



**Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura
Carrera de Ingeniería Marítima**

**Trabajo de titulación
Modalidad Proyecto de Investigación**

**Línea de investigación 7: Ingeniería, Industria, Construcción, Urbanismo y
Arquitectura para un desarrollo sustentable y sostenible**

**EVALUACIÓN DEL USO DE ENERGÍAS RENOVABLES EN
EMBARCACIONES PEQUEÑAS: PANELES SOLARES Y SISTEMAS
HÍBRIDOS**

Autor:

Palma Anchundia Roberth Xavier

Tutor: Ing. Guillén García Xavier Enrique

Manta – Ecuador

Periodo - 2025 (2)

DECLARACIÓN DE AUTORIA

Yo, Palma Anchundia Roberth Xavier, con cédula de identificación N° 131645944-3, por medio de la presente se expresa que, este trabajo posee un contenido inédito de carácter original y demuestra resultados sobre una revisión documental, examinación y análisis por parte del autor de trabajo relacionado con respecto al tema planteado.

Así también, se declara que, la información general en este proyecto investigativo no ha sido plagiada, ultrajada, manipulada, ni distorsionada de fuentes literarias o trabajos académico anteriores. Los argumentos de este documento son únicos, diferenciándose de los que ya se ha publicado y demostrando fidelidad y congruencia con las fuentes consultadas a través de las respectivas citaciones autorales bajo el formato APA 7ma edición.

Por lo tanto, como autor de este proyecto investigativo, se afirma la propiedad intelectual del presente documento, basado en una recopilación de la intervención investigativa y de publicaciones autorales que anteceden al presente proceso de titulación

Lo certifico


Ing. Guillen García Xavier Enrique
Docente Tutor



Palma Anchundia Roberth Xavier
Autor

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ingeniería Marítima de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido y revisado el trabajo de titulación, bajo la autoría del estudiante Palma Anchundia Roberth Xavier, legalmente matriculado en la carrera de Ingeniería Marítima, período académico 2025-2 cumpliendo el total de 400 horas, bajo la opción de titulación de proyecto investigativo, cuyo tema de la investigación es “Evaluación del uso de Energías Renovables en embarcaciones pequeñas: paneles solares y sistemas híbridos”.

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académico, científico y formales, suficientes para ser sometido a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 30 de enero del 2026

Lo certifico


Ing. Guillen García Xavier Enrique
Docente Tutor

DEDICATORIA

Dedico esta tesis, en primer lugar, a Dios por ser mi guía constante y darme la fortaleza necesaria para perseverar en cada etapa de mis estudios.

A mi padre, por su amor incondicional, sus consejos sabios y el apoyo que me brinda constante, sus enseñanzas y su ejemplo de perseverancia.

A mi madre, que hoy no está físicamente conmigo, pero cuya memoria vive en mi corazón, siendo mi inspiración y una gran fortaleza en cada paso de este camino de formación personal y académico.

A mi hija, mi mayor bendición y mi gran motor, quien con su sola existencia me inspira a superarme cada día, y a luchar por un mejor futuro lleno de esperanza.

A mi tutor de tesis, por su orientación, paciencia y profesionalismo, cuyo acompañamiento fue clave para culminar este trabajo.

A mi amada esposa, por ser mi apoyo incondicional en cada paso de este camino; Por tu paciencia infinita en los días difíciles y tu fe constante cuando yo dudaba.

Tu amor fue refugio en el cansancio y fortaleza en los momentos de desvelo.

Gracias por creer en mí incluso en silencio, por sacrificar tiempo y sueño.

Este logro también es tuyo, porque sin ti, nada de esto habría sido posible.

A todos ellos dedico este logro, como reflejo de esfuerzo, fe y constancia, que hoy se materializa en la culminación de esta investigación.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por brindarme la sabiduría, la fortaleza y la perseverancia necesarias para culminar este trabajo.

A mi padre, por su apoyo incondicional, sus consejos y su constante motivación.

A la memoria de mi madre, quien desde el cielo fue una fuente de inspiración y fortaleza en cada etapa de este proceso académico.

A mi hija por ser mi mayor motivo de superación y la razón principal para no rendirme.

Agradezco de manera especial a mi esposa, por su amor incondicional, paciencia y comprensión durante todo este proceso.

Por acompañarme en los momentos de cansancio y desvelo, y por brindarme animo cuando las fuerzas parecían agotarse.

Tu sacrificio, compromiso y fortaleza fueron fundamentales para alcanzar esta meta académica.

Este logro también te pertenece, porque fue construido con tu amor y apoyo inquebrantable.

A mi tutor de tesis, por su guía, paciencia y valiosos aportes durante el desarrollo de la investigación.

A los docentes de la institución, por compartir sus conocimientos y experiencias.

Finalmente, a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron a este logro.

INDICE GENERAL DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE AUTORIA.....	i
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
INDICE GENERAL DE CONTENIDOS	v
INDICE DE TABLAS	viii
INDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT.....	xi
ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....	1
PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN	3
JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	5
OBJETIVOS	7
Objetivo general.....	7
Objetivos específicos	7
CAPÍTULO I: METODOLOGÍA.....	8
1.1 Tipo y enfoque de investigación	8
1.2 Proceso de selección y evaluación de la literatura científica	8
1.3 Métodos de análisis documental y bibliográfico.....	9
1.4 Técnicas e instrumentos de recolección de información.....	9
1.5 Procedimiento metodológico.....	10
1.6 Criterios de inclusión y exclusión de fuentes.....	11
1.6.1 Criterios de inclusión	11
1.6.2 Criterios de exclusión	11
1.7 Limitaciones del estudio.....	12
CAPÍTULO II: EMBARCACIONES DE PASEO Y RECREACIÓN	13
2.1 Yate	13
2.1.1 Características de la embarcación y pasajero.....	13
2.1.2 Tipos de yates	15
2.1.3 Equipo para la Implementación de Energía Renovable y Espacio de Instalación en yates	18
2.2 Motor marino de combustión interna.....	18
2.3 Energía renovable y convencional	19
2.4 Energías renovables y su aplicación en el sector naval.....	20

○ Tipos de energía no renovable en embarcaciones.....	21
2.5 Paneles solares fotovoltaicos: tipos, eficiencia y funcionamiento en entornos marinos	23
2.6 Sistemas híbridos (solar-diésel y solar-batería) aplicados a embarcaciones.....	24
2.7 Reseña de uso de energía renovable en embarcaciones de recreación.....	26
2.8 Proyectos de transporte turístico con uso de energía.....	29
2.9 Ventajas y limitaciones técnicas del uso de energías renovables en embarcaciones.....	31
2.10 Sostenibilidad, eficiencia energética y reducción de emisiones en navegación recreativa.....	33
2.11 Reseña de investigación de energía renovable en Ecuador.....	34
CAPÍTULO III: SELECCIÓN DE EMBARCACION PARA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	36
3.1 Diseño general del catamarán híbrido solar-eléctrico.....	36
3.1.1 Manga (beam) del catamarán.....	36
3.1.2 Quilla y apéndices de equilibrio.....	37
3.1.3 Partes principales de un catamarán y sus características.....	38
3.1.4 Características operativas y rendimiento.....	38
3.1.5 Desplazamiento y peso total.....	39
3.1.6 Parámetros para la selección de la embarcación.....	39
CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL PROYECTO	41
4.1 Áreas útiles para la instalación de paneles solares.....	41
4.2 Paneles solares aplicables en catamaranes.....	44
4.3 Componentes principales del sistema solar fotovoltaico a bordo.....	44
4.3.1 Estimación de la demanda energética diaria del sistema.....	49
4.4 Equipos complementarios: baterías, inversores, controladores y cableado.....	51
4.4.1 Baterías (Banco de acumuladores).....	51
4.4.2 Reguladores de carga (Controladores solares).....	53
4.4.3 Inversor (Convertidor DC-AC).....	55
4.4.4 Cableado, conectores y protecciones.....	56
4.5 Ubicación de paneles y distribución del cableado eléctrico en el catamarán.....	57
4.6 Tipos de estructura para montaje de paneles solares en catamaranes.....	62
4.7 Planos de disposición de paneles solares y equipamientos.....	65
4.8 Presupuesto estimado para la implementación completa del sistema.....	69
4.9 Análisis financiero del proyecto: Cálculo de TIR y VAN.....	70
CONCLUSIÓN	77
RECOMENDACIONES	81

BIBLIOGRAFÍA 83

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Características principales de los diferentes tipos de yates</i>	16
Tabla 2 <i>Comparativa de tecnologías de paneles fotovoltaicos para ambiente marino</i>	24
Tabla 3 <i>Partes del catamarán y sus características</i>	38
Tabla 4 <i>Desplazamiento y peso total</i>	39
Tabla 5 <i>Estimación de consumo eléctrico diario</i>	50
Tabla 6 <i>Presupuesto estimado</i>	70
Tabla 7 <i>Datos para escenario</i>	74
Tabla 8 <i>Escenarios</i>	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Catamarán WWF solar</i>	26
Figura 2 <i>Barco Lasai</i>	27
Figura 3 <i>Lancha Mónaco</i>	27
Figura 4 <i>MS Tûranor PlanetSolar</i>	28
Figura 5 <i>Lancha “Solaris”</i>	29
Figura 6 <i>Lancha Kara Solar</i>	31
Figura 7 <i>Vista superior del catamarán con disposición de paneles</i>	65
Figura 8 <i>Esquema unifilar del sistema eléctrico solar</i>	67
Figura 9 <i>Detalle de montaje mecánico de panel (sección)</i>	68
Figura 10 <i>Distribución de equipos en el interior</i>	69

RESUMEN

La investigación toma como referencia experiencias previas como Kara Solar y un catamarán solar en Galápagos donde destacan los sistemas fotovoltaicos para conseguir una reducción del ruido y las emisiones. La finalidad general es determinar la viabilidad de los paneles solares y los sistemas híbridos como nuevas soluciones energéticas para yates. La metodología empleada es documental y cualitativa, basada en revisión de literatura especializada y análisis técnico comparativo. El diseño contempla una instalación de 5,28 kWp de paneles solares y 27 kWh en baterías LiFePO₄ en un catamarán de 15 m. El sistema puede cubrir gran parte de la demanda eléctrica a bordo y reducir entre 80–90 % el uso del generador en fondeo, evitando aproximadamente 770–860 litros de diésel al año (2 toneladas de CO₂). No obstante, con el precio actual del diésel en Ecuador (USD 2,70/galón), el análisis financiero a 10 años arroja un VAN negativo y una TIR inferior a la tasa de descuento, lo que limita su rentabilidad en uso privado moderado. El sistema es técnicamente viable y ambientalmente favorable, mejora la autonomía y reduce emisiones y ruido, aunque su rentabilidad depende del perfil de uso, del horizonte de evaluación y de la evolución futura del precio del combustible. Se detecta un vacío en la bibliografía ecuatoriana sobre yates de recreo; la investigación llena ese hueco y aporta lineamientos para proyectos futuros en Ecuador.

Palabras clave: energía renovable, yate, panel solar, sistema híbrido, catamarán, viabilidad, reducción de emisiones.

ABSTRACT

This research draws on previous experiences such as Kara Solar and a solar catamaran in the Galápagos Islands, where photovoltaic systems have been instrumental in reducing noise and emissions. The overall aim is to determine the viability of solar panels and hybrid systems as new energy solutions for yachts. The methodology employed is documentary and qualitative, based on a review of specialized literature and comparative technical analysis. The design envisions a 5.28 kWp solar panel installation and 27 kWh of LiFePO₄ batteries on a 15-meter catamaran. The system can cover a significant portion of the onboard electrical demand and reduce generator usage at anchor by 80–90%, saving approximately 770–860 liters of diesel per year (2 tons of CO₂). However, with the current price of diesel in Ecuador (USD 2.70/gallon), the 10-year financial analysis yields a negative NPV and an IRR lower than the discount rate, limiting its profitability for moderate private use. The system is technically feasible and environmentally friendly, improving range and reducing emissions and noise, although its profitability depends on the usage profile, the evaluation horizon, and future fuel price trends. A gap has been identified in Ecuadorian literature on recreational yachts; this research fills that gap and provides guidelines for future projects in Ecuador.

Keywords: renewable energy, yacht, solar panel, hybrid system, catamaran, viability, emissions reduction.

ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

Históricamente, el transporte marítimo liviano ha estado vinculado a motores de combustión interna, por lo que tanto la contaminación acústica como el cambio climático se han visto incrementados a causa de este medio de transporte (Cassauwers, 2024). La industria del ocio náutico, en cambio, ha empezado a experimentar con energías renovables como alternativas, ya que la construcción de yates requiere de energía constante y con ello, la sostenibilidad implementada requiere de una importante vertiente, la eficiencia energética, que incide directamente en la autonomía y en los costos operativos (García et al., 2025).

Hasta la fecha, han sido diversos los países que han llevado a cabo proyectos pioneros en este ámbito. En Europa, los primeros ferries solares, así como catamaranes híbridos como el Sun21, que realizó una travesía transatlántica válidamente equipados exclusivamente con energía solar procedente del sol (López, 2025). Tal evento demuestra que los paneles fotovoltaicos marinos son capaces de obtener entre 4 a 6 KWh/día por cada kW instalado, una cantidad suficiente para abastecer los servicios auxiliares y en combinación con baterías de iones de litio de altas prestaciones, pueden permitir periodos de fondeado y anclado sin necesidad de encender generadores diésel. Las embarcaciones de ocio, no obstante, deben lidiar con la reducción del espacio útil para la instalación de paneles solares, la necesidad de mantener la estética de la embarcación y consumir poco peso y coste de instalación (Olcina Lloret, 2022). Una necesidad de compromiso son los sistemas híbridos (panel solar + diésel/batería), donde combinamos la fiabilidad del diésel, mientras acompañado con la limpieza que nos ofrece el sol.

En Ecuador se encuentran antecedentes concretos al respecto. El proyecto Kara Solar introdujo lanchas de energía solar en la cuenca amazónica, conectando comunidades indígenas, y sustituyendo a los motores de diésel. En las Islas Galápagos, un catamarán solar inaugurado en

2015, para 42 personas, fue financiado por encima de los 650 000 USD y se evidenció así el interés del país por el transporte acuático sostenible (Romito, 2015). Sin embargo, los proyectos estaban vinculados al transporte comunitario o institucional, no existen estudios que lleven a cabo el análisis técnicos de viabilidad de energías renovables en yates de recreo que requieren potencias superiores, acabados de lujo y periodos de fondeo largos (Romito, 2015).

Los paneles solares aportan una reducción del consumo entre el 40 % y el 60 % y aportan a la reducción de las emisiones de CO₂. (Organización Marítima Internacional , 2020). En términos generales a nivel mundial las experiencias exitosas tienden a combinar sistemas modulares, a usar baterías de alta densidad (LiFePO₄) y a planificar la carga energética en función de la disponibilidad de sol. Existen trabajos en los que se enfatizan la necesidad de combinar paneles con hidrogeneradores o turbinas en vientos, para suplir la demanda durante la nubosidad o durante travesías largas. También se considera en que la gestión energética y el mantenimiento (limpieza de paneles, monitorización de baterías), son fundamentales para la producción generada. (Soel Yachts, 2023; Zuraiz et al., 2025).

Con base lo anterior, el punto de partida demuestra un interés creciente en la electrificación de yates por medio de energías renovables, pero esta solución sólo se encuentra en proyectos pilotos o en la parte comercial. La tesis trata de llenar este vacío, a partir del estudio de la viabilidad técnica y económica de la implantación de un sistema solar e híbrido en un yate a motor de recreo, adaptado al contexto ecuatoriano, para ofrecer una alternativa a la tradicional electrificación.

PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

El transporte marítimo y fluvial representa aproximadamente el 3% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, y aunque en embarcaciones pequeñas como los yates el impacto individual puede parecer bajo, su uso frecuente y prolongado en actividades recreativas y turísticas genera un consumo acumulado significativo de combustibles fósiles y emisiones contaminantes (Organización Marítima Internacional, 2020). Esta situación es particularmente relevante en países costeros como Ecuador, donde existe un creciente uso de yates en zonas como Salinas, Manta y Galápagos.

La integración de energía solar en embarcaciones pequeñas, considerando en especial la utilización de paneles fotovoltaicos y sistemas híbridos solar-diésel o solar-batería, ha mostrado ser capaz de reducir los costos de operación en un 60%, disminuir las emisiones de CO₂ y mejorar la autonomía (IRENA, 2021).

Ecuador, existen ejemplos de experiencias piloto exitosas; por ejemplo en una comunidad amazónica en el marco de Kara Solar se introdujeron embarcaciones solares que conectarían comunidades de los pueblos indígenas, reemplazando lanchas a diésel y generando una reducción en el ruido y la contaminación de agua (Guamán & Ordóñez, 2017). En Galápagos por su parte se ha creado, dentro del proyecto "Cero combustibles fósiles", un catamarán solar que tiene una capacidad de 42 personas, iniciativa esta que ha contado con un financiamiento de más de 650 mil dólares, lo que muestra el interés del Ecuador por promover formas sostenibles de transporte acuático (SENESCYT, 2015).

Estos trabajos, sin embargo, sólo se han centrado en el caso del transporte comunitario o institucional, y por ello no se ha parapetado una cantidad suficiente de investigación para evaluar

la viabilidad del uso de energías renovables en yates de recreo, que habida cuenta presentan características distintas como es el caso de la potencia exigida, el diseño de lujo y la necesidad de autonomía y de tiempos de fondeo largos. Así, también se supera una disposición de estudios teóricos muy escasa en el caso del contexto ecuatoriano que evalúe de forma integral los beneficios, limitaciones técnicas y costes de implementación de paneles solares y de sistemas híbridos en el yate.

Con base en lo anterior, se presenta la necesidad de establecer una evaluación teórica bibliográfica de actualidad, que evalúe la viabilidad energética, económica y operativa de las distintas tecnologías aplicadas a los yates, se hace evidente, una evaluación que no sólo tiene en cuenta lo nacional, sino también lo internacional. A partir de la información generada se formula la siguiente pregunta: ¿Qué viabilidad tiene la utilización de paneles solares y sistemas híbridos como alternativa energética sostenible en el uso de yates?

JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La justificación del presente estudio radica en su carácter tanto teórico como práctico, y en el marco de un mundo que reclama transiciones energéticas más sostenibles incluso en sectores tan dependientes de los combustibles fósiles como el del transporte marítimo. En el caso concreto de las embarcaciones pequeñas como los yates, las mismas representan un subsegmento significativo para implementar tecnologías limpias como consecuencia de la frecuencia de uso de las embarcaciones pequeñas en actividades recreativas, turísticas o de proximidad, puesto que las mismas poseen un alto consumo energético el cual puede ser sustituido por un uso constante de fuentes de energía renovables.

Teóricamente, el presente proyecto contribuirá a la acumulación de conocimiento sobre la viabilidad técnica y energética a partir de los paneles solares fotovoltaicos y los sistemas híbridos (solar-diésel o solar-batería) para embarcaciones pequeñas. La revisión de literatura servirá para amasar información actualizada sobre el funcionamiento, la eficiencia, la capacidad de almacenamiento y las limitaciones y ventajas de estas tecnologías bajo el contexto marino, lo que a su vez favorece el surgimiento de nuevas líneas de investigación en el contexto del diseño naval sostenible y la ingeniería ambiental. Igualmente, el estudio colabora en la construcción de marcos teóricos sobre eficiencia energética, energías renovables marinas y la gestión de recursos en contextos flotantes, integrando aproximaciones hacia la sustentabilidad y la resiliencia energética.

En relación a su importancia práctica, este proyecto nos permite comprobar la viabilidad de tecnologías limpias aplicadas a un yate, la cual sería una alternativa viable a reducir el consumo de combustibles fósiles, a disminuir las emisiones contaminantes, a aminorar la dependencia energética en costas y a fomentar la autonomía energética en alta mar. Esta revisión

bibliográfica podría ser el primer paso a la implementación futura de sistemas solares o híbridos aplicados a yates de recreo o embarcaciones de pesca artesanal, lo cual debe resultar de extrema importancia en zonas insulares o costeras donde el acceso a combustibles pueda ser difícil o muy costoso.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la viabilidad del uso de paneles solares y sistemas híbridos como soluciones energéticas sostenibles en yates.

Objetivos específicos

- Diseñar y dimensionar un sistema fotovoltaico híbrido (técnicamente viable para su integración en un catamarán de 15 m, garantizando seguridad, estabilidad y cumplimiento de estándares marítimos.
- Evaluar el rendimiento energético y el impacto ambiental del sistema, cuantificando la reducción del uso del generador diésel, el ahorro anual de combustible y la disminución de emisiones de CO₂ en condiciones reales de operación.
- Analizar la viabilidad económica del sistema solar propuesto, considerando ahorro en combustible, horizonte de evaluación y condiciones del mercado energético ecuatoriano, para determinar su rentabilidad en uso recreativo.

CAPÍTULO I: METODOLOGÍA

1.1 Tipo y enfoque de investigación

La investigación se enmarca como un estudio documental o bibliográfico centrado en la recolección y análisis crítico de información existente en fuentes especializadas. Según Cotrina (2025) y Hernández-Sampieri (2017) este enfoque supone un proceso sistemático de recopilación, organización y análisis de documentos y fuentes de información con el fin de establecer el estado del conocimiento sobre un determinado tema. De esta manera, el proyecto adopta un enfoque cualitativo-descriptivo no experimental, pues no manipula variables directamente sino que interpreta la viabilidad de sistemas de energía renovable en yates a partir de la literatura disponible.

1.2 Proceso de selección y evaluación de la literatura científica

La revisión bibliográfica siguió un proceso estructurado de búsqueda y filtrado. Inicialmente se realizó una exploración amplia mediante buscadores generales (por ejemplo, Google Académico) y catálogos de bibliotecas universitarias, para luego focalizar en bases de datos especializadas en ingeniería, energía y navegación (como Scopus, IEEE Xplore o SciELO). Se emplearon descriptores en español e inglés relacionados con energía solar, sistemas híbridos y navegación marítima (por ejemplo: *yate solar*, *energía renovable barcos*, *paneles fotovoltaicos embarcaciones*). Cada fuente potencial fue evaluada mediante la lectura de títulos y resúmenes para verificar su pertinencia con el tema.

Adicionalmente, se consideró la relevancia académica de las publicaciones (artículos arbitrados, libros científicos, tesis) y la credibilidad de los autores e instituciones. Este proceso de evaluación permitió filtrar la literatura más significativa y actual, así como detectar vacíos en la investigación existente. Así, se garantizó que el análisis abarque las tendencias y desarrollos

recientes en energías renovables aplicadas a embarcaciones, en contextos comparables al ecuatoriano.

1.3 Métodos de análisis documental y bibliográfico

Para el tratamiento de la información recopilada se empleó análisis documental o análisis bibliográfico como método principal. Este método consiste en una revisión exhaustiva y crítica de los documentos seleccionados, examinando su contenido y sus aportes al tema de estudio. De acuerdo con Cotrina (2025) el análisis documental tiene como propósito realizar un análisis exhaustivo y crítico de diferentes documentos con relevancia para el tema de estudio. En concreto, se contrastaron las ideas clave de diferentes autores, se compararon marcos teóricos y se clasificó la información en categorías temáticas.

Complementariamente, se aplicó análisis de contenido para identificar patrones recurrentes en los textos, como beneficios técnicos (por ejemplo, rendimiento de los paneles) y limitaciones (peso adicional, costo), mediante la elaboración de matrices de síntesis. Este enfoque mixto de revisión y síntesis crítica permite extraer conclusiones fundamentadas sobre la viabilidad de sistemas solares e híbridos en yates.

1.4 Técnicas e instrumentos de recolección de información

La recolección de datos bibliográficos acude a estrategias de recuperación documental en soporte impreso y digital y se utilizaron fichas de recolección de datos como instrumento principal para ordenar la información más significativa de cada fuente. En las fichas bibliográficas se registraron los datos más relevantes de cada documento (autor, título, fuente, año) y en las fichas de contenido se registraron las ideas fundamentales las descripciones más relevantes y las citas textuales más importantes.

Del mismo modo se trabajó con gestores de referencias electrónicas (por ejemplo Zotero o Mendeley) para clasificar las fuentes y evitar la duplicidad de las fuentes. La adecuación de estas aplicaciones permite ordenar de una manera exhaustiva la bibliografía y encontrarlas rápidamente durante las fases de la lectura en la fase de la fase de análisis de los textos.

Igualmente se emplearon bases de datos online y catálogos de bibliografía universitaria como herramientas de búsqueda configurando filtros por temática y por año de edición a fin de mejorar la exhaustividad de la búsqueda en el criterio de selección.

La sistematización rigurosa de estas estrategias y la mancomunidad del uso de los instrumentos empleados aseguraron una buena descripción ordenada y fiable de los antecedentes que se habían consultado.

1.5 Procedimiento metodológico

El procedimiento metodológico siguió una serie de pasos -específicos de la investigación documental- adecuados a la entidad del caso de estudio. Tras definir adecuadamente el tema general (energías renovables en los yates), se establecieron los objetivos de la investigación. La búsqueda de documentos documentales siguió, por tanto, la identificación de las principales palabras claves y términos de búsqueda relacionados. A partir de esta información aparecieron los documentos iniciales por búsqueda inicial exploratoria de Google Scholar, y posteriormente por búsqueda en bases de datos y repositorios institucionales más específicos.

Los documentos obtenidos fueron posteriormente sometidos a un primer cribado (por su título y por el resumen) con el objetivo de eliminar los documentos no pertinentes.

Posteriormente se establecieron criterios de inclusión y de exclusión de los documentos para determinar los estudios finales (ver más adelante). A los documentos elegidos se les dio lectura completa, registrándose datos relevantes en las correspondientes fichas de trabajo. La

información extraída fue tratada mediante matrices temáticas que facilitaron el análisis comparado entre todos los estudios. Para finalizar se llevó a cabo la síntesis crítica de todos los resultados y todo el conocimiento integrado para responder las preguntas que guiarían nuestra investigación.

1.6 Criterios de inclusión y exclusión de fuentes

Con la finalidad de asegurar que el material revisado posea la necesaria relevancia, a la hora de seleccionar el material revisado se establecieron criterios severos de inclusión en la siguiente forma.

1.6.1 Criterios de inclusión

- Artículos enfocados en el uso de paneles solares o sistemas híbridos aplicados a las embarcaciones de recreo o a los yates.
- Artículos basados en experiencias o estudios de caso implementados en zonas tropicales, insulares o costeras, preferiblemente localizadas en el extenso ámbito de los países latinoamericanos y de contextos similares a los de Ecuador.
- Artículos publicados entre 2013-2024 para poder contar con información actual.
- Artículos escritos en español o inglés, pertenecientes a fuentes de acceso abierto o institucional.
- Artículos que incorporen variables tales como eficiencia energética, autonomía, costes, sostenibilidad, impactos ambientales o viabilidad técnica.

1.6.2 Criterios de exclusión

- Artículos que aborden exclusivamente los barcos industriales, y/o los buques de gran dimensionalidad que no son ni pueden ser comparables a embarcaciones pequeñas o a yates.

- Artículos cuya fecha esté completamente pasada (anteriores a 2013), cuya información sea errónea y cuya información no esté basada en hipótesis técnica.
- Artículos que sean fuentes no fidedignas: blogs, artículos de opinión, documentos no revisados científicamente.
- Artículos cuya finalidad principal no esté relacionada con el análisis técnico o energético de embarcaciones.

1.7 Limitaciones del estudio

Este estudio presenta limitaciones inherentes al enfoque documental. En primer lugar, al no realizarse mediciones de campo ni experimentos, los hallazgos dependen exclusivamente de la calidad y disponibilidad de la literatura existente. Es posible que ciertos datos locales (por ejemplo, estudios específicos sobre zonas costeras ecuatorianas o normativas nacionales) no estén cubiertos en la bibliografía internacional consultada.

También se reconoce un posible sesgo lingüístico: la prioridad a fuentes en español e inglés podría dejar de lado investigaciones en otros idiomas relevantes en contextos similares. Por último, las diferencias tecnológicas y regulatorias entre regiones pueden limitar la aplicabilidad directa de los resultados ajenos al contexto ecuatoriano. Estas limitaciones fueron consideradas al interpretar los datos: se enfatizó la búsqueda amplia y crítica de fuentes confiables, consciente de que los resultados constituyen una aproximación basada en evidencia documental que aporta perspectivas sólidas para el estudio, aunque sin reemplazar futuros análisis empíricos en el área.

CAPÍTULO II: EMBARCACIONES DE PASEO Y RECREACIÓN

Las embarcaciones de paseo y recreación son naves diseñadas para el ocio, el esparcimiento y actividades deportivas en el agua, con esloras generalmente entre 2.5 y 24 metros, y no deben transportar más de 12 pasajeros (sin contar tripulación) Incluyen una amplia variedad de tipos como lanchas (para deportes acuáticos), yates, veleros, catamaranes, motos de agua y kayaks, permitiendo actividades como pesca, buceo, esquí acuático, exploración o simplemente relajación en calas y zonas costeras (BID, 2024).

2.1 Yate

El yate es un tipo de vehículo marítimo considerado como buque o embarcación de recreo, el cual cuenta con independencia en su medio de propulsión, además de un casco con unas medidas específicas (Mateo, 2018). Básicamente, un yate se utiliza para diversos fines: para el ocio, deportes acuáticos o con fines lucrativos. Todo dependerá del uso que desee darle el dueño del mismo (Mateo, 2018). Hoy en día se pueden encontrar diversos tipos de yates y cada uno de ellos cuenta con características propias para adaptarse a una necesidad.

2.1.1 Características de la embarcación y pasajero

La capacidad de un yate se expresa principalmente en términos de tonelaje de arqueado bruto (TRB) y de número de pasajeros. El TRB mide el volumen interno total de la embarcación (casco y superestructura) y se emplea para determinar su desplazamiento y carga máxima (Arze Moreno, 1977). Este tonelaje volumétrico refleja la capacidad de alojamiento de tripulación, pasajeros y equipamiento técnico a bordo. Adicionalmente, la capacidad de pasajeros indica cuántas personas puede transportar el yate de manera segura. En la práctica de la náutica recreativa, la regulación internacional suele limitar a 12 el número de personas a bordo (excluyendo o incluyendo cierto número de tripulantes, según el caso) (Arze Moreno, 1977).

La restricción de 12 pasajeros obedece a que, al exceder este umbral, la embarcación se considera “buque de pasaje” y debe cumplir con normativas mucho más exigentes. Por ejemplo, la legislación marítima española establece un máximo de 12 ocupantes (incluyendo al patrón) en yates de recreo, incluso si el espacio físico podría albergar a más personas (Olcina Lloret, 2022).

En consecuencia, muchos yates operan regularmente con ese número legal máximo. Además de la regulación, la distribución de pasajeros influye en la estabilidad y el consumo de combustible de la embarcación. Una carga mal distribuida puede afectar negativamente la eficiencia operativa y la seguridad, lo cual es especialmente relevante al integrar sistemas eléctricos o renovables a bordo.

- **Eslora**

La eslora total de una embarcación es la distancia entre la proa y la popa, medida al nivel del casco. Este parámetro es determinante en el comportamiento hidrodinámico del yate: una mayor longitud de línea de flotación permite alcanzar velocidades superiores bajo el mismo desplazamiento (aproximadamente la velocidad teórica crece con la raíz cuadrada de la eslora) (Trujillo Acosta, 2018).

En la práctica, los yates de eslora mayor suelen proporcionar mayor confort en navegación (olas más largas y manejo más suave), aunque a cambio requieren mayor potencia de propulsión y consumo energético. Por ello, la eslora influye directamente en el diseño y en la eficiencia operativa de la embarcación.

Asimismo, la eslora define categorías normativas y operativas de los yates. Por convención se considera que una embarcación de recreo debe tener al menos unos 10 metros de eslora para disponer de cabina y cumplir ciertos estándares básicos. Al superar los 24 metros, los yates entran en la categoría de “grandes yates” o comerciales, lo cual implica requisitos adicionales (p. ej.

tripulación profesional, más equipos de seguridad) (Trujillo Acosta, 2018). En Ecuador las autoridades marítimas siguen criterios similares basados en los reglamentos internacionales: un yate de mayor eslora deberá registrar su matrícula especial, y es necesaria mayor formación de la tripulación y equipamiento (tal como se señala en la normativa nacional para yates de hasta 100 TRB) (Romito, 2015).

2.1.2 Tipos de yates

La clasificación de los yates puede llevarse a cabo de forma aproximada de la siguiente forma. Según el tipo de propulsión, son diferentes los yates a motor y los yates a vela. De igual modo, los yates a motor se subdividen en dos tipos, a saber: por un lado, los cruceros (embarcaciones que priorizan el confort y el espacio interior, y suelen ser embarcaciones de lujo), y por el otro, los de proa abierta (embarcaciones que cuentan con una amplia plataforma de baño y un motor potente, lo que busca velocidad); existirían también los diseñados para pescar, que lo que buscan es diseñar embarcaciones con estabilizadores y la proa reforzada para que así, establezcan una mayor seguridad (Centramar, 2024). Los yates a vela, por su parte, se diferencian (Centramar, 2024).

Respecto a los yates a vela, se diferencian los yates de recreo (que priorizan la comodidad del pasaje y las experiencias de la navegación) y en los motoveleros (que otorgan importancia a la velocidad sin renunciar a la experiencia de la comodidad a partir del motor potente y de las velas); también existirían los cruceros a vela, embarcaciones que tienen gran tamaño para realizar cruceros largos y que presentan muchas confortos, los yates multicasco (como catamaranes y trimaranes) que están formados por dos o más cascos en paralelo, y cuentan también con gran capacidad para alojar pasaje (Centramar, 2024).

Otra de las categorías importantes a los efectos de este estudio es la que tiene en cuenta el tamaño de eslora de la embarcación. Los yates más pequeños (de aproximadamente 10 a 24 m) son embarcaciones rápidas, de alta maniobrabilidad y que se utilizan para excursiones breves (velocidades de 60 km/h). Entre 24 y 40 m se encuentran yates grandes; de tipo chárter, que comprenden más camarotes y tripulación profesional y que pueden alcanzar velocidades de más de 100 km/h, como algunos diseños de yates de carreras. A partir de 40–60 m se habla de superyates, y para esloras por encima de 60 m ya se habla de megayates (Centramar, 2024). Estas categorías riveran la capacidad de carga de los contenidos de la embarcación, mostrando no sólo medidas cuantitativas de la compañía de navegación, sino también de nivel de equipamiento, confort y autonomía, por ejemplo, los megayates pueden tener aeropuertos acuáticos, piscinas, sistemas energéticos avanzados, etc., debiendo ya tener en cuenta la sostenibilidad energética y la gestión de la carga en el mar, serían capacitadores de usar el delantado de la energía más adecuada para sus singularidades de acogida.

La Tabla 1 presente las características principales de los diferentes tipos de yates:

Tabla 1

Características principales de los diferentes tipos de yates

Categoría	Tipo de yate	Características principales	Velocidad / Uso típico	Eslora aproximada	Tipo de casco	Cubierta
Según propulsión	Yate a motor	Utiliza motores como medio principal de propulsión. Diseños enfocados en potencia y velocidad.	Alta velocidad, uso recreativo o deportivo.	10–60+ m	Monocasco	Cerrada o semiabierta
	Yate crucero (motor)	Enfocados en el espacio interior y el confort; lujo y comodidad para viajes largos.	Velocidades altas; ideal para travesías largas y vida a bordo.	15–50 m	Monocasco	Cerrada
	Yate de proa abierta	Plataforma amplia y motores potentes;	Alta velocidad; ideal para	10–30 m	Monocasco	Abierta

		prioridad en velocidad y áreas exteriores.	navegación costera y paseos recreativos.			
	Yate de pesca deportiva	Estabilizadores, proa reforzada, equipados para pescar en mar abierto con mayor seguridad.	Velocidad media; especializado en pesca en alta mar.	12–40 m	Monocasco reforzado	Cerrada con flybridge
	Yate a vela	Propulsado principalmente por velas, aunque puede tener motor auxiliar.	Navegación recreativa, búsqueda de experiencia tradicional.	10–60 m	Monocasco	Cubierta despejada
	Yate de recreo (vela)	Comodidad de pasajeros, navegación placentera.	Velocidad moderada; paseos y turismo náutico.	10–30 m	Monocasco	Abierta o semicerrada
	Motovelero	Vela + motor potente; mezcla de eficiencia, velocidad y confort.	Combina velocidad por motor y navegación por vela.	15–50 m	Monocasco	Cerrada
	Yate de crucero a vela	Gran eslora, largos viajes con muchas comodidades.	Navegación oceánica con alta autonomía.	20–60 m	Monocasco	Cerrada
	Yate multicasco (catamarán/trimarán)	Dos o más cascos paralelos; mayor estabilidad y capacidad de pasajeros.	Ideal para viajes familiares/charters; eficiencia y estabilidad.	12–50 m	Multicasco (2–3 cascos)	Abierta o semiflotante
Según tamaño (eslora)	Yate pequeño (10–24 m)	Embarcaciones ágiles y rápidas para travesías cortas.	~60 km/h; uso diario o de fin de semana.	10–24 m	Monocasco	Abierta o cerrada
	Yate grande (24–40 m)	Más camarotes, tripulación profesional.	Puede superar 100 km/h; viajes largos y confort elevado.	24–40 m	Monocasco	Cerrada
	Superyate (40–60 m)	Alto nivel de lujo, instalaciones avanzadas.	Navegación transoceánica, autonomía alta.	40–60 m	Monocasco	Cerrada multilínea
	Megayate (>60 m)	Máximo lujo: helipuertos, piscinas, sistemas energéticos complejos.	Navegación global; requiere gestión energética y	60+ m	Monocasco	Cubiertas múltiples

2.1.3 Equipo para la Implementación de Energía Renovable y Espacio de Instalación en yates

En los yates modernos se han incorporado equipos específicos para aprovechar fuentes renovables de energía aprovechando el espacio de cubierta. Por ejemplo, los paneles solares fotovoltaicos se instalan sobre las cubiertas, toldos u otras superficies (incluso velas rígidas) para generar electricidad a partir de la luz solar. Estos módulos, que pueden ser rígidos o flexibles de alto rendimiento, abastecen sistemas hoteleros (iluminación, refrigeración, comunicaciones) y pueden alimentar motores eléctricos auxiliares (Zuraiz et al., 2025).

Además, se incorporan dispositivos eólicos compactos. Se desarrollan generadores de viento de baja potencia y soluciones innovadoras –como velas rotatorias Flettner, cometas («kite sails») o pequeños aerogeneradores montados en el casco– para aprovechar el viento durante la navegación.

En el diseño híbrido de este tipo de sistemas (solar-diésel), existen paneles solares o generadores eólicos que se encargan de cubrir las cargas auxiliares y de recargar la batería, y el motor diésel convencional opera en su régimen óptimo para aplicar la energía para la propulsión principal del barco. De esta forma se puede alcanzar una drástica reducción del consumo en combustibles fósiles y una mejora de la eficiencia operativa, no sacrificando la autonomía ni el rendimiento del yate (López, 2025).

2.2 Motor marino de combustión interna.

Los motores marinos de combustión interna (normalmente diésel) son constituyen la fuente principal de propulsión en yates de motor. Un motor marino diésel transforma la energía química de un carburante en energía mecánica para poder mover la hélice del barco (Carjova et al., 2025).

Los motores diésel marinos están diseñados para soportar el duro entorno marino: cuentan con sistemas de refrigeración por agua de mar, lubricación reforzada, y reductores de velocidad, adaptando de esta manera las revoluciones del motor a las de la hélice (Mateo, 2018).

En los yates se tiende a utilizar motores diésel de baja velocidad nominal (pocas revoluciones por minuto) para generar un alto torque que permite mover grandes hélices marinas. Desde hace poco tiempo se han introducido tecnologías avanzadas como la inyección electrónica del combustible que optimiza la combustión y permite reducir las emisiones, así como las nuevas tecnologías que desarrollan sistemas híbridos que combinan motores diésel con motores eléctricos para mejorar la eficiencia (Guamán & Ordóñez, 2017). Aún así, incluso los motores más modernos generan emisiones contaminantes (CO₂, NO_x, partículas), requieren un mantenimiento especializado, por lo que las tendencias actuales nos llevan a la hibridación y a trabajar la integración de energías limpias para reducir el impacto ambiental de la propulsión desde el mar (Centramar, 2024).

2.3 Energía renovable y convencional

La principal diferencia que existe entre energías renovables y convencionales es la fuente en que se asientan las energías y sus propias emisiones. Las fuentes convencionales (diésel, gasolina, gas licuado, etc.): provienen de combustibles fósiles, ofrecen una alta densidad energética y autonomía, pero producen emisiones de CO₂, NO_x y partículas contaminantes en el aire (López, 2025). Las energías renovables (solar, eólica, hidroeléctrica o hidráulica, etc.): producen energía limpia a bordo del yate como por ejemplo la energía solar fotovoltaica y eólica que no producen emisiones gases contaminantes a lo largo de la operación (Olcina Lloret, 2022).

Sin embargo, las renovables tienen desafíos: son intermitentes y requieren equipo adicional (paneles solares, turbinas eólicas, baterías), lo que aumenta el peso y ocupa espacio en la cubierta.

Por lo tanto, el enfoque predominante en la navegación contemporánea es hibridar las fuentes de energía (Cassauwers, 2024) y, de ese modo, los sistemas híbridos asocian a los generadores diésel paneles solares fotovoltaicos, aerogeneradores y acumuladores (Alvarado, 2025).

En este sistema, la energía renovable, además de alimentar las cargas accesorias, permite recargar a los acumuladores, y el motor de combustión trabaja con potencia en sus rangos óptimos, entonces es utilizado cuando se necesita alta potencia para una operación particular (Kasaeian et al., 2025). De este modo, se puede explotar las bondades del uso de energías renovables sin tener que sacrificar la autonomía y la seguridad que representa un sistema convencional (Sharma & Syal, 2021). Esta estrategia híbrida es especialmente atractiva en Ecuador, específicamente, en virtud de la existencia de un recurso solar y eólico abundante, porque permite alinear la operación de los yates con los objetivos nacionales de sostenibilidad energética a través de la reducción de la dependencia de combustibles fósiles importados.

2.4 Energías renovables y su aplicación en el sector naval

La energía es un elemento crucial en nuestra vida cotidiana, actuando como insumo esencial para el progreso social y el desarrollo económico. Es indispensable no solo para sostener nuestras actividades diarias, sino también para los procesos de producción en diversas industrias (Romito, 2015).

El uso y la generación de energía a partir de combustibles fósiles y leña contribuyen a la contaminación ambiental en las tres etapas de desarrollo. Esta contaminación impacta el entorno local, regional y global. Por ejemplo, la combustión de combustibles fósiles y madera libera azufre, óxidos de nitrógeno y gases de efecto invernadero a la atmósfera. Según Cerquera et al., (2021), esto afecta negativamente al medio ambiente en cada uno de estos tres niveles: local, regional y global.

La industria marítima global es una de las principales generadoras de gases de efecto invernadero (CO₂, NO_x, SO₂), por lo que existe una presión regulatoria creciente para reducir sus emisiones y mejorar su eficiencia energética (López, 2025). Organismos internacionales (e.g. IMO, AIE) exigen reducciones drásticas (p.ej. -40% en intensidad de carbono para 2030).

- **Tipos de energía no renovable en embarcaciones**

- **Propulsión eólica avanzada.** Tecnologías como los rotores de Flettner (que aprovechan el efecto Magnus) y las velas rígidas de última generación permiten obtener sustentación con factores de 4–10, muy superiores a los 1.5–2.0 de las velas convencionales (Carjova y otros, 2025). Estudios recientes demuestran que cuatro rotores verticales de ~30 m pueden generar 1.5–3.0 MW de potencia propulsiva en vientos de 10–15 m/s, reduciendo el consumo de combustible entre un 15% y 25% en rutas oceánicas típicas (Cassauwers, 2024). Embarcaciones comerciales (p. ej. el velero “E-Ship 1”) han registrado ahorros del 4%–15% y picos puntuales hasta del 25% gracias a estas velas rotatorias. Otras innovaciones eólicas incluyen cometas (kite sails) y aerogeneradores marinos ligeros integrados en yates.
- **Energía solar fotovoltaica.** El abundante recurso solar en zonas costeras y ecuatoriales convierte a la fotovoltaica (PV) en una solución clave para la navegación limpia (Kasaeian y otros, 2025). Los paneles instalados sobre cubiertas o estructuras auxiliares pueden suministrar energía a sistemas de hotelería y propulsión eléctrica. Estudios señalan que buques portacontenedores de 400 m de eslora disponen de 8.000–12.000 m² para paneles, capaces de generar picos de 1.5–3.0 MWp (2.000–4.000 MWh/año en rutas ecuatoriales). En embarcaciones más pequeñas o yates, se emplean paneles flexibles de alto rendimiento integrados en

toldos o superficies curvas. Ejemplos comerciales incluyen ferrys eléctricos con techos fotovoltaicos y yates totalmente solares (Silent Yachts, 2025).

- **Sistemas híbridos.** Para garantizar suministro constante, muchos buques combinan energía renovable con motores diésel convencionales y/o baterías. Por ejemplo, configuraciones híbridas solar-diesel permiten que los paneles cubran cargas auxiliares mientras el motor clásico opera en régimen óptimo, reduciendo así el gasto de combustible. El uso de baterías (p.ej. Li-ion) proporciona almacenamiento intermedio: amortiguan la variabilidad solar y permiten tramos a motor 100% eléctrico cuando sea posible (Sharma & Syal, 2021). Si bien los híbridos aportan eficiencia y menor emisión, también introducen complejidad en controles eléctricos (frecuencia, voltaje, sincronización).
- **Otras tecnologías limpias.** Además de la eólica y solar, se estudian sistemas de hidrógeno verde (electrólisis a bordo) y celdas de combustible para propulsión libre de carbono, aunque estos requieren soluciones avanzadas de almacenamiento (López, 2025). En la actualidad, emprendimientos como yachts «ecológicos» incorporan incluso generadores hidroeléctricos en hélices, turbinas eólicas integradas y recuperación de calor residual

En conjunto, la integración de renovables en la navegación apunta a un transporte marítimo más sostenible. La investigación especializada concluye que la fotovoltaica puede reducir significativamente el consumo de combustible fósil en embarcaciones. Sin embargo, cada fuente renovable presenta requisitos de diseño y operación específicos en el entorno marítimo, por lo que la aplicación suele realizarse en sistemas complementarios (e.g. eólico + solar) para maximizar beneficios (Kasaeian y otros, 2025).

2.5 Paneles solares fotovoltaicos: tipos, eficiencia y funcionamiento en entornos marinos

Los paneles fotovoltaicos instalados en embarcaciones deben soportar condiciones marinas exigentes. Los tipos más comunes son:

- **Monocristalinos de alta eficiencia (>20%).** Son predominantes por su rendimiento energético; actualmente superan el 22% en laboratorio. Suelen montarse en módulos rígidos con vidrio templado para resistir salpicaduras y golpes. Se desarrollan también versiones flexibles (afiladas) para techos curvos o velas rígidas, que facilitan la instalación en yates y catamaranes.
- **Policristalinos.** Menor costo pero eficiencias típicas algo inferiores (~15–18%). Usados en aplicaciones menos críticas donde el espacio es abundante.
- **Células de película delgada (CIGS, CdTe).** Son ligeras y flexibles, con buena respuesta en condiciones difusas, pero su eficiencia (<14%) y estabilidad marina suelen ser limitantes.
- **Perovskita-silicio tándem.** Tecnología emergente cuya eficiencia teórica de la celda supera el 30%. Aún experimental, podría aplicarse en futuro cercano en paneles avanzados marinos.

Las eficiencias de operación en la práctica dependen de factores ambientales. Los paneles marinos experimentan irradiancia variable (nubes, oleaje) y cambios de orientación de la embarcación, lo que reduce su rendimiento comparado con pruebas en tierra. Además, la exposición continua a neblinas salinas, humedad y radiación UV degradan los materiales. Estudios recientes alertan que el aerosol salino acelera la corrosión galvánica de metales y electrodos en los módulos (Zuraiz y otros, 2025). Para contrarrestarlo, los fabricantes aplican recubrimientos anti-corrosivos y vidrios reforzados, y utilizan encapsulantes de alta calidad.

Los paneles fotovoltaicos marinos pueden integrarse en varias configuraciones: sobre la cubierta principal, en toldos solares, o incluso formando superficies de vela. El cálculo de la potencia instalable considera la eficiencia de la célula (η_{cell}), la eficiencia del sistema (η_{system}), el área disponible ($A_{\text{available}}$) y la irradiancia incidente. Por ejemplo, en un buque grande se dispone de miles de metros cuadrados para módulos, pero en botes pequeños la cubierta útil es muy limitada. Esto crea una brecha entre el potencial teórico y lo realmente instalable. Una revisión señala que en buques mercantes la falta de espacio en cubierta limita las opciones PV y aumenta el costo por vatio instalado (García y otros, 2025).

Tabla 2

Comparativa de tecnologías de paneles fotovoltaicos para ambiente marino

Tipo de panel	Eficiencia típica (%)	Ventajas	Desventajas
Monocristalino	18–22+	Alta eficiencia, confiabilidad probada	Mayor costo; módulos rígidos (salvo flexibles)
Policristalino	15–18	Menor costo	Menor eficiencia, mayor degradación
Película delgada (CIGS)	10–14	Flexible, buen desempeño en baja luz	Eficiencia baja, estabilidad limitada
Perovskita-silicio (tándem)	>30 (teórico)	Eficiencia muy alta potencial	Aún experimental, durabilidad en estudio
Flexibles ultraligeros	15–20	Ligeros, adaptables a formas curvas	Suelen tener menor eficiencia que rígidos

En la práctica náutica se busca maximizar la generación sin comprometer la seguridad ni la estabilidad de la embarcación. Se han propuesto estructuras retráctiles o paneles orientables para seguir al sol, con aumentos de captación de hasta 25–35%. Sin embargo, tales sistemas aún son costosos y complejos de estabilizar en aguas movidas. En general, la fotovoltaica marina ofrece beneficios claros (energía silenciosa y limpia), pero su adopción se ve limitada por el espacio disponible, la corrosión salina y el costo inicial (García y otros, 2025).

2.6 Sistemas híbridos (solar-diésel y solar-batería) aplicados a embarcaciones

Los sistemas híbridos combinan la generación fotovoltaica con motores convencionales y/o almacenamiento eléctrico. En buques medianos y grandes suele emplearse un esquema **solar–**

diésel: los paneles alimentan directamente cargas auxiliares (iluminación, control, equipos) y cargan baterías de respaldo, mientras que el motor diésel propulsa el barco o genera electricidad principal. Un estudio técnico concluye que estos sistemas híbridos pueden reducir notablemente el consumo de combustible fósil y las emisiones contaminantes (Sharma & Syal, 2021).

Sin embargo, la integración eléctrica presenta desafíos importantes. Según la literatura, la corriente variable de los paneles (dependiente del sol) debe sincronizarse cuidadosamente con el generador diésel y las baterías. Se requieren inversores y controladores avanzados que gestionen voltaje y frecuencia para evitar inestabilidades. Además, el costo y peso de baterías de alta capacidad encarecen el sistema; aun así, estudios de caso sugieren que, en operaciones intensivas (ferries, pesca, etc.), la inversión puede amortizarse en unos pocos años por el ahorro de combustible.

En embarcaciones de menor tamaño (yates, botes eléctricos), la tendencia es hacia sistemas solar-batería sin motor diésel. Aquí, los paneles recargan baterías de tracción (e.g. ion-litio) que mueven directamente motores eléctricos. Este esquema simplifica la integración y elimina los costos de combustible, aunque está limitado por la autonomía de la batería. Empresas náuticas han desarrollado unidades de control “smart” que optimizan cuándo usar energía solar almacenada versus baterías, y permiten recarga en puerto desde red eléctrica o cargadores rápidos.

Ventajas principales de los híbridos solar-diésel/batería: Menor consumo de combustible fósil, reducción de emisiones directas (CO₂, NO_x, partículas), operación más silenciosa y autonomía parcial con “combustible gratuito” del sol. También permiten que el motor diésel opere en su punto óptimo (lo que mejora su eficiencia), ya que las baterías absorben las variaciones de demanda. Entre sus limitaciones técnicas figuran el mayor peso y costo de componentes, y la complejidad de la electrónica de potencia para gestión energética.

2.7 Reseña de uso de energía renovable en embarcaciones recreación

A nivel internacional se han desarrollado múltiples proyectos pioneros en embarcaciones ligeras y yates de recreo:

- **Catamaranes WWF Solar (España):** Este catamarán de 14 m (tipo *Aquabus C60*) fue donado por WWF Suiza a WWF España. Tiene dos motores eléctricos de 8 kW cada uno (DC), alimentados por baterías de plomo-ácido de 48 V (520 Ah por banco). Dispone de unos 65 m² de paneles solares en cubierta (dos arreglos de 5 kW cada uno). Puede navegar a unos 5 nudos de crucero y alcanzar 6–7 nudos de tope, con autonomía estimada de ~18 horas continuas (90 millas náuticas) en crucero sin sol. Suele llevar unos 12 pasajeros y se utiliza para campañas de sensibilización ambiental en la costa mediterránea (Sharma & Syal, 2021).

Figura 1

Catamarán WWF solar



- **Barcos Lasai (España).** La empresa vasca Lasai Barcos fabrica embarcaciones de recreo eléctrico-solares. Su modelo marítimo incluye un banco de baterías de hasta 40 kWh y paneles solares integrados de 0,7 kW en total. Estos barcos (alrededor de 7–8 m) logran

velocidades de 15–17 nudos en condiciones óptimas y ofrecen unas 10 horas de autonomía con recarga diurna continua (Volta, 2023).

Figura 2

Barco Lasai



- **Lancha Solar de Mónaco (Oceanografía):** Cuenta con un “bateau-bus” solar (lancha catamarán pública) de diseño local, con paneles en el techo y capacidad para decenas de pasajeros. En la imagen superior se observa esta lanzadera acuática propulsada por baterías recargadas con unos 10 kW de paneles (Carjova et al., 2025).

Figura 3

Lancha Mónaco



- **Competición y prototipos experimentales:** Existen regatas y eventos (p.ej. Solar & Energy Boat Race) donde prototipos universitarios prueban tecnologías solares, a menudo usando baterías innovadoras o materiales ligeros avanzados. También destacan proyectos de catamaranes transoceánicos 100% solares para expediciones ambientales. Aunque muchos son demostradores, ofrecen datos valiosos: por ejemplo, las celdas solares en competición han alcanzado rendimientos de campo cercanos al 20% (Kasaeian et al., 2025).
- **Otros ejemplos internacionales.** El proyecto suizo MS Tûranor PlanetSolar (31 m eslora) fue el mayor barco solar del mundo, con unos 500 m² de paneles (93 kW) conectados a 8,5 t de baterías de ión-litio, y dos motores de 60 kW cada uno. Aunque es de mayor tamaño, ilustra la tecnología disponible. También en Australia y Asia operan catamaranes eléctricos solares para transporte fluvial. En general, las embarcaciones solares/híbridas usan cascos de fibra de vidrio o aluminio ligero y bancos de baterías (litio o plomo) adaptados al tamaño (desde decenas de Ah hasta varios kWh). Estos diseños consiguen autonomías de decenas de millas náuticas y velocidades de crucero típicas de 5–15 nudos, según las dimensiones y la potencia instalada (Volta, 2023).

Figura 4

MS Tûranor PlanetSolar



2.8 Proyectos de transporte turístico con uso de energía

En el contexto ecuatoriano se han iniciado proyectos emblemáticos de transporte solar en regiones insulares y amazónicas:

- **Islas Galápagos – Lancha “Solaris” (2014).** Financiado por la Embajada Británica y WWF-Ecuador, el proyecto reconstruyó una lancha de 7,5 m confiscada para equiparla con paneles solares. La *Solaris* dispone de 8 paneles fotovoltaicos en techo, alimentando su motor eléctrico y sistemas a bordo (British Embassy Quito, 2014).

Emplea 2 baterías de litio de 104 Ah y un motor eléctrico fuera de borda de 4 kW. Tiene colocados 8 paneles solares (≈ 1 kWp en total) sobre su cubierta. Su autonomía fue estimada en cerca de 1,5 días de operación continua, navegando a velocidad de crucero (~ 7 km/h, unos 3,8 nudos) durante $\sim 1,5$ horas diarias. Puede transportar hasta 11 personas a unos 7 nudos de velocidad. Su diseño ligero (~ 1.500 kg) le permite velocidades máximas de 11–13 km/h (6–7 nudos) con plena carga (British Embassy Quito, 2014). Los paneles solares recargan las baterías incluso mientras la lancha fondea, reduciendo en un 32 % el consumo de energía estimado y asegurando varios días de autonomía.

Figura 5

Lancha “Solaris”





- **Amazonía ecuatoriana – Fundación Kara Solar (2017–hoy).** En las comunidades Achuar de la provincia de Pastaza surgió la iniciativa *Kara Solar*, que en 2017 diseñó la primera canoa solar amazónica. Desde entonces, esta fundación indígena desarrolla embarcaciones propulsadas por paneles solares y baterías para navegación fluvial. Las nuevas “canoas solares” no producen ruido ni humo y eliminan la contaminación por derrames de combustible (Alvarado, 2025). En octubre de 2025, reportes locales indican que tras construir la primera canoa comunitaria, ahora Kara Solar proyecta poner en funcionamiento 100 embarcaciones solares en la Amazonía en los próximos 10 años, reemplazando igual número de motores fuera de borda convencionales. La iniciativa, aunque inicialmente sin apoyo gubernamental, ha recibido financiamiento internacional (Fondo Multilateral de Inversiones) para promover modelos de negocio local, formación de técnicos indígenas y escalamiento de producción.

Es el primer prototipo, bautizado *Tapiatpia*, es un catamarán de 16,05 m de eslora, casco de fibra de vidrio, con dos motores eléctricos Torqeedo *Cruise 10.0* (10 kW cada uno, 48 V). Su manga es de 2,11 m y su desplazamiento ronda 3 toneladas llenas. Lleva un conjunto de paneles fotovoltaicos en cubierta (varios kWp) y baterías de litio (no especificadas) que alimentan los motores. *Tapiatpia* tiene capacidad para unas 20 personas. Este primer barco realizó un viaje piloto de 1.800 km por los ríos amazónicos en 2017. Actualmente la flota

creció a 6 embarcaciones similares, cada una con capacidad ~20 pasajeros, utilizadas para educación, comercio y patrullaje ecológico (según *National Geographic* son hasta 6 botes en 9 comunidades) (Alvarado, 2025).

Figura 6

Lancha Kara Solar



Estos casos ecuatorianos muestran el potencial de las energías renovables en contextos aislados: la *Solaris* sensibilizó sobre la viabilidad eléctrica en Galápagos, y Kara Solar impulsa la autonomía energética en el Amazonas. Ambos proyectos enfatizan beneficios como la reducción de emisiones locales, menores costos de operación y protección de ecosistemas sensibles.

No obstante, aún son iniciativas piloto cuya escala exige superar retos de naturaleza técnica, logística y social específicos.

2.9 Ventajas y limitaciones técnicas del uso de energías renovables en embarcaciones

- **Ventajas:** El uso de las renovables en el ámbito de la náutica otorga una serie de beneficios ambientales y operativos. A medida que se va dejando de consumir diésel/gasolina, se disminuyen las emisiones directas de CO₂, NO_x, SO_x y partículas finas, contribuyendo así a mitigar los cambios climáticos y favorecer la acción reguladora en terminos ambientales.

Las embarcaciones eléctricas/solares son casi totalmente silenciosas, lo que conduce a que se refrende la disminución de la contaminación acústica marina y el hecho de mejorar la experiencia turística satisfactoria (Volta, 2023). Asimismo, también eliminan el riesgo de derrames de aceite o combustible al agua.

Desde el punto de vista económico, aunque la inversión inicial es alta, se afirma que el costo de la recarga eléctrica (o la propia generación solar) es menor al del combustible, de manera que puede amortizarse en pocos años (Romito, 2015). Desde el punto de vista técnico, la propia modularidad de los paneles permite escalar el sistema a cada buque, además de que la combinación con las baterías inteligentes permite optimizar el uso energético.

- **Limitaciones:** Sin embargo, por otro lado, aparecen importantes limitaciones técnicas. El área útil en cubierta es muy escasa; un barco de gran carga, por ejemplo, sólo tiene menos del 10% de su superficie útil para paneles y, por tanto, área y la potencia solar que se podría instalar (García y otros, 2025). La generación solar es intermitente (día/noche, meteorología) y variable en función del movimiento del barco, lo que obliga a plantear una solución de tipo híbrido o bastidores de acumulación (baterías) para permitir el suministro de energía continua. Caras las inversiones iniciales en infraestructura solar (paneles, inversores, baterías), muestran que los costos son todavía muy altos comparados con los costosos generadores diesel tradicionales.

Se enfatizan de igual modo los problemas de ingeniería que conllevan el reforzamiento de las estructuras a las que se les añaden los paneles solares y los mecanismos orientables (en situaciones de oleaje), junto a la complicación de controlar varios medios de producción de energía (solar, diésel o batería) y hacerlos funcionar a la vez. (Por último) la exposición

prolongada al medio marino (spray salino, humedad, radiación UV) propicia la degradación de los componentes del sistema fotovoltaico, lo que precisa, finalmente, el utilizar materiales muy específicos y el mantenimiento más frecuente del sistema.

En síntesis, el uso de renovables en embarcaciones implica una compensación técnica: se obtiene energía limpia y ahorro de combustible, pero a cambio de sistemas más complejos, espacio dedicado y mayores costos iniciales.

2.10 Sostenibilidad, eficiencia energética y reducción de emisiones en navegación recreativa

La navegación recreativa (yates, veleros, lanchas de recreo) está incorporando cada vez más soluciones limpias para cumplir objetivos de turismo sostenible. Una de las características de los barcos eléctricos e híbridos es que su navegación produce cero emisiones a la atmósfera y al agua. Al dejar de lado el uso de combustibles fósiles, los barcos eléctricos pueden evitar emisiones de CO₂, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y la liberación de hidrocarburos al agua. De igual manera, el hecho de que no se emplee aceite de un lubricante en la propulsión eléctrica puede eliminar el riesgo de un posible vertido tóxico al medio acuático (Volta, 2023).

A ello se le añade una segunda ventaja importante, que es la mejora en la eficiencia energética. Los motores eléctricos producen un par inmediatamente y presentan mejoras en las eficiencias de operación en comparación con motores de combustión interna (70-90% en comparación con 30-40% del diésel). Esto significa menos consumo de energía en cada unidad de impulso, especialmente en momentos de bajas demandas (maniobras, anclaje, etc.). Además, empleando baterías de alta densidad (ión-litio), mediante el uso de sistemas de gestión de energía, resulta posible almacenar excedentes solares para utilizarlos más adelante y aumentar la distancia recorrida de forma independiente sin producir emisiones. (Carjova et al., 2025).

Finalmente, estas embarcaciones ofrecen beneficios sociales y económicos. Navegar de manera silenciosa mejora la experiencia turística y reduce el estrés a la fauna marina. Los costos operativos y de mantenimiento en el yate disminuyen a largo plazo. Además, la instalación de paneles solares en yates permite cargar también dispositivos de a bordo (electrónica, refrigeración) gratis, contribuyendo a un perfil energético autónomo. En conjunto, la náutica recreativa sostenible acelera la reducción de la huella de carbono del sector marítimo y promueve un uso más eficiente de la energía disponible.

2.11 Reseña de investigación de energía renovable en Ecuador

A pesar de los avances descritos, existen importantes lagunas de conocimiento específicos para el Ecuador. En primer lugar, poca investigación localizada: faltan estudios nacionales detallados sobre el comportamiento de los sistemas renovables en nuestras latitudes y condiciones particulares (e.g. alta humedad amazónica, intensas radiaciones solares ecuatoriales). Por ejemplo, aún no se dispone de datos precisos sobre la degradación real de paneles en el mar costero ecuatorial ni sobre la optimización de orientadores solares en la navegación fluvial con corrientes variables.

Asimismo, limitada experiencia técnica y política. Los proyectos existentes (Solaris, Kara Solar) han sido impulsados por ONGs y cooperación internacional, pero no existen políticas estatales consolidadas para fomentar la investigación aplicada en energía renovable marítima. La falta de respaldo inicial en la Amazonía achuar (según informes, las comunidades lograron avanzar “sin apoyo de los gobiernos locales”) evidencia carencias institucionales (Alvarado, 2025). Tampoco se han establecido estándares o protocolos nacionales para certificar embarcaciones solares, ni se cuentan con programas académicos especializados en energía marina.

Otro desafío es la brecha entre demostración y escalabilidad. Aunque existen demostradores exitosos, no existen esquemas claros de financiamiento o modelo de negocio para la producción en masa de embarcaciones eléctricas o híbridas adaptadas al mercado ecuatoriano. El proyecto BID-EC-T1577 (aprobado 2024) reconoce esta brecha: su objetivo es “desarrollar nuevos modelos de negocio circulares” y formar técnicos indígenas locales para promover el ensamblaje y comercialización de canoas solares amazónicas (BID, 2024). Esto refleja la necesidad de articular aspectos técnicos con factores sociales y económicos en entornos rurales.

Finalmente, subsisten incertidumbres sobre la viabilidad económico-técnica a gran escala. Aunque se sabe que renovables pueden reducir emisiones, faltan análisis de ciclo de vida y estudios de impacto ambiental específicos de Ecuador (Cerquera et al., 2021). Por ejemplo, no se cuenta con evaluaciones oficiales sobre el retorno de inversión de paneles en yates turísticos en Galápagos, ni de emisiones evitadas en el Amazonía tras introducir canoas solares. Esta falta de datos dificulta formular estrategias nacionales de descarbonización marítima.

En síntesis, las brechas de conocimiento en el contexto ecuatoriano abarcan desde la investigación técnica (rendimiento real de sistemas, durabilidad en zonas tropicales) hasta el desarrollo de políticas e infraestructuras de apoyo. Cerrar estas brechas requerirá estudios de campo en nuestras vías navegables, capacitación especializada (como propone el BID) y un marco normativo que estimule la innovación náutica sostenible.

CAPÍTULO III: SELECCIÓN DE EMBARCACION PARA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

3.1 Diseño general del catamarán híbrido solar-eléctrico

El catamarán es una embarcación multicasco formada por dos cascos paralelos unidos por una estructura rígida (puente). Este diseño ofrece una plataforma muy estable y de gran superficie, ideal para integrar paneles solares y baterías de litio. Las investigaciones sobre catamaranes señalan que los cascos gemelos reducen la resistencia hidrodinámica y ofrecen una mayor estabilidad inicial que los monocascos; además, el doble casco tiene menos volumen y un desplazamiento más ligero, permitiendo navegar en aguas poco profundas (The Boat DB, 2020). El amplio espacio en cubierta facilita la instalación de grandes superficies de paneles solares (The Boat DB, 2020).

3.1.1 Manga (*beam*) del catamarán

La manga es la anchura máxima de la embarcación medida entre las bandas. En catamaranes, la manga total incluye la distancia entre los cascos y proporciona estabilidad y espacio útil. Un artículo de ingeniería naval explica que la manga se mide en el punto más ancho del casco y que una manga mayor se traduce en mayor estabilidad, espacio interior y capacidad de carga (Sharma & Syal, 2021). La relación es crítica: un catamarán con gran manga tiene centro de gravedad bajo, lo que aumenta el momento de adrizamiento y reduce la tendencia a escorar (Sharma & Syal, 2021).

Los valores típicos de manga varían según la eslora. Por ejemplo, el catamarán eléctrico SoelCat 12 de 11,80 m de eslora tiene una manga de 5,80 m; el catamarán de lujo Xquisite X5 Plus (15,44 m de casco) posee una manga de 8 m; el Maverick 440 Hybrid de

13,3 m tiene una manga de 7,45 m (The Boat DB, 2020); y el Silent 80 de 24,38 m de eslora alcanza una manga de 10,93 m (The Boat DB, 2020).

3.1.2 Quilla y apéndices de equilibrio

Los catamaranes hacen uso de dos quillas o daggerboards (derivas completamente retráctiles) que sustituyen a las quillas profundas que les caracterizan a los monocascos. Según David Walters Yachts (2023), el objetivo de la quilla es proporcionar estabilizadores subacuáticos y permitir el control de la dirección. Existen diferentes tipos:

- Quillas fijas: Se ajustan a la estabilidad y al equilibrio sin requerir ajustes continuos; son fáciles, simples, mantienen bajo y fácil mantenimiento y soportan la varada (David Walters Yachts, 2023).
- Daggerboards o derivas: son quillas retráctiles que se utilizan en catamaranes de alto rendimiento; permiten ser subidas o bajadas para mejorar la ceñida (capacidad de navegar directamente contra el viento) y la eficiencia reduciendo la resistencia (David Walters Yachts, 2023).
- Hydrofoils: en modelos de catamaranes más avanzados para que los foils eleven la superficie del agua el casco para mejorar la velocidad y reducir la resistencia (David Walters Yachts, 2023).

La elección del tipo de quilla influye en el calado. Los catamaranes con quillas fijas suelen tener calados inferiores a 1 m; por ejemplo, el Maverick 440 Hybrid tiene un calado de 1 m (Maverick Yachts, 2020) y el SoelCat 12 solo 0,70 m (Soel Yachts, 2023), lo que permite acceder a zonas costeras poco profundas.

3.1.3 Partes principales de un catamarán y sus características

La configuración multicasco integra varios componentes clave, cada uno con características específicas:

Tabla 3

Partes del catamarán y sus características

Componente	Función y características
Cascos (hulls)	Dos cascos paralelos forman la base estructural; proporcionan flotabilidad y estabilidad Su forma estrecha reduce la resistencia al avance.
Puente o cubierta (deck)	Une los cascos mediante vigas transversales. Contiene las áreas funcionales: timonería, bañera, zonas de descanso y plataforma para paneles solares; un diseño con mayor altura del puente reduce los impactos de las olas.
Mástil y vela mayor	En catamaranes de vela, el mástil soporta la vela mayor, que proporciona la mayor parte de la propulsión. Los catamaranes híbridos combinan vela y motor eléctrico.
Botalón (boom)	Palo horizontal conectado al mástil que sostiene la vela mayor, permitiendo ajustar su ángulo.
Timones (rudders)	Situados en la popa de cada casco; permiten controlar la dirección.
Jarcia firme (forestay y backstay)	Cables que sujetan el mástil por proa y popa; mantienen la estabilidad del mástil.
Jarcia de labor (sheeting)	Conjunto de cabos para orientar las velas y ajustar la potencia.
Trampolines	Redes tensadas entre los cascos en la proa; reducen el peso y permiten que las olas pasen a través, evitando impactos fuertes.
Cámaras de baterías y motores	Los catamaranes híbridos alojan bancos de baterías de litio en los cascos. El Maverick 440 Hybrid integra motores eléctricos alimentados por baterías de fosfato de litio y paneles solares.

Fuente: Información adaptada de The Boat DB, (2020), Maverick Yachts (2020) y Sondevela (2024).

Estas partes permiten que el catamarán híbrido solar-eléctrico combine propulsión a vela, motores eléctricos y, opcionalmente, generadores diésel de apoyo.

3.1.4 Características operativas y rendimiento

Los catamaranes ofrecen ventajas específicas como:

- Estabilidad y confort: la distancia entre los cascos genera un momento de adrizamiento elevado, reduciendo el balanceo y la escora (Tideline Boats, 2023).
- Velocidad y eficiencia: la menor resistencia hidrodinámica permite alcanzar mayores velocidades con menor potencia (The Boat DB, 2020).

- Espacio en cubierta: la amplia manga proporciona un espacio exterior excepcional para instalación de paneles solares (Tideline Boats, 2023).

3.1.5 Desplazamiento y peso total

El desplazamiento describe el peso total de la embarcación y su carga. Para estudios de eficiencia energética es esencial conocer este valor porque influye en la potencia requerida y en el consumo.

Tabla 4

Desplazamiento y peso total

Modelo de catamarán (tipo)	Eslora / Manga / Calado	Desplazamiento y peso	Observaciones
SoelCat 12 (solar eléctrico)	11,80 m eslora; 5,80 m manga; 0,70 m calado	6 t de desplazamiento	Diseñado para excursiones; capacidad de 12–20 pasajeros; potencia solar 8,6 kWp y baterías de 2×60 kWh.
Xquisite X5 Plus(vela-híbrido)	16,63 m eslora total; 8 m manga; 1,35 m calado	Desplazamiento ligero de 16 500 kg	Catamarán de crucero de lujo; dispone de 2×80 HP y grandes depósitos de agua y combustible.
Maverick 440 Hybrid (vela-híbrido)	13,3 m eslora total; 7,45 m manga; 1 m calado	Desplazamiento de ~9 930 kg	Integra motores eléctricos de 20 kW y baterías de litio; destaca su calado extremadamente bajo y la posibilidad de instalar hasta 1,3 kW de paneles solares.
Silent 80(catamarán solar de lujo)	24,38 m eslora; 10,93 m manga; 1,6 m calado	Desplazamiento ligero de 80 t	Yate de lujo con 22,4 kWp de paneles solares y capacidad de 4–6 camarotes.

Fuente: Información adaptada de Sondevela (2024), The Boat DB, (2020), Maverick Yachts (2020).

3.1.6 Parámetros para la selección de la embarcación

Para implementar un catamarán híbrido solar-eléctrico se den considerar:

- Superficie útil para paneles solares (m²): la manga amplia y la cubierta plana deben permitir la instalación de paneles eléctricos que generen la suficiente energía para la operación.
- Capacidad de la energía y almacenamiento: capacidad de baterías en kWh, tipo de celdas (LiFePO₄ o similar) y sistema de gestión.
- Desplazamiento (displacement) y carga útil: el peso total es determinante del consumo y la autonomía.

- Calado y tipo de quilla: para operar en aguas costeras se recomienda un calado alcanzando el metro.
- Razón eslora/manga: determina la estabilidad y la eficiencia hidrodinámica.

CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL PROYECTO

En este capítulo se desarrolla el estudio técnico para la implementación de paneles solares en un catamarán de recreo tipo yate multicasco, definido estructuralmente como una embarcación de dos cascos paralelos unidos por un puente rígido. El estudio considera catamaranes de 15 metros de eslora. Se abordan las áreas disponibles para la instalación de paneles fotovoltaicos, la selección de tecnología de paneles y componentes del sistema, la disposición de los equipos dentro de la embarcación, el soporte estructural requerido, planos de distribución de los paneles y equipos, presupuesto y el análisis financiero (TIR y VAN) del proyecto.

4.1 Áreas útiles para la instalación de paneles solares

En un catamarán, existen diversas superficies y áreas que pueden aprovecharse para montar paneles solares. La ubicación ideal combina máxima exposición al sol, superficie disponible suficiente y mínima interferencia con otras funciones del yate. Algunas áreas útiles incluyen:

- **Techo del puente de mando o cabina principal:** La parte superior de la cabina (roof deck) suele ofrecer una amplia superficie plana o ligeramente curva, a menudo expuesta al sol directamente. Muchos catamaranes modernos integran paneles en el techo del salón o en el flybridge (si existe), ya que es un lugar elevado y relativamente libre de sombras. Por ejemplo, el célebre catamarán MS Tûranor PlanetSolar (31 m de eslora) dispuso 703 paneles solares en toda su cubierta superior, convirtiéndola en la principal superficie de captación de energía. Este extenso arreglo le permitió circunnavegar el mundo con energía 100% solar, demostrando el potencial de aprovechar al máximo las áreas expuestas de la cubierta.
- **Toldo rígido o bimini sobre el cockpit:** Muchos yates cuentan con un techo tipo bimini (duro o de lona) para proteger la cabina de mando y área de estar exterior. Si el catamarán

posee un bimini rígido, éste puede diseñarse o adaptarse para incorporar paneles solares integrados. De hecho, astilleros innovadores como Sunreef Yachts ya integran paneles solares en techos bimini curvados de carbono, aprovechando esas superficies elevadas. Este tipo de integración permite captar energía sin añadir estructuras voluminosas, manteniendo la estética y funcionalidad del yate.

- **Arco de popa o estructura sobre espejo de popa:** Es común en catamaranes de crucero la instalación de un arco de popa (stern arch), que sirve para soportar antenas, luces, y a menudo paneles solares. Un arco elevado en la parte trasera de la embarcación ofrece buena exposición solar y distancia de las sombras proyectadas por mástiles o cabinas. Además, permite orientar ligeramente los paneles y proporciona espacio por debajo para mover la tripulación sin obstrucciones. En catamaranes a vela, esta suele ser la solución preferida para agregar paneles sin interferir con las velas.
- **Cubierta de proa y cascos:** Si el catamarán tiene espacios en proa (por ejemplo, techo de caseta de proa o incluso los trampolines reemplazados con paneles rígidos en proyectos experimentales), también podrían montarse paneles allí. Sin embargo, estas áreas suelen recibir sombras intermitentes (velas, mástil) y en diseños tradicionales alojan redes, por lo que su uso es más limitado. Algunos diseños futuristas han explorado paneles en superficies verticales de los cascos o costados, e incluso en el mástil. Por ejemplo, la línea Sunreef Eco señala que sus paneles solares ligeros pueden montarse en cualquier superficie del yate, incluidos cascos y mástiles, adaptándose en tamaño y forma para maximizar la captación solar. No obstante, las superficies verticales producen menos energía (por la incidencia subóptima del sol) y suelen aprovecharse solo tras agotar las áreas horizontales.

- **Cubierta superior transitable:** En yates grandes (próximos a 40–50 m eslora) con amplias cubiertas superiores, es posible instalar paneles adosados y transitables. Estos paneles suelen ser de tipo flexible o semi-rígido integrados al suelo, permitiendo caminar encima. Por ejemplo, el catamarán solar español Solemar (un catamarán turístico de ~10 m) lleva 16 placas solares ubicadas en el techo, que alimentan 24 baterías y le otorgan hasta 150 horas de autonomía sin sol.

Es importante considerar la incidencia de sombras al elegir las áreas. Elementos como el mástil, la botavara, antenas o incluso personas transitando pueden proyectar sombras en los paneles y reducir drásticamente su rendimiento. Un sombreado parcial, incluso pequeño, puede reducir la tensión de salida de un panel fotovoltaico al punto de anular su contribución. Los fabricantes mitigan esto con diodos de bypass, pero dos o tres sombras estrechas atravesando las celdas podrían paralizar la producción del panel completo. Por ello, se debe prestar especial atención a la ubicación: las superficies más despejadas y elevadas (techo, arcos) suelen ser preferibles a la cubierta principal donde mástiles y aparejos crean sombras móviles. Una solución común en veleros es montar paneles de forma horizontal sobre la cabina o en un arco alto, y evitar zonas cerca del mástil. Incluso se ha experimentado con paneles orientables manualmente en barandillas (rieles de popa) para optimizar el ángulo según la posición del sol, aunque en un yate grande esto no siempre es práctico por la cantidad de paneles.

En resumen, las áreas útiles son principalmente las superficies superiores (techos de cabina, biminis rígidos, arcos y cubiertas elevadas), aprovechando cada metro cuadrado disponible con buena insolación y mínimas sombras. Ejemplos reales demuestran que un diseño cuidadoso puede integrar gran cantidad de paneles sin comprometer la operatividad: desde la cubierta completa en proyectos especiales (PlanetSolar), hasta techos y arcos en catamaranes comerciales (Solemar) o

de lujo (Sunreef Eco). Estas referencias guiarán la selección de áreas en este proyecto, priorizando máxima generación solar con la mínima interferencia en la funcionalidad del catamarán.

4.2 Paneles solares aplicables en catamaranes

La selección de los paneles solares adecuados es un aspecto crítico del diseño, ya que debe balancear eficiencia, peso, resistencia al ambiente marino y adaptación a las superficies de la embarcación. En el mercado actual existen varios tipos de paneles fotovoltaicos aplicables en yates, principalmente diferenciados por la tecnología de sus celdas y su formato constructivo (rígido o flexible):

- **Paneles monocristalinos:** Están formados por celdas de silicio monocristalino, obtenidas a partir de un único cristal de silicio de alta pureza. Son reconocidos por su alta eficiencia, típicamente en el orden del 18–22%. Las mejores celdas monocristalinas pueden superar el 20% de eficiencia en laboratorio, aunque comercialmente la mayoría ronda ese valor. Esto significa que pueden generar más potencia por unidad de área en comparación con otros tipos, lo cual es valioso en la limitada superficie de un barco. Además, su apariencia suele ser uniforme (celdas oscuras con esquinas cortadas) y estéticamente agradable. En contra, su coste es mayor debido al proceso de fabricación más complejo: se debe crear un cristal único y uniforme. No obstante, para maximizar la producción en el área disponible, los paneles monocristalinos rígidos son la opción preferente en instalaciones marinas cuando la superficie de montaje es plana y suficiente. También mantienen buen rendimiento a altas temperaturas y su vida útil suele superar los 25 años, características convenientes para un yate de lujo que busca fiabilidad a largo plazo.

4.3 Componentes principales del sistema solar fotovoltaico a bordo

Un sistema solar a bordo de un catamarán no solo consta de los paneles; incluye una serie de equipos eléctricos y electrónicos que permiten acondicionar, almacenar y utilizar la energía generada de manera segura. Los componentes principales del sistema fotovoltaico propuesto son:

- **Paneles solares (arreglos fotovoltaicos):** Son el generador primario, convirtiendo la radiación solar en electricidad (corriente continua). En este proyecto, se dispondrá un conjunto de paneles conectados de forma adecuada (serie/paralelo) para alcanzar los voltajes y corrientes deseados. La selección de tipo y ubicación de los paneles ya fue discutida en secciones previas. Los paneles se interconectarán mediante cajas de conexión o combiners con diodos de protección según el diseño final.
- **Regulador de carga solar (controlador):** También llamado controlador de carga, es un dispositivo electrónico situado entre los paneles y las baterías. Su función es regular la tensión y corriente que sale de los paneles para cargar las baterías de forma óptima sin sobrecargarlas, y alimentar la red eléctrica de a bordo de manera segura. Dado que la producción de los paneles varía con la luz solar, el regulador se encarga de extraer el máximo rendimiento y adaptar esa energía a los niveles requeridos por la batería. Existen principalmente dos tipos: PWM (Pulse Width Modulation) y MPPT (Maximum Power Point Tracking). En sistemas modernos y de cierta envergadura, vale la pena usar reguladores MPPT, ya que optimizan el punto de operación de los paneles en todo momento.

Un MPPT puede aumentar significativamente la captación efectiva, especialmente en condiciones de irradiación variable o temperatura alta, logrando hasta un 30% más de corriente de carga que un PWM convencional en algunos casos. Por tanto, para este proyecto se especificarán controladores MPPT marinos de alta calidad, dimensionados a la

potencia del arreglo solar. Estos incluirán protecciones electrónicas (contra sobrecarga, sobretensión, inversión de polaridad) y posiblemente monitorización remota de los datos de generación.

- **Baterías de almacenamiento:** Dado que el suministro solar es variable y no siempre coincide con la demanda de la embarcación es imprescindible contar con un banco de baterías que almacene la energía excedente generada durante las horas soleadas para su uso posterior. El dimensionamiento del banco de baterías se realiza en función de la demanda energética diaria proyectada, las pérdidas del sistema y la autonomía requerida, tal como se desarrolla en la sección correspondiente. En catamaranes, generalmente ya existe un banco de baterías de servicio; el sistema solar puede integrarse a ese banco o tener un banco dedicado, dependiendo de la magnitud. La elección del tipo de batería es crucial: las opciones típicas son baterías de plomo-ácido de ciclo profundo (AGM o Gel, libre de mantenimiento) o baterías de iones de litio (típicamente LiFePO₄ en aplicaciones marinas por su seguridad).

Las baterías de litio tienen un costo inicial mayor, pero ofrecen ventajas notables: menor peso, mayor densidad de energía, eficiencia de carga ~95–98% (frente a 80–85% en AGM), pueden descargarse más profundamente sin dañarse y su vida útil supera los 10 años (vs 3–5 años de AGM). Por ejemplo, una batería AGM solo proporciona aproximadamente la mitad de su capacidad nominal en uso práctico (no es recomendable descargarla más del 50%), mientras una de litio LiFePO₄ permite usar hasta 80-90% de su capacidad con seguridad, y admite muchos más ciclos de carga/descarga. En este diseño, considerando la importancia de minimizar pesos en el catamarán y maximizar autonomía, se recomendarán baterías de litio LiFePO₄ para el sistema solar, a pesar de su mayor coste, siempre que el

presupuesto lo permita. Estas baterías incluyen sistemas de gestión (BMS) que protegen contra sobrecargas y sobre-descargas, y no emiten gases hidrógeno (importante en espacios confinados del barco). Alternativamente, si se optara por baterías de plomo-ácido, se usarían AGM o Gel marinas, instaladas en compartimentos bien ventilados y accesibles para mantenimiento. El dimensionamiento del banco de baterías se realizará en función de la demanda energética diaria y la autonomía deseada (ver sección de análisis financiero para más detalle de cálculo).

- **Inversor de corriente (DC-AC):** La mayor parte de los sistemas eléctricos de un catamarán operan en corriente continua (DC) a voltajes típicos de 12 V, 24 V o 48 V, lo cual es adecuado para iluminación, bombas, equipos de navegación, etc. Sin embargo, en yates modernos también existen numerosos electrodomésticos y cargas de corriente alterna (AC) a 120/240 V (según región), como enchufes para electrónicos, cargadores, cocina eléctrica, aire acondicionado, etc. En este proyecto se adopta un sistema nominal de 48 V, lo que permite reducir corrientes en el lado DC y mejorar la eficiencia global del sistema. Para poder alimentar equipos de AC a partir de la energía solar almacenada (DC en baterías), se requiere un inversor que convierta la corriente continua de las baterías en corriente alterna senoidal de características similares a la de la red eléctrica doméstica. Los inversores marinos suelen ofrecer salida 230 V AC 50 Hz (en Europa/Latam) o 120 V 60 Hz (en América) según las necesidades, con potencias que van desde pocos cientos de watts hasta varios kilovatios para soportar múltiples aparatos. Es fundamental elegir un inversor de onda sinusoidal pura, ya que entrega una forma de onda de alta calidad, idéntica a la de la red comercial, garantizando el correcto funcionamiento de equipos sensibles. Un inversor de onda modificada (aproximada) podría ser más económico, pero su onda

distorsionada puede producir ruido en equipos de audio/telecomunicaciones o incluso dañar aparatos electrónicos delicados como computadores o cargadores sofisticados. Dado el estándar de un yate de recreo, no se comprometerá en este aspecto: se especificará un inversor senoidal puro, con capacidad suficiente (se calculará la carga máxima concurrente, posiblemente del orden de 3–5 kW en un catamarán mediano) y con certificación marina. Muchos inversores modernos incluyen también función de cargador integrado (inversor/cargador), de modo que cuando el yate está conectado a puerto o generador, también puede cargar las baterías. Esta doble función aporta flexibilidad al sistema.

- **Sistema de distribución eléctrica y cableado:** Incluye todo el cableado, fusibles/disyuntores, conectores y bornes necesarios para interconectar los componentes anteriores de forma segura. En un entorno marino, se deben utilizar cables marine grade (cobre estañado multi-hilo, aislamiento resistente a la humedad y hidrocarburos) dimensionados adecuadamente para la corriente máxima esperada. Un error común es subestimar la sección de los conductores: cables con sección insuficiente o conexiones inadecuadas generan caídas de tensión y pérdidas de energía apreciables, además de calentamiento.

Por tanto, el diseño contemplará mantener las distancias de cable lo más cortas posible (especialmente entre paneles-controlador-batería) y usar calibres generosos para limitar la caída de voltaje por debajo de 3%. También se incorporarán elementos de protección: fusibles o disyuntores en cada serie de paneles, un seccionador (breaker) general entre el controlador y las baterías, y fusibles en la salida del inversor hacia los cuadros AC. Todo el cableado pasará por ductos estancos o tubos corrugados marinos, con prensaestopas donde atravesen mamparos, para evitar filtraciones de agua. Los conectores de paneles

serán del tipo MC4 (estándar fotovoltaico) o conexiones estancas equivalentes. Además del cableado de potencia, se instalará cableado de comunicación para monitores de batería, sensores de temperatura (por ejemplo, para compensar carga de baterías con temperatura) y eventualmente integración a sistemas de gestión energética de la embarcación.

- **Sistema de monitoreo y control:** Si bien no es un “equipo físico” grande, es importante considerar en el diseño la implementación de monitores o integraciones que permitan al capitán conocer el estado del sistema. Esto puede incluir un monitor de baterías (que muestra el nivel de carga (SoC), voltajes, corrientes entrantes y salientes), indicadores de generación solar en tiempo real, alarmas de baja batería, etc. Muchos controladores MPPT actuales vienen con conectividad Bluetooth o CAN bus para integrarse a displays multifunción. También los inversores/cargadores suelen conectarse a los sistemas de gestión de energía del buque. En un catamarán de alta gama, se integrarán estos datos al panel de control principal, de modo que se pueda visualizar fácilmente cuánta energía solar se está produciendo, cuánta queda almacenada y optimizar el uso de equipos a bordo en función de ello.

4.3.1 Estimación de la demanda energética diaria del sistema

Para el dimensionamiento técnico del sistema híbrido fotovoltaico propuesto para el catamarán de 15 metros de eslora, resulta imprescindible determinar con precisión la demanda energética diaria de la embarcación. Este cálculo constituye la base para definir la capacidad del banco de baterías, la potencia del campo fotovoltaico, la selección del inversor y la corriente nominal de los reguladores de carga.

La estimación se realizó considerando el perfil operativo típico de un catamarán de recreo, incluyendo cargas hoteleras, sistemas de navegación, equipos de comunicación, bombas,

iluminación, electrodomésticos y consumos auxiliares. Se adopta un sistema nominal de 48 V en corriente continua, lo que permite reducir las corrientes circulantes y minimizar pérdidas por caída de tensión en el lado DC.

La Tabla 5 presenta el detalle de los equipos eléctricos considerados, su corriente promedio equivalente a 48 V, las horas estimadas de funcionamiento diario y el consumo energético resultante en amperio-hora (Ah) por día.

Tabla 5

Estimación de consumo eléctrico diario

Equipo	Consumo-hora (A)	Horas funcionando (en 24 horas)	Consumo (en 24 horas) (Ah)
Nevera (compresor)	4	12	48
Congelador / freezer	3	12	36
Iluminación interior LED	1	6	6
Iluminación exterior/cortesía	1	4	4
Bomba de presión agua dulce	5	1	5
Desalinizadora (watermaker)	12	2	24
Bomba de achique	5	0,5	2,5
Luces de navegación	1	10	10
Electrónica base (plotter + ecosonda + anemómetro + AIS/VHF standby)	2	24	48
Piloto automático (navegación)	6	10	60
Radar	4	6	24
Focos de cubierta (maniobras)	2	1	2
Comunicaciones satelitales (Iridium)	1	8	8
Carga de dispositivos (móviles, laptop, iPad)	3	6	18
Entretenimiento (TV/audio)	2	4	8
Ventilación (ventiladores)	2	10	20
Galley / cocina (microondas/pequeños electrodomésticos)	30	1,55	46,5
Lavadora / herramientas / varios ocasionales	10	1	10
Consumo propio del inversor/controles (standby)	1,5	24	36

Fuente: elaborado por autor

El consumo total diario estimado asciende a aproximadamente:

$$416 \text{ Ah/día (a 48 V)}$$

Lo que equivale energéticamente a:

$$E = \frac{416 \times 48}{1000} \approx 20 \text{ kWh/día}$$

La estimación incluye cargas en corriente continua directa y cargas en corriente alterna alimentadas mediante inversor, considerando un perfil realista para navegación costera y fondeo recreativo.

4.4 Equipos complementarios: baterías, inversores, controladores y cableado

En esta sección se describen con mayor detalle los equipos complementarios del sistema solar y consideraciones específicas para su selección e integración en el catamarán.

4.4.1 Baterías (*Banco de acumuladores*)

Para el diseño del sistema híbrido fotovoltaico del catamarán se establece como criterio una autonomía mínima de 24 horas sin aporte solar, con el objetivo de garantizar el funcionamiento continuo de las cargas hoteleras en condiciones de baja irradiación o navegación nocturna.

La demanda energética diaria estimada del sistema es de 20 kWh. Sin embargo, para un dimensionamiento técnico adecuado del banco de baterías, es necesario considerar las pérdidas asociadas a los diferentes componentes del sistema fotovoltaico, tales como:

- Eficiencia del inversor (92–95%)
- Eficiencia del regulador MPPT (97–99%)
- Pérdidas en cableado y conexiones (2–3%)
- Autodescarga del banco

Adoptando una eficiencia global conservadora del sistema de:

$$\eta_{sistema} = 0.90$$

La energía corregida que debe suministrar el banco se calcula como:

$$E_{corr} = \frac{E_{demanda}}{\eta_{sistema}}$$

$$E_{corr} = \frac{20}{0.90} = 22.2 \text{ kWh}$$

Adicionalmente, debe considerarse un factor de sobredimensionamiento mínimo del 10% para compensar:

- Efectos de temperatura elevada en ambiente marino
- Degradación progresiva por ciclos de carga y descarga
- Pérdida de capacidad a lo largo de la vida útil

Por lo tanto:

$$E_{final} = 22.2 \times 1.10$$

$$E_{final} = 24.4 \text{ kWh}$$

En consecuencia, el banco de baterías debe proporcionar aproximadamente 25 kWh útiles.

Se seleccionan baterías de tecnología LiFePO₄ (litio hierro fosfato) debido a sus múltiples ventajas para aplicaciones marinas, entre las que destacan su mayor vida útil (superior a 4000 ciclos al 80% de profundidad de descarga), su alta estabilidad térmica, su bajo mantenimiento, su mejor relación peso/energía en comparación con baterías de plomo-ácido y su mayor nivel de seguridad en entornos embarcados. Asimismo, se establece un Depth of Discharge (DoD) máximo del 80%, valor recomendado para garantizar la longevidad del sistema y preservar la capacidad operativa del banco a lo largo de su vida útil.

Se propone el uso de 4 baterías LiFePO₄ de 24 V y 350 Ah cada una.

Energía nominal por batería:

$$E = V \times Ah$$

$$E = 24V \times 350Ah = 8.4 \text{ kWh}$$

Energía total nominal (4 unidades):

$$E_{total} = 8.4 \times 4 = 33.6 \text{ kWh}$$

Energía útil considerando DoD 80%:

$$E_{útil} = 33.6 \times 0.80$$

$$E_{útil} = 26.88 \text{ kWh}$$

Este valor supera el requerimiento mínimo de 24.4 kWh, garantizando margen de seguridad operacional.

Las baterías se ubicarían repartidas en ambos cascos para balance de peso, en compartimentos secos y bien sujetos (las LiFePO₄ usualmente vienen en módulos compactos con cajas de acero/aluminio). Se incluirá desconectores principales de batería y fusibles de alto amperaje a cada banco.

En el plano eléctrico del proyecto, se mostrará la interconexión del banco de baterías con los controladores solares, inversor y panel de distribución principal, asegurando que tanto la carga solar como la carga desde alternadores del motor o generador diésel del yate alimenten al mismo banco de forma coordinada. Esto evita tener sistemas separados y mejora la versatilidad (las baterías solares también servirán para servicios generales del barco).

4.4.2 Reguladores de carga (Controladores solares)

Como se mencionó, se emplearán reguladores MPPT debido a sus ventajas en extraer la máxima potencia disponible de los módulos fotovoltaicos. Un controlador MPPT rastrea constantemente el punto de máxima potencia del generador solar, ajustando electrónicamente la tensión y corriente para optimizar la entrega de energía hacia el banco de baterías. Posteriormente convierte la tensión elevada proveniente de los paneles a un nivel adecuado para la carga del banco

de 48 V, incrementando la corriente de carga con alta eficiencia. Esto contrasta con un controlador PWM, que simplemente adapta la tensión del panel a la batería perdiendo energía en forma de calor y reduciendo el rendimiento global del sistema.

En condiciones variables de operación en el mar (movimiento del bote, nubosidad parcial, ángulos solares cambiantes), el MPPT resulta fundamental para maximizar la captación energética. En sistemas bien dimensionados, el uso de MPPT puede representar mejoras de rendimiento del orden del 20–30% respecto a reguladores básicos. Además, su utilización es imprescindible cuando el arreglo fotovoltaico opera a tensiones superiores al banco de baterías, lo cual es recomendable para reducir corrientes en el lado DC y minimizar pérdidas por caída de tensión.

Selección del equipo: El campo fotovoltaico definitivo es de 5.28 kWp y el banco nominal es de 48 V. La corriente máxima teórica de carga se estima como:

$$I_{carga} \approx \frac{5280 \text{ W}}{48 \text{ V}}$$

$$I_{carga} \approx 110 \text{ A}$$

Por lo tanto, el sistema de regulación debe soportar una corriente superior a este valor, incorporando margen de seguridad. Se propone utilizar dos controladores MPPT de 60 A en paralelo o un equipo equivalente de capacidad ≥ 120 A, con grado de protección IP adecuado para ambiente marino. Dividir el campo solar en dos grupos mejora la redundancia operativa y permite manejar diferencias de orientación entre módulos ubicados en el techo y en el arco de popa.

Cada controlador se instalará lo más próximo posible al banco de baterías para reducir pérdidas en el tramo de salida DC. Se incorporarán fusibles de protección tanto en la entrada (lado paneles) como en la salida (lado baterías), además de interruptores seccionadores para mantenimiento.

Funciones adicionales: Los controladores modernos incluyen sensores de temperatura y sistemas de comunicación (Bluetooth, CAN o integración NMEA 2000), lo que permite monitoreo continuo del sistema energético del bote. En el caso de baterías LiFePO₄, la configuración típica de carga para módulos de 24 V conectados en serie hacia banco de 48 V se ajustará según especificación del fabricante, generalmente con tensión de absorción alrededor de 56–57 V y sin fase prolongada de flotación, priorizando carga controlada para preservar la vida útil del banco.

4.4.3 Inversor (Convertidor DC-AC)

El inversor seleccionado debe cubrir la carga pico simultánea de los equipos eléctricos a bordo del bote. Considerando consumos típicos como refrigeración, iluminación, bombas de agua, equipos electrónicos y pequeños electrodomésticos, se estima una potencia continua del orden de 3–4 kW, con picos breves de arranque que pueden alcanzar 5–6 kW. Se adopta un inversor de onda sinusoidal pura de 5–6 kVA a 230 V AC y 48 V DC, suficiente para cubrir los requerimientos operativos proyectados. Este margen permite soportar corrientes de arranque de motores sin comprometer la estabilidad del sistema.

Dado que el banco es de 48 V, la corriente máxima en DC a plena carga se calcula como:

$$I = \frac{5000}{48} \approx 104A$$

Este valor es considerablemente menor que el que se obtendría en un sistema de 24 V, reduciendo pérdidas y permitiendo secciones de cable más razonables.

Se seleccionará un modelo tipo “inversor/cargador” integrado, que permita conmutación automática entre alimentación externa en puerto y operación autónoma desde baterías durante navegación. Esta configuración simplifica el sistema eléctrico y garantiza continuidad de suministro.

El inversor se instalará lo más cerca posible del banco de baterías para minimizar la longitud de los conductores DC de alta corriente. Se incorporará un fusible principal tipo ANL o equivalente en el positivo DC y un interruptor de desconexión general para mantenimiento.

Se verificará que el inversor posea:

- Onda sinusoidal pura (THD < 3%);
- Protección por bajo voltaje de batería;
- Protección por sobrecarga y sobre temperatura;
- Eficiencia $\geq 94\%$.

La ventilación del equipo será adecuada para disipar el calor generado, evitando exposición directa a humedad o salinidad.

4.4.4 Cableado, conectores y protecciones

El sistema eléctrico del bote deberá cumplir criterios de seguridad aplicables a instalaciones marinas. Todos los conductores se dimensionarán para soportar al menos el 125% de la corriente máxima continua prevista y estarán protegidos mediante fusibles o disyuntores adecuados.

Cableado del campo solar: Los paneles se conectarán en strings en serie para elevar la tensión de operación y reducir la corriente en el tramo hasta el MPPT. Se empleará cable fotovoltaico certificado, resistente a radiación UV y ambiente salino, con conectores MC4. Cada string dispondrá de fusible individual en caja combinadora. La caída de tensión máxima permitida en este tramo será del 2%.

Cableado de baterías e inversor (DC de potencia): Cableado de potencia DC (baterías e inversor): Considerando corrientes del orden de 100–110 A, se seleccionarán conductores de cobre estañado con sección adecuada para mantener caída de tensión inferior al 3%. Dependiendo de la

distancia real, se estiman secciones entre 50 mm² y 70 mm² para el tramo principal. Los terminales serán prensados y protegidos con funda termoencogible anticorrosiva.

Se instalará:

- Fusible principal del banco ($\approx 150\text{--}200$ A);
- Fusibles individuales en ramas 2S2P;
- Barras colectoras DC para distribución ordenada;
- Interruptor general de batería.

Cableado de potencia DC (baterías e inversor): Considerando corrientes del orden de 100–110 A, se seleccionarán conductores de cobre estañado con sección adecuada para mantener caída de tensión inferior al 3%. Dependiendo de la distancia real, se estiman secciones entre 50 mm² y 70 mm² para el tramo principal. Los terminales serán prensados y protegidos con funda termoencogible anticorrosiva.

Puesta a tierra: Las estructuras metálicas de los paneles se conectarán al sistema común de masa del bote para evitar diferencias de potencial. El negativo DC se conectará a un único punto de referencia estructural para evitar bucles de corriente. Se incorporará protección contra sobretensiones transitorias en el lado DC del MPPT como medida preventiva ante descargas atmosféricas inducidas.

4.5 Ubicación de paneles y distribución del cableado eléctrico en el catamarán

La disposición de los módulos fotovoltaicos en el catamarán se realiza considerando criterios técnicos de captación solar, estabilidad estructural, minimización de sombras y seguridad eléctrica. Tras el análisis energético global del sistema, se establece una potencia instalada definitiva de 5.28 kWp, distribuida mediante 16 módulos fotovoltaicos monocristalinos de 330 Wp cada uno.

La potencia total del generador fotovoltaico es:

$$P_{FV} = 16 \times 330 \text{ Wp} = 5280 \text{ Wp} \approx 5.28 \text{ kWp}$$

La demanda estimada de la embarcación es de aproximadamente 20 kWh diarios. El dimensionamiento del campo fotovoltaico considera:

- Horas solares pico promedio en zona costera de Manta: 5 h/día
- Factor global de pérdidas del sistema (temperatura, suciedad, orientación variable, inversor y cableado): 0.80

La energía diaria generada se estima mediante:

$$E_{FV} = P_{FV} \times HSP \times PR$$

$$E_{FV} = 5.28 \times 5 \times 0.80$$

$$E_{FV} = 21.12 \text{ kWh/día}$$

Este valor permite cubrir la demanda energética proyectada y proporciona un margen operativo ante variaciones climáticas moderadas.

Los 16 módulos se distribuyen en dos zonas principales del catamarán:

- Techo del salón principal: Sobre la cabina central se montará un campo solar plano conformado por 12 paneles rígidos monocristalinos de 330 W cada uno (dimensiones aproximadas 1.7 x 1 m c/u, según fabricante). Esta área suele estar libre de tráfico constante y elevada respecto al nivel de cubierta, reduciendo sombras proyectadas por estructuras del bote. Los paneles se fijarán mediante soportes bajos de aluminio marino, elevados unos centímetros para permitir ventilación por debajo (esto mejora su rendimiento, pues las celdas solares generan calor y funcionan mejor cuanto más ventiladas estén). La ligera elevación también permite que el agua de lluvia escurra sin estancarse sobre la superficie del módulo. Se distribuirán en filas balanceadas cubriendo la mayor parte del techo

disponible, respetando escotillas o accesos para no bloquear iluminación natural ni obstaculizar su apertura.

- Estructura tipo arco en popa: En la parte trasera, un arco rígido en fibra reforzada o acero inoxidable soportará otros 4 paneles monocristalinos de 330 W cada uno, integrados estructuralmente en el hard-top o directamente sobre la estructura del arco. Esta sección ofrece buena exposición solar y menor probabilidad de sombras estructurales. La instalación será fija, respetando límites de altura y estabilidad de la embarcación. La disposición permitirá adecuada ventilación posterior y acceso para mantenimiento.

La instalación se realiza con inclinación baja (0° – 10°), dado que en embarcaciones no es viable utilizar estructuras inclinadas convencionales debido a restricciones aerodinámicas, estabilidad transversal y seguridad en navegación. La orientación de los paneles es fija respecto a la estructura del buque, por lo que se considera en el factor de pérdidas la variabilidad angular producto del movimiento de la embarcación. Los módulos se organizan en cadenas (strings) conectadas en serie y paralelo para adecuar la tensión al rango de operación del regulador MPPT y del banco de baterías de 48 V.

Adicionalmente, se evaluó la posibilidad de instalar paneles flexibles adheridos sobre superficies laterales del casco; sin embargo, debido a su menor rendimiento angular y a que la potencia instalada requerida (≈ 5.28 kWp) ya cubre la demanda energética proyectada del bote, se priorizan las dos zonas principales mencionadas. No obstante, los planos contemplarán la posibilidad de expansión futura del sistema si se requiriera mayor capacidad de generación.

Penetración de cubierta y recorrido de cables solares: Los cables positivos y negativos de cada string de paneles se agruparán en una caja de conexiones en el techo (una caja estanca IP67). Desde allí, bajarán al interior a través de un pasacascos (deck gland) con sello hermético,

probablemente instalado en la cara interna de un mamparo para que no haya filtraciones directas desde la intemperie. Una vez dentro, los cables solares recorrerán el interior del mamparo del techo hacia un espacio técnico cercano a la sala de máquinas o al cuarto de control eléctrico. En catamaranes, suele haber un *compartimento técnico* en uno de los cascos o en el puente, donde se ubican cargadores, inversores, etc. Se ubicará allí el controlador MPPT en un panel vertical, con fácil acceso para mantenimiento.

El controlador MPPT centralizará la entrada solar: es decir, todos los strings de paneles convergen en su entrada (podrían pasar antes por un combinador con fusibles; este combinador se situaría junto al MPPT para facilidad de servicio). Los fusibles en cada línea solar permitirán seccionarlas individualmente. Desde el MPPT sale un par de cables gruesos hacia las baterías.

Ubicación del banco de baterías: Lo ideal es situar las baterías lo más centradas posible (por peso) y bajas en el casco (bajo centro de gravedad). En muchos catamaranes, los bancos de baterías se ubican cerca de los motores en popa de cada casco o bajo el piso del salón. Dado que este es un sistema de servicio, las pondremos en un compartimento bajo el piso de la cabina o en cofres próximos a la sala de máquinas de cada casco. Podrían dividirse en dos sub-bancos (babor y estribor) interconectados en paralelo, para distribuir peso. Cada sub-banco en un cofre ventilado, con tapas de inspección. Si son baterías de litio, deben estar alejadas de calor excesivo ($>50^{\circ}\text{C}$); usualmente se evitará su instalación directa en la sala de máquinas debido a posibles elevaciones de temperatura, priorizando compartimentos interiores ventilados y protegidos de fuentes de calor excesivo. Alternativamente, un compartimento bajo una litera o en la base del mueble del salón (con ducto de ventilación pasiva) sería viable. En los planos de disposición se muestra la ubicación seleccionada: debajo del sofá del salón de estribor, un contenedor reforzado alojará 4 baterías modulares de litio LiFePO_4 de 24 V y 350 Ah cada una, configuradas eléctricamente en esquema

2S2P para conformar un banco nominal de 48 V, con fusibles en cubierta y desconectador principal accesible desde un panel lateral.

Tendido de cables de batería e inversor: Desde el banco de baterías, se enrutan los cables DC positivos y negativos hacia el inversor/cargador, que se ubicará a corta distancia. En este caso, el inversor (un Victron Quattro 48/5000, por ejemplo) se podría montar en la pared del mismo compartimento técnico donde está el MPPT, o en la sala de máquinas si está acondicionada. Se prefiere un lugar seco y no demasiado caliente; una sala de máquinas puede calentarse cuando los motores estén funcionando, pero como el inversor operará sobre todo cuando se esté a vela o fondeados (motores apagados), es aceptable. Aun así, dejar una separación y ventilación suficiente. Desde el inversor, la salida AC deberá conectarse al cuadro eléctrico principal del barco, ubicado típicamente en la consola de mando interior o en el salón. Se tenderá un cable 3 hilos desde el inversor hasta ese tablero, pasando por ductos existentes si es posible (muchos barcos tienen canalizaciones para cables eléctricos a lo largo de los mamparos). Se integrará con el sistema de switch de transferencia para elegir fuente entre “inversor” y “toma de puerto/generador”.

Distribución de cableado de control: Además de los cables de potencia, se llevarán cables de señal desde los sensores hacia los dispositivos de monitoreo en la cabina de pilotaje. Por ejemplo: un cable de bus VE.Direct o CAN desde el MPPT hasta un monitor (o a un dispositivo central tipo Cerbo GX en sistemas Victron), y desde el monitor de baterías shunt hasta un panel indicador. Estos cables son delgados y pueden agruparse y sujetarse a los mamparos altos, separados de los de potencia para evitar interferencias. Un punto de acceso conveniente es el *dashboard* del puesto de mando interior, donde podrían instalarse display del Estado de Batería (SoC) y producción solar actual. Así el capitán puede ver, por ejemplo, que los paneles están generando X kW a mediodía, las baterías al Y% de carga, etc.

Protecciones estructurales: El recorrido de los cables se hará intentando evitar zonas susceptibles de golpes o calor. En pasos a través de mamparos, se usan pasatabiques con goma para que la vibración no corte la funda. En tramos abiertos por sentina, los cables se meterán en tubos acorazados o canaletas rígidas para protección mecánica (dado que podrían estar expuestos a humedad o acumulación de agua en caso de ingreso accidental a sentina, por lo que deben ser estancos). Los paneles en la cubierta estarán conectados con cables con funda resistente a UV, pero de todas formas se fijarán con grapas o pasacables para que no queden sueltos expuestos al sol.

4.6 Tipos de estructura para montaje de paneles solares en catamaranes

La forma en que los paneles solares se fijan al barco es fundamental tanto para la eficiencia energética (orientación, inclinación) como para la integridad estructural y estética de la embarcación. Consideramos varias opciones de estructuras de montaje aplicables en catamaranes, desde soportes fijos tradicionales hasta integración arquitectónica en la propia construcción del yate:

- **Estructuras fijas sobre cubierta o techo:** Es la solución más común y directa. Consiste en instalar los paneles sobre soportes rígidos anclados a la estructura existente (techo de cabina, pasamanos, arco, etc.). Estos soportes suelen ser perfiles de aluminio o acero inoxidable conformados para sostener el panel por sus bordes o esquinas. En catamaranes de crucero, se ven a menudo marcos de aluminio atornillados al techo de la cabina, elevando ligeramente los paneles unos centímetros. La elevación fija posibilita la ventilación y a veces un pequeño ángulo (por ejemplo, inclinar los paneles 5–10° hacia popa para facilitar escurrimiento de agua y optimizar un poco la captación). Las estructuras fijas tienen la ventaja de la simplicidad y robustez – sin partes móviles que puedan fallar

en ambiente marino. Se dimensionan para resistir vientos fuertes y golpes de mar. En este diseño, los paneles rígidos del techo se montarán seguramente sobre perfiles L de aluminio remachados/atornillados a la obra muerta, calculados para resistir vientos de hasta 50 nudos en navegación (fuerza significativa). Dado que estos paneles están en horizontal, no requieren orientadores solares; simplemente se orientan al plano del techo.

- **Integración en toldos (biminis) o techos existentes:** Muchos catamaranes modernos vienen equipados de fábrica con hard-tops (toldos duros) sobre el área de bañera. Integrar paneles en ellos es sumamente conveniente: el panel puede encastrarse en la superficie del techo durante la construcción, quedando al ras (flush) y casi como parte del laminado de fibra. Astilleros como Sunreef han innovado creando paneles solares ultraligeros que se laminan sobre superficies curvas de composite, por ejemplo en un bimini de fibra de carbono. De esta manera se logra una integración estética impecable y se aprovecha cada superficie disponible. En términos estructurales, el techo mismo actúa de soporte, con el panel sellado encima. Para este proyecto, si partiéramos de un catamarán existente, podría considerarse reemplazar el tejido de un bimini de lona por un panel solar semiflexible montado sobre un sustrato rígido desmontable. Otra posibilidad es integrar paneles en las escotillas: algunas escotillas de vidrio/acrílico pueden tener paneles semitransparentes adheridos, de forma que sigan dejando pasar algo de luz.
- **Estructuras inclinables o móviles:** Para maximizar la captación solar, especialmente en travesías largas, algunos navegantes instalan paneles en soportes orientables manual o automáticamente. En un catamarán, un ejemplo puede ser paneles montados en rótulas sobre la barandilla, que se pueden inclinar hacia el sol cuando se está anclado. También existen actuadores eléctricos que podrían mover los paneles a lo largo del día (como

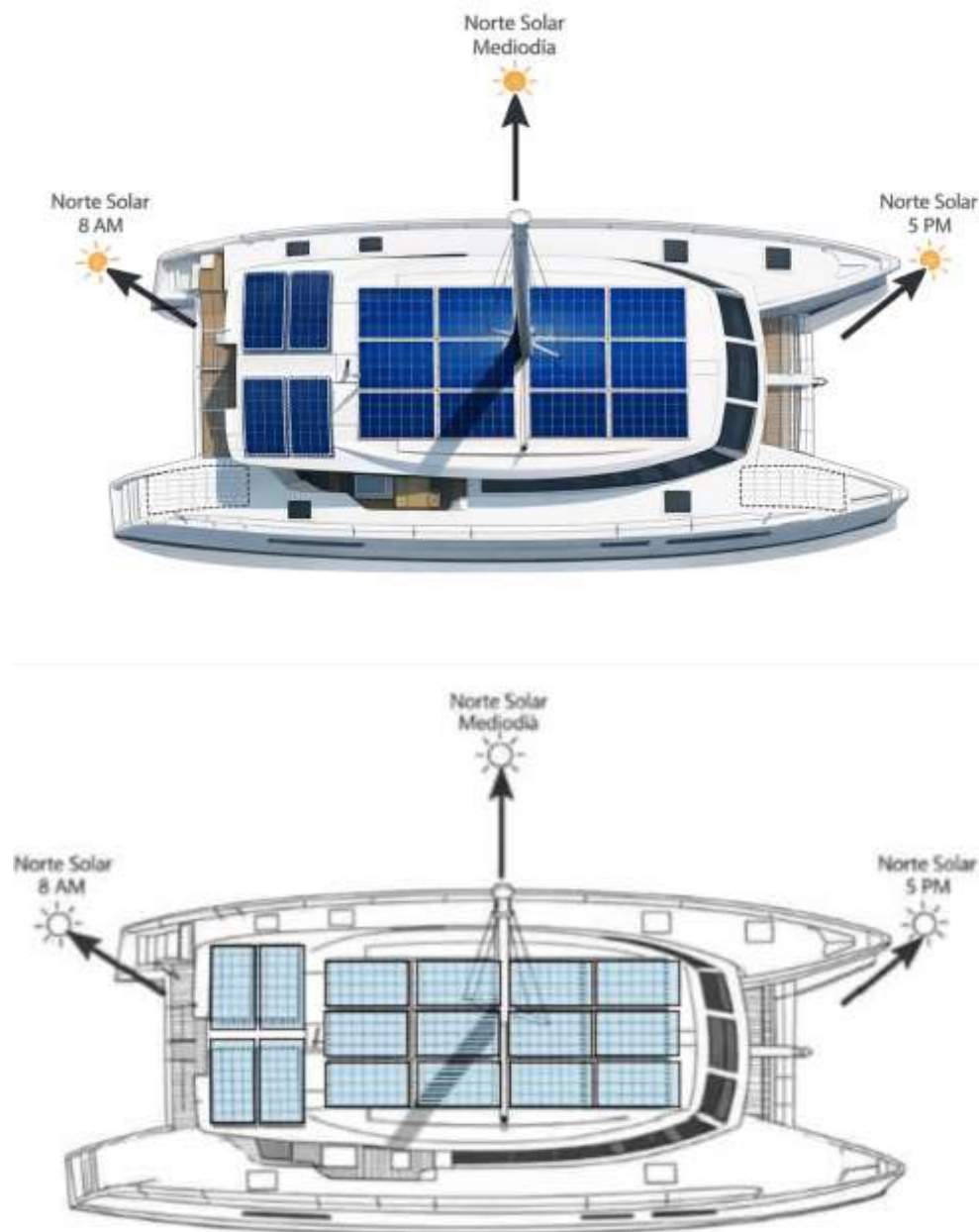
“girasol”). Sin embargo, en yates de recreo esta complejidad rara vez se emplea, porque las ganancias en energía no suelen justificar el riesgo mecánico en mar. Un soporte móvil es más susceptible a sufrir con el oleaje o a requerir replegarse durante navegación (por vientos aparentes altos). Por tanto, consideramos que el diseño planteado en este proyecto utilizará soportes fijos en la mayoría de los casos.

- **Montajes sobre vela o soluciones innovadoras:** Como se mencionó, la empresa SolarSailor desarrolló velas rígidas recubiertas de paneles solares. Estas funcionan como vela (aportan empuje) y como generador solar. En un catamarán grande con aparejo tipo wing sail, podría incorporarse esta idea. Sin embargo, es un sistema complejo y costoso que excede el alcance de un proyecto estándar de tesis. Otra idea es paneles desplegables: algunos yates tienen “alas” solares que se pliegan cuando no se usan. Por ejemplo, paneles que se extienden lateralmente en puerto para sumar área (similar a estabilizadores solares). En un catamarán de 50 m es viable diseñar alas retráctiles en las amuras con paneles, pero implican mecanismos hidráulicos o eléctricos.
- **Materiales y construcción de soportes:** Los soportes deben ser de material no corrosivo. La opción clásica es aluminio anodizado (buena relación peso/rigidez) o acero inoxidable 316 en piezas pequeñas (más resistente pero más pesado). Para integraciones flush, se usan materiales compuestos (soportes de fibra). Los pernos, tornillería y fijaciones siempre serán inoxidables, aplicando aislantes galvánicos si tocan aluminio para evitar corrosión galvánica. También es recomendable que los soportes tengan cierto give o amortiguación para vibraciones.

4.7 Planos de disposición de paneles solares y equipamientos

Figura 7

Vista superior del catamarán con disposición de paneles

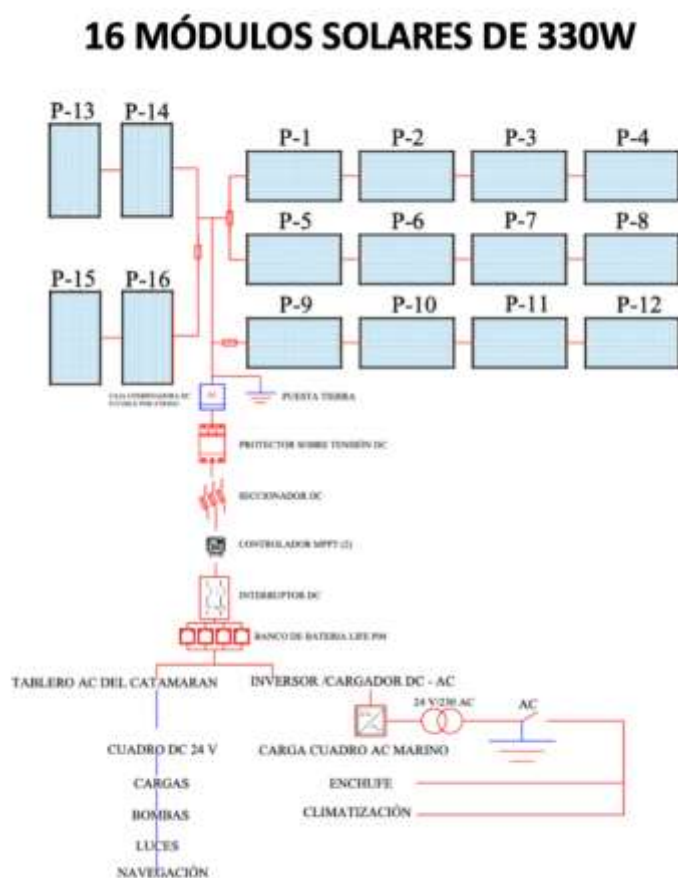


En la imagen se observan 16 paneles solares distribuidos sobre la cubierta de la embarcación: 12 paneles están agrupados en la zona central formando un bloque rectangular de 3 filas por 4 columnas, colocados simétricamente sobre la mayor superficie plana del techo del salón;

además, se presentan 4 paneles adicionales ubicados en la parte posterior de la embarcación, dispuestos en dos filas de dos paneles cada una sobre la estructura del arco de popa. Todos los paneles están instalados en posición horizontal sobre la cubierta superior, alineados con la estructura del bote y sin superponerse entre sí. El plano indica las dimensiones aproximadas del conjunto, cubriendo un área total cercana a 26–28 m² (según dimensiones comerciales de módulos de 330 W), logrando una potencia instalada total de 5.28 kWp. Flechas en el dibujo muestran la orientación solar a lo largo del día, evidenciando que los paneles horizontales presentan buena captación durante la mayor parte de las horas de irradiación; en primeras horas de la mañana y últimas de la tarde el ángulo de incidencia reduce ligeramente el rendimiento, fenómeno que ya se considera dentro del factor global de pérdidas adoptado en el dimensionamiento del sistema.

Figura 8

Esquema unifilar del sistema eléctrico solar

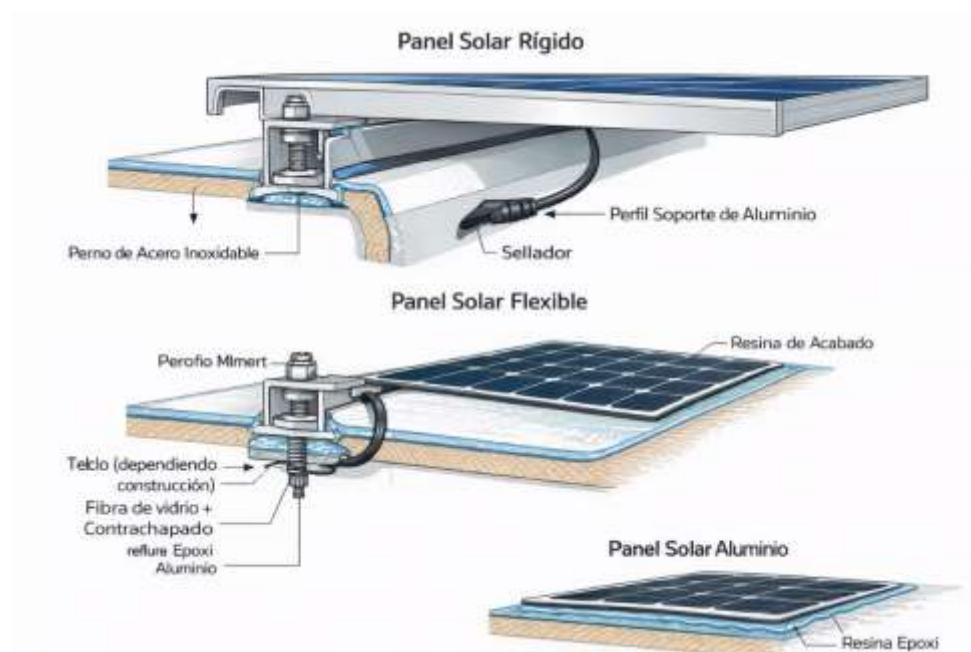


Fuente: elaborado por autor

Aquí se presenta el diagrama eléctrico formal: un unifilar mostrando paneles conectados en serie-paralelo, llegando al controlador MPPT, este al banco de baterías, y las derivaciones hacia inversor y cuadro de cargas DC. Es básicamente el circuito equivalente del sistema fotovoltaico integrado al sistema eléctrico del yate. Todo referenciado a tierra del casco. En el diagrama se incluyen símbolos de desconectores, medición (shunt del monitor de batería), y conexión con otras fuentes (alternador de motor, cargador de puerto) para reflejar que el banco de baterías es común a todas las fuentes. Este esquema sería objeto de revisión para cumplimiento de normas.

Figura 9

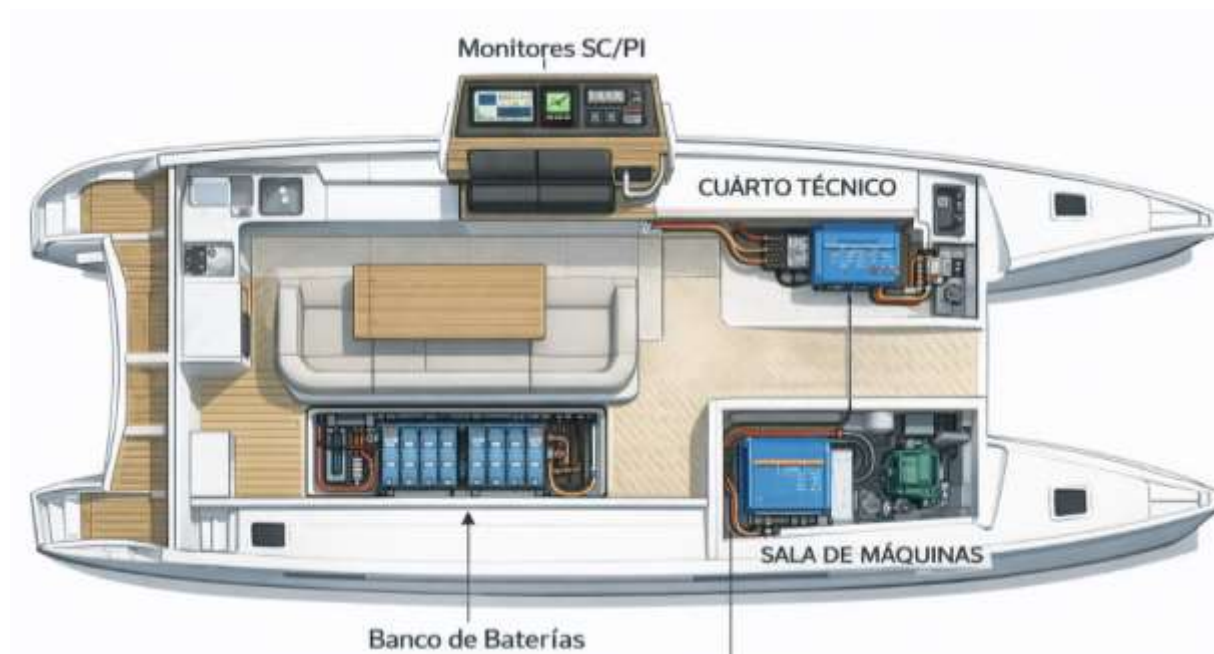
Detalle de montaje mecánico de panel (sección).



Se muestra cómo un panel solar rígido está montado sobre el techo: incluye el perfil soporte, la tornillería pasante con su sellado, las capas del techo (fibra + contrachapado o aluminio, dependiendo construcción), la posición del cable saliendo por la cara inferior del panel hacia el interior. También se muestra un panel flexible pegado en cubierta con sus capas de resina encima. Este tipo de detalle asegura que en la instalación real se apliquen los métodos correctos (por ejemplo, sellador en cada perforación, evitar montaje directamente sobre madera sin refuerzo, etc.).

Figura 10

Distribución de equipos en el interior.



Fuente: elaborado por autor

En la figura 10 se observa una vista en planta de uno de los cascos indicando dónde se sitúan: el controlador MPPT (en un mamparo del cuarto técnico), el inversor/cargador (en sala de máquinas estribor), el banco de baterías (bajo el piso del salón, centrado), los monitores (panel de control en puesto de mando). Así cualquier técnico sabe localizar cada componente físico.

4.8 Presupuesto estimado para la implementación completa del sistema

A continuación, se presenta un presupuesto referencial para la implementación del sistema solar fotovoltaico en la embarcación. Los costos están calculados a precios de mercado actuales (2025) y corresponden a un proyecto de tamaño medio (aprox. 5.28 kWp solares instalados, banco nominal 48 V con ~26.88 kWh útiles en baterías LiFePO₄), ajustables proporcionalmente a embarcaciones de aproximadamente 15 metros de eslora. Los valores se expresan en dólares estadounidenses (USD), moneda de uso común en la náutica internacional y en Ecuador (donde se

sitúa este proyecto). Cabe aclarar que es un presupuesto ingenieril estimado; para la ejecución real podría variar según proveedores, aranceles de importación y detalles específicos de instalación.

Sumando todos los rubros principales, se obtiene el siguiente costo total estimado:

Tabla 6

Presupuesto estimado

Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
Paneles solares monocristalinos 330 Wp (grado marino)	16	und	220.00	3,520.00
Estructuras de montaje (aluminio marino, herrajes inox, selladores)	1	lote	1,200.00	1,200.00
Reguladores MPPT 250V / 60A (grado marino)	2	und	750.00	1,500.00
Baterías LiFePO ₄ 24V 350Ah (~8.4 kWh c/u)	4	und	2,500.00	10,000.00
Inversor/cargador seno puro 48V ~5 kW (MultiPlus-II 48/5000 o equivalente)	1	und	2,700.00	2,700.00
Sistema de monitoreo y control (BMV-712, display, integración)	1	lote	600.00	600.00
Cableado y protecciones (marine grade, fusibles, SPD, disyuntores, barras DC)	1	lote	1,800.00	1,800.00
Mano de obra de instalación (80 h @ \$50/h)	80	h	50.00	4,000.00
SUBTOTAL				25,320.00
Contingencia (10%)				2,532.00
TOTAL GENERAL ESTIMADO				27,852.00

Fuente: elaborado por autor

Por lo tanto, se estima un presupuesto de alrededor de 27,852.00 USD para implementar el sistema solar completo en una embarcación de tamaño mediano. Este costo es comparable al de un generador diésel marino de capacidad media-alta y representa una inversión técnicamente justificada dada la mejora en autonomía energética, reducción de consumo de combustible y disminución de emisiones asociadas a la operación del bote.

4.9 Análisis financiero del proyecto: Cálculo de TIR y VAN

La inversión en un sistema de energía solar para una embarcación debe evaluarse económicamente para determinar su viabilidad financiera. Aunque la motivación principal de estos

proyectos es la sostenibilidad y la autonomía energética, resulta indispensable analizar si la reducción de costos operativos —principalmente el ahorro de combustible asociado al menor uso del generador diésel— justifica el desembolso inicial.

Para ello se aplican dos indicadores financieros fundamentales: el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), considerando un horizonte de análisis base de 10 años, acorde con la vida útil operativa del sistema sin reemplazos mayores.

Supuestos de base:

- Inversión inicial (I_0): Se adopta el monto del presupuesto total estimado para el sistema solar marino, que asciende a USD 27.862, incluyendo equipos, instalación y una contingencia del 10%. Se asume que este desembolso ocurre en el año 0.
- Ahorros anuales: El principal beneficio económico proviene del ahorro de combustible asociado a la reducción del uso del generador diésel para servicios eléctricos. Un catamarán típico de 15 m puede operar un generador de aproximadamente 5 kW, con un consumo promedio de 1–1,5 litros de diésel por hora. Suponiendo un uso sin sistema solar de 4 horas diarias durante fondeo, a lo largo de 200 días de operación anual, el consumo anual se estima mediante:

$$L_{año} = C_{gen} \times H_{día} \times D_{año}$$

donde C_{gen} es el consumo del generador (L/h), $H_{día}$ las horas diarias de uso (h/día) y $D_{año}$ los días de operación anual (días/año). Tomando un valor medio conservador $C_{gen} = 1,2$ L/h, se obtiene:

$$L_{año} = 1.2 \times 4 \times 200 = 960 \frac{L}{año}$$

Respecto al costo del combustible, el Diésel Premium en Ecuador se comercializa a USD 2,70 por galón, equivalente a:

$$P_{diesel} = \frac{2.70}{3.785} = 0.713 \text{ USD/L}$$

Por lo que el gasto anual sin sistema solar asciende a:

$$Costo_{año} = 960 \times 0.713 = 684.5 \text{ USD/año}$$

Con el sistema solar instalado, se estima una reducción del uso del generador del 80–90%, por lo tanto el ahorro anual de combustible se calcula como:

$$Ahorro_{comb} = Costo_{año} \times f_{red}$$

Para $f_{red} = 0.80$:

$$684.5 \times 0.80 = 547.6 \text{ USD/año}$$

Para $f_{red} = 0.90$

$$684.5 \times 0.90 = 616.1 \text{ USD/año}$$

En consecuencia, bajo el escenario base, el ahorro anual por combustible se ubica en el rango USD 548–616 por año (582 de promedio), dependiendo del porcentaje real de reducción del generador.

- Costos de mantenimiento: Se considera un costo de mantenimiento anual del sistema solar (limpieza de paneles, inspecciones, pequeños repuestos) del orden de USD 200/año.
- Costos de reemplazo: En un horizonte de 10 años no se consideran reemplazos mayores. Las baterías de litio suelen tener una vida útil de 12–15 años, mientras que los paneles superan los 25 años con degradación moderada.
- Beneficios intangibles: No se monetizan beneficios como reducción de ruido, mayor confort a bordo, independencia energética o atractivo comercial/ecológico en

operaciones charter, aunque estos factores pueden tener un impacto real en la rentabilidad.

Cálculo de Flujos de Caja:

- Año 0: inversión – USD 27.862
 - Ahorro anual en combustible = USD 582
 - Costo de mantenimiento solar = – USD 200
 - Flujo neto anual = + USD 382
- Año 10: Se asume un valor residual del sistema de USD 3.000, asociado principalmente al remanente de vida útil de paneles e inversor.

Con estos flujos, una inversión de USD 27.862 que genera USD 382 anuales durante 10 años (USD 3.820 acumulados), más un valor residual de USD 3.000, no logra recuperar completamente el capital invertido en el horizonte base. En este escenario conservador, el VAN resulta claramente negativo y la TIR es menor a cero, indicando que la rentabilidad estrictamente financiera es baja para un uso privado moderado. Sin embargo, el resultado puede variar al analizar escenarios alternativos con mayor intensidad de uso y/o incremento del precio del combustible.

Escenario optimista (charter intensivo)

En un contexto de operación comercial (charter turístico o expediciones), la embarcación puede operar 200–250 días/año, con mayor demanda energética. En este caso, el ahorro de combustible aumenta por mayor uso anual del generador en ausencia de FV, y adicionalmente pueden existir ahorros indirectos asociados a reducción de horas de funcionamiento del generador (menor mantenimiento y desgaste).

En un contexto de operación comercial (charter turístico o expediciones), el yate puede operar 200–250 días/año, con mayor demanda energética. En este caso, el ahorro de combustible

puede alcanzar USD 2.500–3.000/año, considerando tanto el menor uso del generador como una reducción indirecta de horas de motor auxiliar.

Bajo un ahorro neto conservador de USD 2.500/año, los flujos se vuelven atractivos y la inversión puede recuperarse dentro del horizonte de análisis.

Estudios reales de catamaranes solares en operación turística han reportado TIR del orden del 16–17% a 10 años, con VAN ampliamente positivo, confirmando que en contextos comerciales el sistema solar resulta financieramente muy competitivo.

Escenario conservador (uso esporádico)

Si la embarcación se utiliza únicamente fines de semana y vacaciones (por ejemplo 100 días/año), el ahorro en combustible disminuye proporcionalmente. En este caso, el periodo de recuperación se incrementa significativamente y la TIR es negativa, aunque el armador puede aceptar el proyecto por beneficios cualitativos (reducción de ruido, autonomía energética y confort a bordo).

Caso de análisis seleccionado: Escenario de charter intensivo

Tabla 7

Datos para escenario

Parámetro	Símbolo	Valor
Inversión inicial	I_0	USD 27 862
Flujo neto anual	CF	USD 382/año
Horizonte	n	10 años
Valor residual	VR	USD 3.000
Tasa de descuento	r	8%
$((1+r)^{10})$		2,1589

Formulación matemática del VAN

El VAN se calcula como la suma del valor presente de los ahorros anuales más el valor presente del valor residual, menos la inversión inicial: Sustituyendo los valores del caso:

$$VAN = -27.682 + \sum_{t=1}^{10} \frac{382}{(1 + 0.08)^t} + \frac{3000}{(1 + 0.08)^{10}}$$

Cálculo del valor presente de la anualidad de ahorros

El término corresponde al valor presente de una anualidad. Para una anualidad, el valor presente es:

$$VP_{anualidad} = CF \cdot \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r}$$

Aplicando:

$$VP_{anualidad} = 382 \cdot \frac{1 - (1.08)^{-10}}{0.08}$$

Con:

$$(1.08)^{10} = 2.1589 \Rightarrow (1.08)^{-10} = 0.463$$

Entonces:

$$VP_{anualidad} = 382 \cdot \frac{1 - 0.463}{0.08} = 382 \cdot 6.712 = 2\,563$$

Descuento del valor residual

El valor residual se ubica al final del periodo (año 10), por lo que se descuenta al presente:

$$VP_{residual} = \frac{VR}{(1+r)^n} = \frac{3000}{(1.08)^{10}}$$

$$VP_{residual} = \frac{3000}{2.1589} = 1.389$$

Sumando los beneficios presentes:

$$VP_{beneficios} = VP_{anualidad} + VP_{residual} = 2.563 + 1.389 = 3.952$$

Finalmente:

$$VAN = VP_{beneficios} - I_0 = 3.952 - 27.862 = -23.910$$

El VAN es negativo, lo cual indica que, bajo el escenario base y con el precio actual del diésel en Ecuador, el proyecto no recupera la inversión en 10 años desde un enfoque estrictamente financiero. Sin embargo, el resultado es sensible al horizonte de evaluación, al precio del combustible y a la intensidad de uso de la embarcación.

TIR y Payback

TIR estimada: En el escenario base, la TIR es menor a 0%, debido a que los flujos netos anuales no permiten recuperar la inversión en el horizonte de 10 años.

Periodo de recuperación (Payback simple):

$$Payback = \frac{I_0}{CF} = \frac{27.862}{382} = 73 \text{ años}$$

Tabla 8

Escenarios

Escenario	Ahorro neto anual (USD)	Payback (años)	Evaluación
Uso conservador	-20	No recupera	No viable
Uso medio	382	≈ 73	No aceptable
Charter intensivo	763	≈ 36	Marginal

CONCLUSIÓN

Tras el desarrollo del diseño del proyecto, se extraen las siguientes conclusiones técnicas sobre la implementación de paneles solares en un catamarán de recreo y su viabilidad:

- **Viabilidad técnica comprobada:** Es totalmente factible integrar un sistema fotovoltaico de tamaño significativo en un catamarán 15 m sin comprometer su operación. El diseño propuesto de 5,28 kWp solares y aproximadamente 27 kWh de almacenamiento en baterías demuestra que incluso en un yate mediano se puede cubrir buena parte de las necesidades eléctricas a bordo con energía solar. Ejemplos reales como el catamarán Solemar y el Sun21 corroboran que la tecnología funciona en entornos marinos. La ingeniería naval actual permite esta adaptación manteniendo los estándares de seguridad y confort.
- **Suficiente área disponible para paneles:** A pesar de la percepción de espacio limitado en barcos, identificamos superficies aprovechables (techo de cabina, arco de popa, etc.) que suman los metros cuadrados necesarios para una potencia apreciable. En este diseño, se cubrió gran parte del techo y toldos, logrando 26–28 m² de paneles. Con eficiencias cercanas al 20%, esta superficie permite generar la energía requerida para la hotelería del bote. No es necesario sacrificar estética ni funcionalidad, pues los paneles pueden instalarse de forma armoniosa manteniendo el perfil elegante del catamarán.
- **Impacto mínimo en peso y estabilidad:** La adición del sistema solar agrega peso, principalmente por las baterías. En este caso 300 kg de baterías LiFePO₄, más ~100 kg de paneles y estructuras. En un catamarán de 15 m (desplazamiento 15 toneladas) esto representa 2.7% de incremento, manejable con adecuada distribución. La instalación distribuida (baterías en ambos cascos, paneles centrados) evita escoras o trimado anómalo. Estructuralmente, los refuerzos para soportes de paneles son menores; el techo puede

soportar paneles fácilmente (son cargas distribuidas de $<20 \text{ kg/m}^2$). Por tanto, no se requieren modificaciones mayores al barco, solo adaptaciones menores en los puntos de montaje.

- **Rendimiento energético significativo:** Con 5,28 kWp de paneles se pueden generar en condiciones favorables alrededor de 20–22 kWh diarios (considerando 4–5 horas solares pico y pérdidas del sistema). Esto cubre consumos típicos de frigoríficos, iluminación LED, equipos electrónicos y puede contribuir a la propulsión auxiliar eléctrica si existiese. Aunque en días nublados la generación baja, el banco de baterías dimensionado provee autonomía para cubrir noches y algún día nublado. En síntesis, el sistema permitiría un fondeo tranquilo sin encender generador durante, por ejemplo, 2–3 días seguidos en clima favorable, lo cual es un logro significativo en términos de autonomía. En navegación a vela, los paneles pueden suplir totalmente consumos hotel (piloto automático, navegación, etc.) sin necesitar alternadores.
- **Reducción de ruido y emisiones:** La disminución del uso del generador reduce significativamente ruido y vibraciones a bordo. En el escenario base, el sistema permite evitar aproximadamente $960 \text{ L/año} \times 80\text{--}90\% \approx 770\text{--}860 \text{ L}$ de diésel, lo que equivale a una reducción aproximada de 2 toneladas de CO_2 anuales (considerando $2,68 \text{ kg CO}_2/\text{L}$). Esto confirma el impacto ambiental positivo del diseño y su alineación con principios de navegación sostenible.
- **Sistemas eléctricos robustos y seguros:** El diseño eléctrico detallado asegura que la incorporación del sistema no introduce riesgos ni puntos débiles. Se mantuvo la redundancia (baterías pueden cargarse también por alternadores/generador si fuese necesario). Todos los componentes seleccionados son grado marino, con protección

adecuada. La tecnología LiFePO₄ aporta seguridad intrínseca (sin riesgo de incendio explosivo en uso normal, BMS vigilando condiciones). Los inversores sinusoidales garantizan la calidad de suministro a bordo. En general, la integración es segura y estable, cumpliendo las normativas marítimas aplicables.

- **Economía de operación mejorada:** Aunque el análisis financiero actualizado muestra que la recuperación de la inversión no se alcanza en un horizonte de 10 años bajo precios actuales del diésel (USD 2,70/galón), el sistema genera un ahorro promedio de aproximadamente USD 582 anuales en combustible, además de beneficios indirectos por menor mantenimiento del generador. En entornos comerciales o con incremento futuro del precio del combustible, la rentabilidad mejora sustancialmente. Por tanto, la viabilidad económica depende fuertemente del perfil de uso y del contexto energético.
- **Limitaciones y desafíos restantes:** No obstante los puntos positivos, reconocemos algunas limitaciones técnicas. Por ejemplo, la dependencia del clima: En largas temporadas nubladas o latitudes altas, el aporte solar baja sensiblemente, y se requerirá apoyo de generador o motor (lo cual está previsto). También, la instalación requiere disciplina en operación y mantenimiento: se deben limpiar paneles periódicamente de salitre para mantener rendimiento, vigilar el estado de las baterías, y gestionar consumos a bordo para no derrochar energía. Asimismo, la potencia instalada aunque alta para lo que es solar en un barco, aún es modesta comparada con requerimientos de propulsión: no podemos pretender mover constantemente un catamarán grande solo con estos paneles (la energía solar alimenta la hotelería y quizás una propulsión eléctrica auxiliar de baja velocidad, pero no reemplaza motores diésel para travesías largas a velocidad de crucero). El proyecto

entonces se enmarca en un concepto híbrido: solar para energía auxiliar y navegación “limpia” a baja potencia.

- **Replicabilidad y escalabilidad:** El diseño propuesto es modular y podría adaptarse a varios tamaños. Hemos logrado un “blueprint” que aplica tanto a yates de recreo privados como a barcos de paseo comerciales. La escalabilidad está probada por proyectos: catamaranes solares más grandes (ej. 30 m) simplemente multiplican paneles y baterías y pueden alcanzar autonomía total en ciertos perfiles de uso. Podemos concluir que la tecnología es escalable y esta tesis sienta bases para futuras implementaciones en la flota de recreo de la región.

RECOMENDACIONES

Finalmente, se presentan recomendaciones prácticas y consideraciones finales para la puesta en marcha e implementación exitosa del proyecto de energía solar en el catamarán:

- **Selección de proveedores confiables:** Es recomendable adquirir los componentes principales (paneles, baterías, inversor, reguladores) de fabricantes con trayectoria en el sector marino o fotovoltaico de calidad. Esto garantiza soporte técnico y repuestos en el futuro. Por ejemplo, paneles de marcas especializadas en náutica (Solbian, SunPower Marine) o inversores Victron/Mastervolt. La fiabilidad de los componentes es crítica en medio del mar donde el acceso a reparaciones es limitado.
- **Instalación por profesionales náuticos:** Aunque el diseño está detallado, la ejecución debe hacerla personal capacitado en sistemas eléctricos marinos. Siguiendo planos, asegurarán conexiones correctas, y muy importante, cumplimiento de estándares (por ejemplo, separación de cables AC y DC, radios de curvatura, prensado de terminales con herramientas calibradas, etc.). Un instalador con experiencia sabrá también routear cables por canales existentes sin dañar la estructura. Se debe supervisar que todas las perforaciones en cubierta se sellen adecuadamente para evitar vías de agua.
- **Pruebas exhaustivas antes de operación:** Tras la instalación, realizar una comprobación integral del sistema: medir voltajes, probar que los reguladores cargan en los niveles esperados, que el inversor toma la carga AC sin problemas, que los fusibles disparan al sobrepasar corriente, etc. Someter el sistema a un “día de prueba” simulando consumos y verificando que los paneles sustentan la carga, y una “noche de prueba” para ver que las baterías soportan la demanda. Igualmente, probar la transición de fuentes (por ejemplo,

encender todos los consumos y luego arrancar generador de apoyo para ver conmutación).

Estas pruebas darán confianza de que todo funciona antes de una travesía importante.

- **Elaborar manual de uso y capacitación:** Es aconsejable preparar un pequeño manual para el capitán y la tripulación sobre el sistema solar. Incluir esquema eléctrico, instrucciones de cómo activar/desactivar el inversor, qué hacer en caso de alarma de batería baja, mantenimiento de rutina (limpiar paneles con agua dulce y paño suave cada cierto tiempo, verificar ventilaciones de inversor no obstruidas, etc.). También capacitarlos en gestión de la energía: por ejemplo, recomendar planificar uso de grandes consumidores (aire acondicionado, winches eléctricos) en horario diurno cuando se presenta excedente solar, y reservar las baterías nocturnas para cargas esenciales. Crear conciencia de que aunque la energía solar es renovable, sigue siendo limitada y valiosa a bordo.

BIBLIOGRAFÍA

- Abad, H. (2012). La energía renovable en el Ecuador. *Revista Alternativas*(17), 14-20.
- Alvarado, A. (2 de Octubre de 2025). *La navegación silenciosa de Kara Solar: un proyecto que apuesta a la transición energética en la Amazonía ecuatoriana*. Obtenido de <https://es.mongabay.com/2025/10/kara-solar-proyecto-transicion-energetica-amazonia-ecuatoriana/#:~:text=,en%20los%20siguientes%20diez%20a%C3%B1os>
- Arze Moreno, J. (1977). El tonelaje de los buques de comercio. *Revista de Marina*, 3, 1-16.
- BID. (2024). *Kara Solar, Despliegue de Canoas Solares en la Región Amazónica*. Obtenido de <https://www.iadb.org/es/proyecto/EC-T1577#:~:text=El%20objetivo%20de%20este%20proyecto,mantener%20y%20garantizar%20la%20infraestructura>
- British Embassy Quito. (14 de Junio de 2014). *Lanzamiento del bote con energía solar “Solaris” en Galápagos*. Obtenido de <https://www.gov.uk/government/news/launch-of-solar-energy-boat-solaris-in-the-galapagos-islands.es-419#:~:text=La%20lancha%20%E2%80%9CSolaris%E2%80%9D%20debe%20su,a%207%20nudos%20de%20velocidad>
- Carjova, K., Hilmola, O., & Tapaninen, U. (2025). Economic Feasibility and Operational Performance of Rotor Sails in Maritime Transport. *Sustainability* , 17(13). doi:10.3390/su17135909
- Cassauwers, T. (8 de Agosto de 2024). *Vientos de cambio: la nueva tecnología que dirige el transporte marítimo comercial hacia un futuro más sostenible*. Obtenido de <https://projects.research-and-innovation.ec.europa.eu/en/horizon-magazine/wind-change-new-tech-steering-commercial-shipping-towards-more-sustainable-future>

- Centramar. (12 de ENERO de 2024). *¿Cuántos tipos de yates existen?* Obtenido de <https://www.centramar.es/tipos-de-yates/#:~:text=%2A%20>
- Cerquera, O., Clavijo, M., & Vega, C. (2021). INCIDENCIA DEL CRECIMIENTO ECONÓMICO SOBRE EL DETERIORO AMBIENTAL EN AMÉRICA LATINA. *AGLALA*, 12(1), 269-288.
- Cotrina, M. (2025). *INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL*. UNIVERSIDAD DE CÁDIZ.
- David Walters Yachts. (2023). *Evolution of the modern cruising catamaran*. Obtenido de David Walters Yachts: <https://www.davidwaltersyachts.com/blog/advantages-of-modern-sailing-catamarans#:~:text=,technology%20with%20the%20comfort%20and>
- García, L., Castro, L., & Lamas, M. (2025). Feasibility and Limitations of Solar Energy Integration in Merchant Ships: A Case Study on Fire Detection Systems. *Marine Science and Engineering*, 13(5), 991. doi:10.3390/jmse13050991
- Guamán, F., & Ordóñez, J. (2017). *Estudio de la viabilidad técnica, económica y ambiental de lanchas solares para transporte en los ríos de la Amazonía sur del Ecuador [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]*. Escuela de Ingeniería Eléctrica.
- Hernández-Sampieri, R. (2017). *Concepción o elección del diseño de investigación*. México: McGraw Hill Education.
- IRENA. (2021). *Renewable energy in the marine sector: Innovation outlook*. Agencia Internacional de Energías Renovables.
- Kasaeian, A., Zarkhah, N., Dezfouli, P., & Samankan, S. (2025). A review of the applications of solar photovoltaic in marine vessels and ships. *Applied Energy*, 396(15). doi:10.1016/j.apenergy.2025.126178

López, J. (1 de Enero de 2025). *Integración de energías renovables en el transporte marítimo*.

Obtenido de <https://inspenet.com/articulo/energia-renovable-en-el-transporte-maritimo/#:~:text=La%20Agencia%20Internacional%20de%20la,el%20sector%20mar%C3%ADtimo%20para%202030>

Mateo, J. (2018). De la vela al vapor, del vapor al motor. Las transiciones en la propulsión de la navegación ultramarina en Argentina (1921-1966). *Sophia Austral*, 22.

Maverick Yachts. (12 de enero de 2020). *With the Maverick 440 Hybrid you will enjoy more silence & unlimited range*. Obtenido de <https://www.maverick.life/maverick-440-hybrid/#:~:text=13>

Olcina Lloret, R. (2022). *Siniestralidad en las embarcaciones de recreo*. UCREA.

Organización Marítima Internacional . (2020). *Fourth IMO Greenhouse Gas Study*. International Maritime Organization.

Romito, L. (2015). *Eficiencia energética y su aplicación en la industria vitivinícola*. Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería U.N. Cuyo.

SENESCYT. (2015). *Primera embarcación a energía solar se inaugura en Ecuador*. Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación.

Sharma, K., & Syal, P. (2021). A Review on Solar Powered Boat Design. *International Research Journal on Advanced Science Hub (IRJASH)*, 3(9).

Silent Yachts. (2025). *120 Series*. Obtenido de <https://silent-yachts.com/yacht/120-explorer/#:~:text=Sistema%20el%C3%A9ctrico>

Soel Yachts. (2023). *SoelCat 12*. Obtenido de Soel Yachts: <https://soelyachts.com/synew/soelcat-12/#:~:text=Length%20%2011,200%20lb>

- Sondevela. (21 de junio de 2024). *What are the parts of a catamaran?* Obtenido de <https://sondevela.com/en/what-are-the-parts-of-a-catamaran/#:~:text=,to%20control%20all%20the%20sails>
- The Boat DB. (23 de junio de 2020). *What Are the Top Characteristics of a Catamaran Hull.* Obtenido de <https://blog.theboatdb.com/what-are-the-top-characteristics-of-a-catamaran-hull#>
- Tideline Boats. (21 de noviembre de 2023). *A guide to catamarans: Exploring the beauty of twin-hull vessels.* Obtenido de <https://tidelineboats.com/a-guide-to-catamarans-exploring-the-beauty-of-twin-hull-vessels/>
- Trujillo Acosta, M. (2018). *Diseño de casco de embarcación ligera tipo canoa-kayac para uso deportivo y recreativo.* Universitat Politècnica de València (UPV).
- Volta. (21 de Septiembre de 2023). *10 razones por las que los barcos eléctricos son ecológicos.* Obtenido de <https://www.voltayachts.com/es/blog-posts/10-reasons-why-electric-boats-are-eco-friendly#:~:text=4>
- Zuraiz, R., Zamora, P., Soliz, A., Soler, D., Reyes, V., Cobos, J., & Galleguillos, F. (2025). Solar Panel Corrosion: A Review. *Molecular Scale Research of Energy Materials*, 26(13). doi:10.3390/ijms26135960