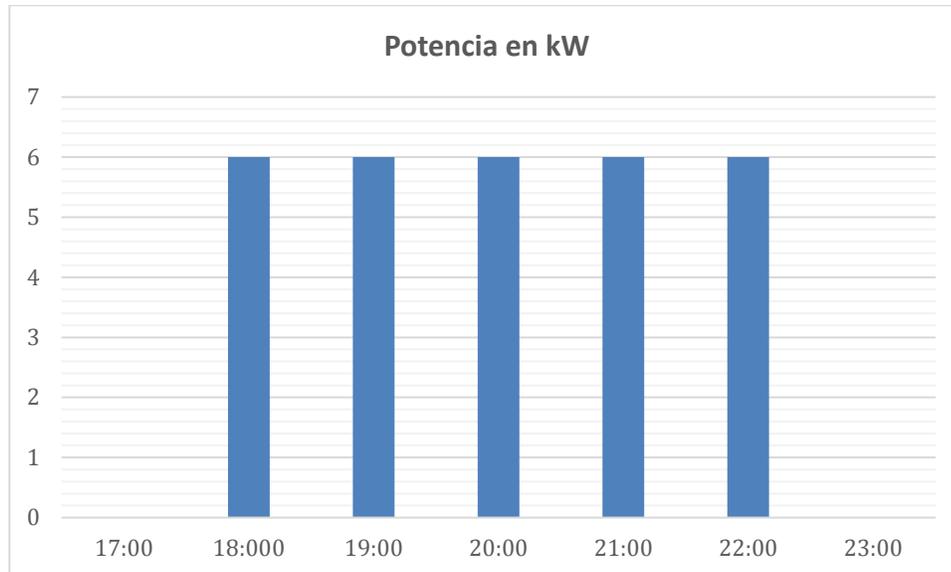
El diseño de la estación de carga se basa en el dimensionamiento del campo fotovoltaico. El procedimiento a seguir para dimensionar el sistema fotovoltaico autónomo es el siguiente:

- a. Estimación del consumo o demanda energética: es fundamental conocer los datos de consumo de la carga (perfil y factor de carga) para evitar desviaciones en el dimensionamiento.
- b. Datos del lugar donde se realizará la instalación: para saber el aporte solar de la que se dispone y el ajuste de la inclinación del panel FV con respecto a la horizontal.
- c. Dimensionado del campo generador fotovoltaico: entrega valores del número de paneles necesarios.
- d. Dimensionado del sistema de acumulación: indica la capacidad del banco y el número de baterías a emplearse. Para el dimensionado del sistema de acumulación es muy importante tener en cuenta los días de autonomía y la tensión de trabajo.
- e. Dimensionado del controlador de carga: se selecciona a partir de los datos de tensión y corriente de entrada y de salida.

2.5.2.2. Perfil de carga:

El perfil de carga está basado sobre la carga promedio calculada durante muchos días. Un perfil de carga muestra gráficamente cómo varía el consumo promedio a lo largo del día. Esto influye en el tamaño de la batería. Para efectos de este diseño, la estación de carga operará entre las 18:00 a 22:00, tiempo en el cual la lancha está inactiva y al mismo tiempo se garantiza carga full para las operaciones del día siguiente. El perfil de carga se muestra en la figura 20.

Figura 20. Perfil de carga de la estación FV



Fuente: Elaborada por los autores

2.5.2.3. Demanda energética diaria requerida (E_{ca}):

El consumo diario de energía se mide en vatios horas por día (Wh/d). El valor nominal del requerimiento de potencia es de 23 kWh/d más un 20% de margen de seguridad recomendado:

$$\text{Energía-Equipo [Whd]} = \text{Potencia unitaria [W]} * \text{tiempo de uso diario [d]}$$

$$E_{ca} = P_{ca} \cdot t = 23 \text{ kW} (1 + 20\%) \times 1 \text{ día} = 27,6 \text{ kWh/d}$$

Considerando las pérdidas que introducen el uso de un regulador de carga y del inversor, la demanda energética diaria resultante es:

$$E_{caT} = E_{ca} / (\eta_{inv} \times \eta_{reg}) = 27,6 \text{ kWhd} / (0,95 \times 0,97) = 30 \text{ kWh/d}$$

$$E_{caT} = 30 \text{ kWh/d}$$

Dónde,

E_{caT} : demanda energética diaria

η_{inv} : rendimiento del inversor ($\eta_{inv} = 95\%$)

η_{reg} : rendimiento del regulador de carga ($\eta_{reg} = 97\%$)

2.5.2.4. Factor de Demanda (DF):

Es la relación entre la potencia máxima y la potencia que ocurriría si un usuario encendiera simultáneamente todas sus cargas.

$$DF = \frac{P_{pico}}{\sum_1^A P_{max}} = \frac{6 \text{ kW}}{6 \text{ kW}} = 1$$

Donde:

Ppico: es la potencia máxima consumida en un periodo de tiempo (1 año).

Pmax: es el consumo máximo de energía de un aparato.

A: es el número de aparatos.

En este caso, durante el tiempo de recarga se estará consumiendo el 100% de la potencia generada y almacenada en el banco de baterías. En este caso, los equipos deben dimensionarse para trabajar al 100% de su capacidad máxima nominal.

2.5.2.5. Evaluación del aporte solar:

Para lograr el máximo aprovechamiento de la energía solar es necesario conocer la radiación solar incidente (kW/m^2) del lugar y el ángulo (β) de inclinación del panel fotovoltaico respecto a la horizontal. Para ello se deben consultar las bases de datos sobre radiación solar incidente, los datos medios anuales de radiación diaria incidente sobre superficie horizontal ($\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{día}$), los datos medios mensuales de radiación diaria incidente sobre superficie horizontal ($\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{día}$). Este valor se denomina $G_{dm}(0)$, los datos medios diarios de radiación incidente sobre superficie horizontal ($\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{día}$), los datos medios horarios de radiación incidente sobre superficie horizontal (kWh/m^2) y los datos de horas de sol diarias (medias anuales, mensuales o valores diarios). Los valores dados para superficie horizontal deben ser transformados a valores sobre superficie inclinada, en función del ángulo adecuado para el panel solar.

- **Cálculo del ángulo de inclinación del panel FV (β):**

Se determina el ángulo de inclinación (β) del panel FV respecto a la horizontal, a partir de la latitud y longitud del lugar y del ángulo de declinación solar. Ver figura 21.

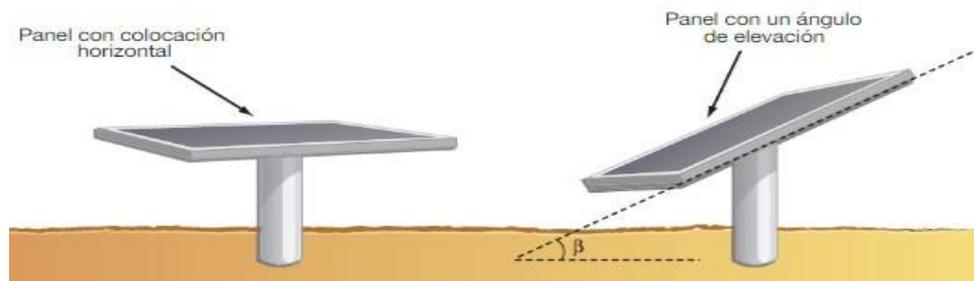
$$\beta = \varphi + \delta$$

Donde,

φ = latitud

δ = declinación solar

Figura 21. Ángulo de inclinación del panel FV



Fuente: Elaborado por los autores

El ángulo δ varía diariamente por lo que se toma un factor de corrección: $\beta = \varphi \pm 10^\circ$.

Para efecto del presente diseño, se toma la isla de Tierra Bomba como el lugar donde se realizará la instalación. Las coordenadas geográficas del lugar obtenidas mediante Google Earth es: $10^\circ 37' 8'' \text{N } 75^\circ 57' 4'' \text{O}$.

Los valores dados para superficie horizontal deben ser transformados a valores sobre superficie inclinada, en función del ángulo adecuado para el panel solar. El ángulo de inclinación (β) para el sitio seleccionado, es:

$$\beta = \varphi \pm 10^\circ = 10^\circ + 10^\circ \approx 20^\circ$$

- **Datos de irradiación del lugar del sitio de instalación:**

Los datos se obtienen de bases de datos especializadas sobre irradiación solar incidente. Algunos datos de importancia son:

- Datos medios anuales de radiación diaria incidente sobre superficie horizontal (kWh/m².día).
- Datos medios mensuales de radiación diaria incidente sobre superficie horizontal kWh/m².día).
- Datos medios diarios de radiación incidente sobre superficie horizontal kWh/m².día).
- Datos medios horarios de radiación incidente sobre superficie horizontal (kWh/m²).
- Datos de horas de sol diarias (medias anuales, mensuales o valores diarios).

La base de datos consultada fue el Sistema de Información Geográfica para Instalaciones Fotovoltaicas (Photovoltaic Geographical Information System – PVGIS). PVGIS (2021) proporciona acceso gratuito y abierto a la siguiente información (figura 22):

- Potencial fotovoltaico para diferentes tecnologías y configuraciones de sistemas conectados a la red e independientes.
- Radiación solar y temperatura, como promedios mensuales o perfiles diarios.
- Serie de tiempo completo de valores horarios tanto de radiación solar como de rendimiento fotovoltaico.
- Datos típicos del año meteorológico para nueve variables climáticas.
- Mapas, por país o región, de recursos solares y potencial fotovoltaico.

Figura 22. Sistema de Información Geográfica Fotovoltaica (PVGIS)



Fuente: (PVGIS, 2021) [44]

La consulta a la base de datos PVGIS (<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>) entrega información sobre datos de irradiación solar (promedios mensuales y anuales) del lugar seleccionado en el mapa (ver figura 23), entre ellos:

- Irradiación global horizontal
- Irradiación directa normal
- Irradiación global con el ángulo óptimo
- Irradiación global con el ángulo seleccionado (β)

Figura 23. Pantallazo consulta sobre irradiación solar mensual

The screenshot displays the PVGIS web interface. On the left is a map of Cartagena, Colombia, with a location marker. The right panel is titled 'DATOS MENSUALES DE IRRADIACIÓN' and contains the following settings:

- Cursor:** Seleccionado 0.378, -75.574
- Elevación (m):** 16
- Utilizar las sombras del terreno:**
 - Horizonte calculado
 - Cargar archivo de horizonte
- Base de datos de radiación solar:** PVGIS-NSRDB
- Año inicial:** 2005
- Año final:** 2015
- Irradiación:**
 - Irradiación global horizontal
 - Irradiación directa normal
 - Irradiación global con el ángulo óptimo
 - Irradiación global con el ángulo: 20
- Ratio:**
 - Ratio difusa/global
- Temperatura:**
 - Temperatura media

At the bottom of the panel are buttons for 'Visualizar resultados', 'csv', and 'json'. The map shows the location of Cartagena with coordinates 10°21'11" N and 75°34'12" W.

Fuente: (PVGIS, 2021) [44]

En la figura 24 se muestra de manera ampliada el tipo de datos consultados en PVGIS.

Figura 24. Pantallazo sobre datos consultados en PVGIS

Cursor:
Seleccionado 10.391, -75.530
Elevación 8 (m):

Utilizar las sombras del terreno:
 Horizonte calculado

 Cargar archivo de horizonte

CONECTADO A RED

FV CON SEGUIMIENTO

FV AUTÓNOMO

DATOS MENSUALES

DATOS DIARIOS

DATOS HORARIOS

TMY

DATOS MENSUALES DE IRRADIACIÓN

Base de datos de radiación solar*

Año inicial:* Año final:*

Irradiación:

Irradiación global horizontal

Irradiación directa normal

Irradiación global con el ángulo óptimo

Irradiación global con el ángulo:

Ratio:

Ratio difusa/global

Temperatura:

Temperatura media

Fuente: (PVGIS, 2021) [44]

En la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos de PVGIS. Estos resultados son claves para determinar el mes de peor promedio de irradiación solar, valor que se toma como referencia para el dimensionamiento del sistema generador fotovoltaico. Como se observa en la tabla 11, el mes de peor promedio de irradiación global horizontal es el mes de noviembre (159,49 kWh/m²), mientras que mayo es el mes de peor promedio de irradiación normal directa (109,36 kWh/m²); esto debido a presencia de mayor nubosidad por la temporada de lluvias. De la tabla 2 se observa que la irradiación promedio anual horizontal (1984,5 kWh/m²) se mejora con la inclinación del panel fotovoltaico. El software PVGIS entrega valores de irradiación global para un ángulo óptimo de inclinación que el software calcula y también entrega valores para un ángulo de inclinación (β) dado por el usuario. El promedio anual de irradiación según el ángulo óptimo dado por PVGIS es de 2172,06 kWh/m², mientras que el valor promedio anual de irradiación obtenido con el ángulo de inclinación calculado ($\beta = 20^\circ$) es de 2163,4 kWh/m².

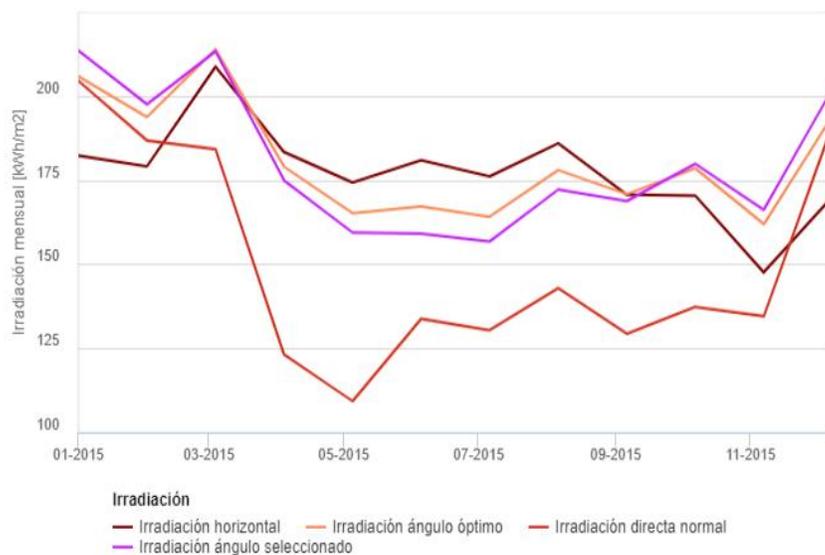
Tabla 11. Datos de irradiación solar de PVGIS

	Irradiación global horizontal	Direct Normal irradiation	Global irradiation optimum angle	Global irradiation at user angle
Mes	2015	2015	2015	2015
Enero	182.31	204.46	205.86	213.48
Febrero	179.13	186.78	193.72	197.5
Marzo	208.73	184.23	213.84	213.24
Abril	183.33	123.21	178.97	174.89
Mayo	174.29	109.36	165.18	159.41
Junio	180.92	133.78	167.19	159.07
Julio	176.11	130.42	164.11	156.8
Agosto	185.93	142.87	177.97	172.18
Septiembre	170.66	129.36	170.84	168.78
Octubre	170.37	137.35	178.48	179.83
Noviembre	147.59	134.57	161.9	166.19
Diciembre	170.05	191.34	194	202.01
Total	1984,5	1897,73	2172,06	2163,4

Fuente: Obtenida de PVGIS

A continuación se muestra el comportamiento durante un año de las variables de irradiación horizontal, irradiación directa normal, irradiación por ángulo óptimo de inclinación e irradiación con ángulo de inclinación seleccionado por el usuario ($\beta = 20^\circ$). Como se observa en la figura 25, con el ángulo de inclinación calculado en la sección anterior se consiguen altos resultados en irradiación, muy similares a los generados por un sistema con un ángulo óptimo de inclinación.

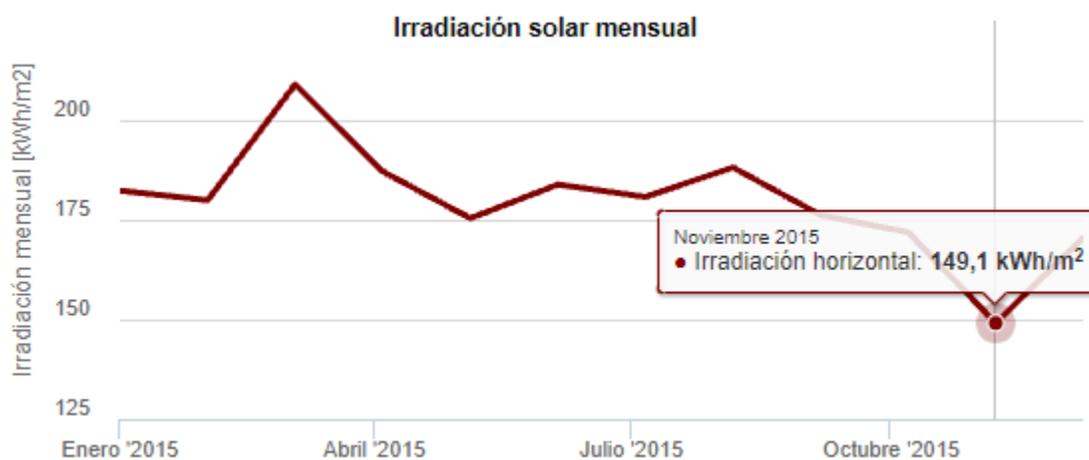
Figura 24. Valores de irradiación horizontal, directa, con ángulos de inclinación



Fuente: obtenido por los autores de PVGIS (2021)

En la figura 26 se muestra el comportamiento de la irradiación mensual dónde se observa que noviembre es el mes con el menor valor.

Figura 25. Irradiación solar del mes más bajo



Fuente: obtenido por los autores de PVGIS (2021)

- **Irradiación media diaria del lugar del sitio de instalación:**

Es la cantidad de irradiancia recibida en un lapso de un día. Se suele medir en Wh/m²/día:

$$\text{Radiación Media Diaria (R}\beta\text{)} = (\text{Radiación Media Mensual})/30 \text{ días}$$

Para el cálculo de la Radiación Media Diaria se toma de la tabla 10 los valores promedios de radiación con el ángulo seleccionado del mes de menor valor. En este caso corresponde al mes de julio, con una irradiación promedio de 156.8 Wh/m² y ángulo de inclinación de 20°.

$$\text{Radiación Media Diaria (R}\beta\text{)} = 156.8 \text{ kWh/m}^2 / 30 \text{ días} = 5,23 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$$

$$\mathbf{R\beta = 5,23 \text{ kWh/m}^2/\text{día}}$$

- **Cálculo de las Horas Pico de Sol (HSPβ):**

Es el número de horas en que se dispone de una hipotética irradiancia solar constante de 1 kW/m² sobre la superficie de un panel solar. Es decir, una hora solar pico “HPS” equivale a 1 kWh/m².

Para calcular el valor de las Horas Pico de Sol con un ángulo seleccionado (β) se divide el valor de la Radiación Media Diaria (**Rβ**) incidente entre el valor de la potencia de irradiancia en condiciones estándar de medida (STC):

$$\mathbf{\text{Hora Solar Pico (HSP}\beta\text{)} = R\beta/I\beta(\text{STC})}$$

Donde,

Iβ(STC): es el valor de la potencia de irradiancia en condiciones estándar de medida (STC:
Iβ = 1 kWh/m²)

Así las Horas Pico de Sol (HSPβ) para el lugar de instalación seleccionado teniendo presente el valor de la Radiación Media Diaria (Rβ), es el siguiente:

$$\text{Horas Pico de Sol (HSP}\beta\text{)} = 5,23 \text{ kWh/m}^2/\text{día} / 1 \text{ kWh/m}^2$$

$$\mathbf{\text{Horas Pico de Sol (HSP}\beta\text{)} = 5,23 \text{ horas}}$$

2.5.2.6. Dimensionado del campo generador fotovoltaico:

Para estimar la potencia nominal del campo generador fotovoltaico, se utilizan los datos de radiación solar y de consumo medios diarios del mes más desfavorable calculados en los apartados anteriores.

La Potencia total requerida por hora del campo fotovoltaico es la siguiente (P_{NOM}):

$$P_{NOM} = E_{caT}/HSP\beta$$

$$P_{NOM} = 30 \text{ kWh}/5,23 \text{ horas} = 5.736 \text{ W}$$

$$\mathbf{P_{NOM} = 5.736 \text{ W}}$$

Donde,

E_{caT} : Consumo medio diario (30 kWh/d)

$HSP\beta$: Horas Pico de Sol (5,23 horas)

El valor obtenido de P_{NOM} corresponde a la potencia por hora que debe suministrar el generador fotovoltaico.

- **Selección del Número de Panel Fotovoltaico (N_P):**

Para determinar el número de paneles fotovoltaicos se tuvo en cuenta los valores comerciales de potencia disponibles en paneles solares (W_P). Para efecto de este proyecto, se seleccionó como referencia el panel de 650 W de potencia nominal. El número de paneles fotovoltaicos (N_P) requeridos se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\mathbf{N_P = P_{NOM} / W_P}$$

$$N_P = 5.736 \text{ W}/650 \text{ W} = 8.82 \approx 9$$

$$\mathbf{N_P = 9}$$

Donde,

P_{NOM} : es el consumo medio diario mensual para el mes crítico, (en este caso, es siempre el mismo [26 kWh/día], pues el consumo diario es constante todo el año).

W_P : es la potencia pico del módulo en condiciones estándar de medida STC, en este caso, $W_P = 650 \text{ W}$.

Las especificaciones técnicas del panel usado como referencia se muestran en la tabla 12, corresponde al panel de la marca Gold Shingled 635-660W, modelo MS650PM6-S6 del fabricante Mysolar, con 650 W de potencia pico en STC (ver figura 27). El precio estimado de un panel fotovoltaico monocristalino está aproximadamente en \$800.000 pesos.

Tabla 12. Especificaciones técnicas Panel modelo MS650PM6-S6

Module Type	MSxxxPM6-S6, xxx=635-660W					
Maximum Power-Pm [W]	660	655	650	645	640	635
Open Circuit Voltage-Voc [V]	46.30	46.20	46.10	46.00	45.90	45.80
Short Circuit Current-Isc [A]	18.21	18.12	18.03	17.94	17.85	17.76
Maximum Power Voltage-Vm [V]	37.80	37.70	37.60	37.50	37.40	37.30
Maximum Power Current-Im [A]	17.46	17.37	17.29	17.20	17.11	17.02
Module Efficiency- η [%]	21.50	21.30	21.20	21.00	20.90	20.70
Operating Temperature (°C)	-40°C~+85°C					
Maximum System Voltage	1500VDC/1000VDC					
Maximum Series Fuse Rating	25A					
Power Tolerance	0~+6W					
Temperature Coefficient of Pmax	-0.34%/°C					
Temperature Coefficient of Voc	-0.27%/°C					
Temperature Coefficient of Isc	0.04%/°C					
Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45±2°C (42.3±2°C in NMOT)					

Fuente: (Mysolar, 2021) [45]

Figura 26. Panel solar Gold Shingled 635-660W, modelo MS650PM6-S6



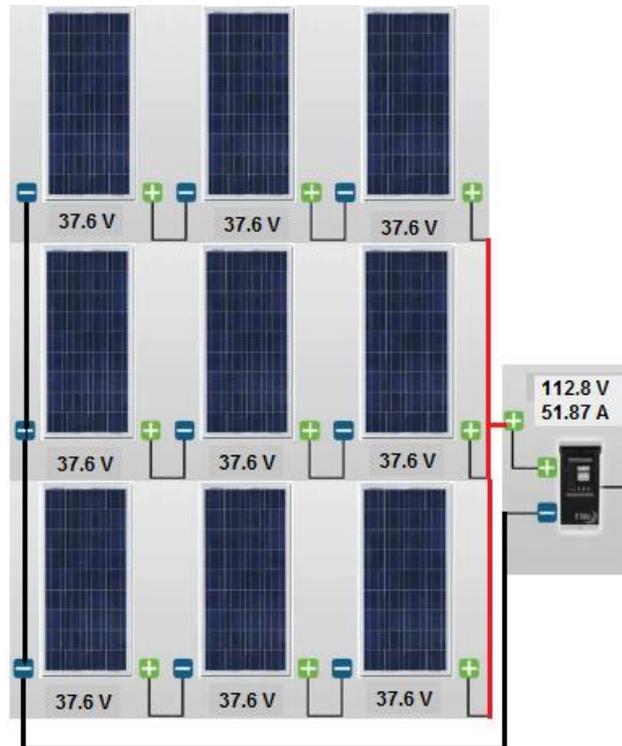
Fuente: (MySolar, 2021) [45]

Respecto al tipo conexión de los módulos calculados, se pueden configurar conexiones en serie, en paralelo o en combinaciones serie-paralelo. Teniendo en cuenta que el panel MS650PM6-S6 tiene un voltaje en el punto de potencia máxima (V_m) de 37.6 V, se opta por conectar tres ramas en paralelo, cada rama tiene tres paneles conectados en serie, como se muestra en la figura 28.

#Pseries = 3 paneles.

#Pparalelos = 3

Figura 27. Configuración elegida de conexión de paneles



Fuente: Elaborada por los autores

2.5.2.7. Dimensionamiento del banco de baterías:

Las baterías que existen en el mercado generalmente tienen voltajes de 12V, 24V, 48V. Para determinar la capacidad de batería requerida, se realizaron cálculos con baterías de 48 V. Cálculo de Capacidad para la batería (C_n):

$$C_n = \frac{\text{Energía necesaria} \times \text{Días de autonomía}}{\text{Voltaje} \times \text{Profundidad de descarga}}$$

$$C_n = \frac{E_{caT} \times A}{V_n \times DOD} = \frac{23 \text{ kWh} \times 1}{48 \text{ V} \times 60\%} = 684,5 \text{ Ah}$$

Donde,

E_{caT} : Consumo medio diario (23 kWh/d).

A: Días de autonomía (1 día).

V_n : Tensión de la batería (48 V).

DOD: Profundidad de descarga máxima estacional (70%).

- **Selección del tipo de Batería:**

En el mercado existen muchas tecnologías de baterías, marcas y modelos. En la tabla 13 se muestran tres tipos de baterías muy populares en los sistemas de almacenamiento fotovoltaico. Desde el punto de vista tecnológico y de prestaciones, de los tres ejemplo mostrados, la batería de LifePO4 (48 V/ 200 Ah) es la mejor opción, debido al número reducido de unidades (se requieren 3 unidades conectadas en paralelo) pero no la favorece el costo (cerca de €5.160) [46]. La opción de la Batería Pb ácido Gel (Modelo 6-GFM-250) requiere de 12 unidades (3 ramas en paralelo de 4 baterías conectadas en serie), es la opción más económica y su capacidad está por encima del valor requerido (750 Ah de 541 Ah requeridos). En cuanto a la batería tubular de gel (2V600AH), se requieren 24 unidades conectadas en serie para lograr los 48 voltios de la instalación. Su costo es superior tan solo en 7,6% al de la batería de Ácido Plomo, por lo que resulta una buena opción.

Tabla 13. Tipos de baterías.

Tipo de Batería	Modelo	Voltaje Nominal	Capacidad	Ciclado	Cantidad	Valor Unid.	Valor Total
Batería Pb ácido Gel	6-GFM-250	12 V	250 Ah	1500@75%DOD	12	€152	1.824
Batería de LifePO4	LFP48-200	48 V	200 Ah	3000@ 80% DOD	3	€1.720	5.160
Batería Tubular Gel	2V600AH	2 V	600 Ah	1500@50%DOD	24	€81,8	1.963

Fuente: ENF Solar (2021) [46], [47], [48]

De la tabla anterior se opta por seleccionar la batería Batería Pb ácido Gel (Modelo 6-GFM-250), teniendo en cuenta que este tipo de baterías, son recomendadas en aplicaciones donde se requiera gran cantidad de corriente, ciclado alto y buena profundidad de descarga. La batería seleccionada se muestra en la figura 29.

Figura 28. Batería de Pb ácido Gel 6-GFM-250 12V/250AH



Fuente: (www.shuangdeng.com, 2021) [49] <http://www.shuangdeng.com.cn/view-96-227.html>

2.5.2.8. Dimensionamiento del Controlador/Regulador de carga:

Para dimensionar el controlador/regulador se debe calcular cual es la máxima corriente que debe soportar, a su entrada pero también a su salida.

Para calcular la corriente de entrada al regulador se toma como referencia la corriente de cortocircuito (I_{sc}) de un panel solar y se realiza el producto por el número de ramas en paralelo (la corriente de cada rama en paralelo es aproximadamente la misma), de acuerdo a la configuración establecida para la conexión de los paneles FV; en este caso, tres ramas en paralelo y cada rama con tres paneles en serie.

$$I_{\text{entrada}} = \#P_{\text{paralelos}} \times I_{sc} \times F_s$$

$$I_{\text{entrada}} = 3 \times 18,03 \text{ A} \times 1,25 = 67,61 \text{ A}$$

Donde,

#Pparalelos = Número de ramas en paralelo (3).

I_{sc} : Corriente de cortocircuito del panel MS650PM6-S6 (18,03 A).

F_s : es un factor de seguridad para evitar daños ocasionales al regulador (25%).

Con el cálculo anterior se tiene que la corriente de entrada (Ientrada) que debe manejar el Controlador de carga debe ser igual o mayor a 67,61 A.

Para el cálculo de la corriente de salida se considera el valor de las potencias de las cargas a alimentar, en este caso, cargas AC a 110 V, que corresponde a la tensión de trabajo del Inversor:

$$I_{salida} = \frac{1.25(P_{ac}/\eta_{inv})}{V_{inv}}$$

$$I_{salida} = \frac{1.25(6 \text{ kW}/0,95)}{220 \text{ V}} = 71,77 \text{ A}$$

Dónde,

Pac: potencia de salida de los tres Inversores de voltaje (6 kW).

η_{inv} : rendimiento del inversor ($\eta_{inv} = 95\%$)

De acuerdo con lo anterior, el Controlador de carga debe manejar a la salida una corriente de 35,88 A.

En cuanto al voltaje de entrada, se debe considerar el tipo de configuración de la conexión de los paneles FV y el voltaje del panel en el punto de máxima potencia (en este caso, $V_m=37,60$ VDC). En este caso, se establecieron conexiones de tres ramas de paneles en serie. Por tanto, el voltaje de entrada del Regulador de carga es:

$$V_{in} = 3 \times V_m$$

$$V_{in} = 3 \times 37.60 \text{ V} = 112,8 \text{ V}$$

$$V_{in} = 112,8 \text{ V}$$

Con el resumen de los datos de la tabla 14 se opta por seleccionar el regulador de carga MPPT Spriter Series 60-120, modelo 48V100.

Tabla 14. Resumen datos Regulador de carga

V_{in}	I_{salida}	I_{entrada}
112,8 V	35,88 A	67,61 A

Fuente: Elaborada por los autores

La tabla 15 muestra las principales especificaciones del Regulador de carga Spriter Series 60-120, modelo 48V100. Como se observa, este modelo puede trabajar a tensiones de batería de 12V/24V/48V y puede manejar una corriente máxima de carga de 100 A. En la figura 30 se muestra el Regulador de carga seleccionado.

Tabla 15. Especificaciones Regulador Spriter Series 60-120, modelo 48V100

Model	Spriter 48V60	Spriter 48V80	Spriter 48V100
Solar System Voltage	12V/24V/48V	12V/24V/48V	12V/24V/48V
Monitoring Option	WiFi or GPRS	WiFi or GPRS	WiFi or GPRS
Electrical			
PV Operating voltage	15~145Vdc@12V 30~145Vdc@24V 60~145Vdc@48V		
Max.PV Open circuit Voltage	150Vdc	150Vdc	150Vdc
Max.PV input power	12V 1500W/24V3000W/48V6000W		
Max.charging current	60A	80A	100A
Self Consumption	2W	2W	2W
MPPT Efficiency	99.5%	99.5%	99.5%
Conversion Efficiency	97.5%	97.5%	97.5%
Protection	Overload,short circuit,high voltage,high temperature protection		
Number of independent MPPT trackers	1	1	2
Battery Charging			
Battery Type	AGM, Gel, Flooded,Lithium,User define		

Fuente: (ENFsolar, 2021)

Figura 29. Regulador de carga Spriter Series 60-120, modelo 48V100.



Fuente: (ENFSolar, 2021) [50]

Discusión de los resultados:

Las embarcaciones eléctricas se encuentra en crecimiento, por ello, muchas empresas fabricantes de estación de recarga se están poniendo las pilas en la fabricación de nuevos cargadores con mayor potencia, sobre todo, para embarcaciones de gran tamaño. Es así como se encuentran empresas como Leclanché, firma suiza dedicada al almacenamiento de energía, y que ahora ha lanzado al mercado una estación de recarga eléctrica para buques híbridos y eléctricos, haciendo énfasis en una recarga rápida. La estación de recarga consiste en un gran sistema de almacenamiento energético de 3 MWh, ubicado en el puerto de destino. La estación se alimentará de la red eléctrica portuaria a través de un convertidor CC-CC de 1.800 kW de potencia y permite recargas por completo en tan solo 10 minutos [51].

3. COSTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTROMOVILIDAD NÁUTICA

3.1. Proyección – Costeo de la implementación de la estación de carga para el sistema de electromovilidad náutica

En la Tabla 16, se presenta el coste de los componentes más importantes y significativo de la estación de carga y del sistema de electromovilidad. No se incluye el bote dado que se puede reutilizar los existentes. Solo se plantea reemplazar la movilidad con motores de combustión interna por motores eléctricos.

Tabla 16. Costos de la estación de carga y electromovilidad

ITEM	DESCRIPCIÓN	UND	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1.1	Motor Green Flash 42 kW	UN	1	\$87.872.040	\$87.872.040,00
1.2	Batería B-LFP48-200	UN	3	\$11.397.000	\$34.191.000,00
1.3	Cargador batería de Litio KP2000K	UN	3	\$569.850	\$1.709.550,00
1.4	Paneles FV 650W	UN	9	\$800.000	\$7.200.000,00
1.5	Batería Pb ácido Gel 6-GFM-250	UN	12	\$668.648	\$8.023.776,00
1.6	Regulador de carga Spriter Series 60-120, modelo 48V100	UN	1	\$750.000	\$750.000,00
1.7	Suministro e instalación de interruptor termomagnético 1x20A enchufable	UN	2	\$11.581	\$23.162,00
1.8	Suministro e instalación de panel de distribución de 1 Circuitos Monofásico.	UN	1	\$146.991	\$146.991,00
1.10	Estuctura para montaje	UN	1	\$400.000	\$400.000,00
1.11	Conectores y accesorios	UN	10	\$4.000	\$40.000,00
				SUBTOTAL	\$140.356.519,00

ADMINISTRACIÓN 2%	\$2.807.130
IMPREVISTO 1%	\$1.403.565
UTILIDAD 2%	\$2.807.130
IVA SOBRE UTILIDAD	\$26.667.739
TOTAL A PAGAR	\$174.042.084

Fuente: Elaborado por los autores

Aunque actualmente la industria marítima se encuentra en pleno proceso de expansión de aplicaciones de movilidad eléctricas, los costos asociados a la implementación en el medio colombiano son muy elevados.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se identificó el tipo de embarcación empleada en el transporte de pasajeros en la zona insular de Cartagena de Indias y se obtuvieron datos sobre las

características de este tipo de transporte, cómo número de pasajeros, horarios, velocidades de desplazamiento.

- Se realizó una búsqueda de motores eléctricos que pudieran acoplarse al tipo de bote empleado en el transporte de pasajero, se seleccionó el conjunto motor Green Flash 42 kW y batería de litio B-LFP48-200 para la propulsión eléctrica. El banco de batería quedó conformado por tres baterías conectadas en serie para 30 kWh y 144 V /200 AH.
- Se establecieron los requerimientos técnicos y operacionales para la estación de carga a partir de energía fotovoltaica. Se planteó el diseño de la estación de carga con sistema de almacenamiento estacionaria para almacenar 30 kWh a partir de los datos obtenidos de la base de datos PVGIS del aporte de la energía solar del lugar; se determinaron 5,23 HSP, lo que muestra las favorables condiciones para el desarrollo de este tipo de energía.
- La estación de carga diseñada quedó conformada por 9 paneles FV de 650 W, 12 baterías de Litio de 12 V/250 Ah, regulador de carga e inversor/cargador de baterías; todos estos componentes fueron seleccionadas técnica y teniendo en cuenta la disponibilidad de los equipos en el comercio.

Finalmente, se hizo una evaluación de costos asociados a la implementación del proyecto que muestra si el mismo es viable económicamente. Se pudo establecer que el costo de los componentes más importantes está por encima de los \$170.000.000, lo que lo hace inviable, teniendo en cuenta el nivel socioeconómico de los transportadores, por lo que este tipo de proyectos tendrán que ser impulsados por los gobiernos, financiando y subsidiando el uso de este tipo de tecnologías. Sin embargo, se evidencia que el sector de la electromovilidad marítima ha experimentado un enorme crecimiento, permitiendo el acceso a estas tecnologías y a diferentes modelos de propulsión pero sigue estando por fuera del alcance del nivel económico colombiano.

-

1.2 Recomendaciones

- Se recomienda seguir indagando sobre otros tipos de motores eléctricos fuera de borda y de sistemas de almacenamiento de energías estacionarias de menores precios.
- La implementación de la estación de carga requiere de infraestructura física, un lugar de instalación por lo que se hace necesario identificar este lugar para poder cuantificar los costos asociados a las conexiones eléctricas y el acceso de las embarcaciones al requerir recargas. Esto hace que se requiera un tipo de muelle donde se facilite la llegada, el parqueo y la protección de la embarcación durante la jornada de recarga, dado que esta acción quedó contemplada realizarla en horas nocturnas para no interferir con la operación diaria del bote.

-

Bibliografía

- [1] UNIÓN EUROPEA. Comisión Europea: Energía, cambio climático, medio ambiente. Consecuencias del cambio climático (s.f). [En línea]. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_es, recuperado: 07 de septiembre de 2021.
- [2] J. Caballero Martínez. “Los vehículos eléctricos en Colombia: una contribución a la movilidad sostenible”, Universidad Externado de Colombia., Medio Ambiente, Julio 2019. [En línea]. Disponible en: <https://derinformatico.uexternado.edu.co/los-vehiculos-electricos-en-colombia-una-contribucion-a-la-movilidad-sostenible/>, recuperado: 07 de septiembre de 2021.
- [3] Isla, Lorena; Singla, Martín; Rodríguez, Manuel; & Granada, Isabel. Análisis de Tecnología, Industria, y Mercado para Vehículos Eléctricos en América Latina y el Caribe. Washington: Banco Interamericano de Desarrollo. [En línea]. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/analisis-de-tecnologia-industria-y-mercado-para-vehiculos-electricos-en-america-latina-y-el-caribe>. p. 14, recuperado: 07 de septiembre de 2021.
- [4] COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Artículo 2. Ley 1964 de 2019 (11 de julio de 2019). [Por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia y se dictan otras disposiciones].
- [5] CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA. Emisiones de CO2 procedentes de buques: el Consejo acuerda su posición sobre la revisión de las normas de la UE. [En línea]. Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/es/press/press-releases/2019/10/25/co2-emissions-from-ships-council-agrees-its-position-on-a-revision-of-eu-rules/>, recuperado: 07 de septiembre de 2021.
- [6] DW. ¿Son los buques eléctricos el futuro del transporte marítimo?, Marzo 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.dw.com/es/son-los-buques-el-futuro-del-transporte-mar%C3%ADtimo/a-43050817>, recuperado: 07 de septiembre de 2021.
- [7] RUBAN BLEU. Electric boats. [En línea]. Disponible en: <https://www.rubanbleu.com/en/bateau/the-sensas>, recuperado: 07 de septiembre de 2021.
- [8] TORQEEDO. Electric drives for motorboats. [En línea]. Disponible en: <https://www.torqueedo.com/en>, recuperado: 07 de septiembre de 2021.
- [9] P. Salfado. “Electromovilidad y transporte por agua: una alternativa olvidada y sin explotar”, Universidad de los Andes, 2016).
- [10] Aguamarket, “Contaminantes del agua, grasas y aceites”, Aguamarker, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=3039>, recuperado: 12 de septiembre de 2021.
- [11] Cooltra Corporate. “Agentes contaminantes de la gasolina”, Movilidad sostenible, 2016
- [12] Ecoosfera. La contaminación acústica afecta la vida marina. Junio 2016. [En línea]. Disponible en: <https://ecoosfera.com/2016/06/la-contaminacion-acustica-afecta-la-vida-marina/>, recuperado: 12 de septiembre de 2021.

- [13] A. Jaimurzina, D. Montiel D, G. Wilmsmeier. "Eficiencia energética y movilidad eléctrica fluvial: soluciones sostenibles para la Amazonía", Cepal, vol. 353, no. 1, 2017.
- [14] ONU. Objetivos de desarrollo sostenible. Energía – Desarrollo sostenible. Objetivo 7.
- [15] I. Ascencio Medina, S. Católico Castillo, J. Pasqualino., y C. Díaz Mendoza, "Viabilidad de electromovilidad náutica en el distrito de Cartagena-Colombia", Investigación e Innovación en Ingenierías, vol. 7, n°. 2, 2019. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.7.2.3125>.
- [16] UN CEPAL. Unidad mujer y desarrollo. "Género, medio ambiente y sustentabilidad del desarrollo", LC/L.1144.
- [17] Ministerio de Energía de Chile. Plataforma de electromovilidad. [En línea]. Disponible en: <https://energia.gob.cl/electromovilidad/introduccion>, recuperado: 21 de octubre de 2021.
- [18] Eduardoño Náutico. Bote transporte 255. [En línea]. Disponible en: <https://www.eduardono.com/nautico/es/productos-y-servicios/detalles/bote-transporte-255/catpageindex/2>, recuperado: 22 de octubre de 2021.
- [19] Google-Maps (2021)
- [20] <https://www.meteorologiaenred.com/wp-content/uploads/2015/08/radiacion.png> [20]
- [21] https://www.meteorologiaenred.com/wp-content/uploads/2015/08/radiacion_en_tierra.png
- [22] EnergEIA. (2018). *Irradiacion anual media en colombia*. Medellín: El espectador.
- [23] SunFields Europe. Tipos de radiación solar. [En línea]. Disponible en: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/radiacion-solar/>, recuperado: 21 de octubre de 2021.
- [24] Villavicencio Aluma, I. C. & Minotta Marín, L. F. (2017) Diseño de alternativas para la generación de energía eléctrica conectada a la red por medio de energía solar para el edificio Almendros de Universidad Javeriana Cali: sistema fotovoltaico. Pontificia Universidad Javeriana, Cali. [En línea]. Disponible en: <http://vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/8772?locale-attribute=en>, recuperado: 21 de octubre de 2021.
- [25] iluminet. (25 de 10 de 2016). *iluminet.com*. Obtenido de <https://www.iluminet.com/funcionamiento-paneles-fotovoltaicos-energia-solar/>, recuperado: 22 de octubre de 2021.
- [26] Dexen Energy. Celda solar monocristalina. [En línea]. Disponible en: <https://www.dexen.mx/celdas-solares/attachment/celda-solar-mo>, recuperado: 20 de octubre de 2021.
- [27] Henry Louie (2018). *Off-Grid Electrical Systems in Developing Countries*. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91890-7>. Pág. 191, 199.
- [28] Victron Energy. Regulador de carga solar. [En línea]. Disponible en: <https://www.victronenergy.com/es/solar-charge-controllers>, recuperado: 25 de octubre de 2021.
- [29] Enerver. Baterías solares. [En línea], Disponible en: <http://enerverperu.com/baterias>, recuperado: 25 de octubre de 2021.

- [30] Generatuluz. ¿Qué es un inversor de corriente y para qué sirve?. [En línea]. Disponible en: <https://www.generatuluz.com/tu-propia-instalacion-aislada/tipos-de-inversores-de-corriente/que-es-un-inversor-de-corriente/>, recuperado: 28 de octubre de 2021.
- [31] Rivera, R., & Reyes, L. (2018). *Comportamiento energetico de un sistema fotovoltaico autonomo*. Habana: ISMMM.
- [32] ERSOLAR (2019). Los mejores inversores solares 2019. [En línea]. Disponible en: <https://solar.eyr.mx/los-mejores-inversores-solares-2019/>, recuperado: 28 de octubre de 2021.
- [33] García López, Daniel (2015). Estimación y comparación de la resistencia al avance de formas de buques de pesca con pantoque redondeado mediante diferentes métodos numéricos. Universidad Politécnica de Cartagena - Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica. URI: <http://hdl.handle.net/10317/5104>
- [34] Eduardoño Náutico. Especificaciones bote marino 250 D. [En línea]. Disponible en: <https://www.yamahamarino.cr/wp-content/uploads/2019/09/Ficha-Bote-transporte-250D.pdf>), recuperado: 21 de octubre de 2021.
- [35] Torqeedo (2021). Motor BD 25 RL. [En línea]. Disponible en: www.torqeedo.com, recuperado: 21 de octubre de 2021.
- [35] Aquawatt (2021). Motor Green Flash 42. [En línea]. Disponible en: <https://www.aquawatt.at/en/electric-boat-propulsion/electric-outboards>, recuperado: 21 de octubre de 2021.
- [36] e-Throne (2021). Motor EZ fuera de borda. [En línea]. Disponible en: www.ezoutboard.com, recuperado: 21 de octubre de 2021.
- [37] Torqeedo (2021). Motor Torqeedo DB 25 RL. [En línea]. Disponible en: <https://www.nauticexpo.es/prod/torqeedo/product-26660-425899.html>, recuperado: 21 de octubre de 2021.
- [38] TORQEEDO. Deep Blue 25 RL System. [En línea]. Disponible en: <https://www.torqeedo.com/en/products/outboards/deep-blue/deep-blue-25-r/M-3203-00.html>, recuperado: 21 de octubre de 2021.
- [39] Aliexpress (2021). Batería B-LFP48-200. Especificaciones de baterías. [En línea]. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/item/4001183589945.html>, recuperado: 21 de octubre de 2021.
- [40] ENFSolar (2021). Baterías B-LFP48-200. [En línea]. Disponible en: https://www.enfsolar.com/pv/storage-system-datasheet/7490?utm_source=ENF&utm_medium=component_profile&utm_campaign=enquiry_company_directory&utm_content=134960, recuperado: 21 de octubre de 2021.
- [41]. Plataforma de electromovilidad (2021). Sistemas de carga. En línea]. Disponible en: <https://energia.gob.cl/electromovilidad/sistemas-de-carga>, recuperado: 21 de octubre de 2021.
- [42] Alibaba.com (2021). Cargador Car Battery Charger -KP2000K. [En línea]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/144v-high-voltage-charger-48v60a-maintenance-free-battery-sla-vrla-battery-charger-60326807777.html>, recuperado: 31 de octubre de 2021.

-
- [43] Benigar Aotomoción (2021). ¿Cómo cuidar la autonomía del BMW i3 con su batería? En línea]. Disponible en: <https://benigarautomocion.com/noticias/bmw-i3-autonomia-bateria/>, recuperado: 21 de octubre de 2021.
- [44] PVGIS (2021). Sistema de Información Geográfica Fotovoltaica (PVGIS). [En línea]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>, recuperado: 21 de octubre de 2021.
- [45] MySolar (2021). Especificaciones técnicas Panel modelo MS650PM6-S6. [En línea]. Disponible en: <https://www.mamibot.com/mysolar>, recuperado: 25 de octubre de 2021.
- [46] ENF SOLAR (2021). Batería de LifePO4 (LFP48-200). [En línea]. Disponible en: <https://es.ensolar.com/pv/storage-system-datasheet/6614>, recuperado: 25 de octubre de 2021.
- [47] ENF SOLAR (2021). Batería Pb ácido Gel (6-GFM-250). [En línea]. Disponible en: https://es.ensolar.com/pv/storage-system-datasheet/6690?utm_source=ENF&utm_medium=component_profile&utm_campaign=enquiry_company_directory&utm_content=129128, recuperado: 25 de octubre de 2021.
- [48] ENF SOLAR (2021). Batería Tubular Gel (2V600AH). [En línea]. Disponible en: https://es.ensolar.com/pv/storage-system-datasheet/6750?utm_source=ENF&utm_medium=component_profile&utm_campaign=enquiry_company_directory&utm_content=129128, recuperado: 25 de octubre de 2021.
- [49] www.shuangdeng.com (2021). Batería de Pb ácido Gel 6-GFM-250 12V/250AH. En línea]. Disponible en: [http://www.shuangdeng.com.cn/userfiles/4cd5d807dc514b838f58401c8f3a3e9f/files/6-GFM%E8%8B%B1/6-GFM-250\(shoto\)%20.pdf](http://www.shuangdeng.com.cn/userfiles/4cd5d807dc514b838f58401c8f3a3e9f/files/6-GFM%E8%8B%B1/6-GFM-250(shoto)%20.pdf), recuperado: 25 de octubre de 2021.
- [50] ENFSolar (2021). Regulador de carga Spriter series 60-120, modelo Spriter 48V100
- [51] Híbridos y eléctricos. El nuevo cargador de Leclanché puede recargar un barco eléctrico en 10 minutos. [En línea]. Disponible en: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/leclanche-presenta-nuevos-cargadores-barcos-electricos/20210924173046049581.html>, recuperado: 21 de octubre de 2021.