



Trabajo Fin de Grado

**AHORRO DE COMBUSTIBLE EN UN CASO DE USO DE
UN BUQUE CON FUENTES DE ENERGÍAS
RENOVABLES**

**FUEL SAVINGS IN A USE CASE OF A VESSEL WITH
RENEWABLE ENERGY SOURCES**

Para acceder al título de:

Grado en Ingeniería de Recursos Energéticos

Autor: Alejandra García Fernández

Director: Raquel Martínez Torre

Convocatoria: Septiembre

Agradecimientos

Estos 4 años no hubiesen sido posibles sin toda la gente que me ha estado apoyando día tras día:

A mis padres, por levantarme en cada caída, por apoyarme en todas las decisiones sin dudar de mí y por secarme alguna que otra lagrimilla.

A mi hermana, Carlota, por tu infinita paciencia y cariño (a veces) para explicarme las cosas una y otra vez hasta que lo entienda, por enseñarme que las cosas después de mucho esfuerzo y dedicación, siempre llegan. Has sido, eres, y serás mi mayor ejemplo a seguir.

A mi Yaya, por quererme incondicionalmente y ser la Yaya de todos.

A mis tíos, primos y Sefi por vuestro poder de arreglar un día gris con un simple ‘merienda en casa de yaya’ o un ‘venga que Sonia ha hecho lasaña para todos’. Gracias por ayudarme con este proyecto como si fuese vuestro.

A mi SMP, Juan, Hugo, Pedro, Emilio, Daniela y Gaby, por estar desde el principio, por demostrarme que no hace falta ser de toda la vida para saber que vais a estar ahí siempre. Gracias por cuidarme y animarme a dar lo mejor de mi día tras día. No sé qué hubiese hecho sin vuestro apoyo.

A mis amigas, las de toda la vida, las que me han secado todas las lagrimas de dibujo y las que han aguantado todos mis ‘Solo puedo un rato que mañana tengo parti’. Espero que sigáis a mi lado siempre.

A Lucia, Moni y Cris, por ser mis hermanas mayores de la carrera, y cuidarme en cada paso que he dado.

A mi erasmus en Gliwice, David, Pablito, María, Chipettes, Zulowit, por haberme dado el mejor año de mi vida, para madurar, aprender, conocer gente nueva y un golpe de realidad necesario. Siempre aprendiendo de vosotros.

A Fina y Fran, habéis sido el lugar donde acudir cuando ya no se podía más, siempre seréis casa, media carrera es por y gracias a vosotros.

A mi tutora Raquel, por la ayuda, la paciencia y el apoyo incondicional.

A nuestro director Manolo, por enseñarnos no solo de la topografía sino también a como se las puede llegar a ingeniar un ingeniero. Al resto de alumnos de la escuela de minas, Qemi, Edu, Dani, Carla, Pepe, Bocos, Joel, Izhak, habéis hecho de esta escuela una familia, donde sentirse acogido, y profesores, dándonos la posibilidad de ser nosotros mismos.

INDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. ALCANCE Y OBJETIVOS.....	10
2.1. ALCANCE	10
2.2. OBJETIVOS	10
2.2.1. Objetivos del Trabajo	10
2.2.2. Objetivos del Proyecto.....	11
3. ESTADO DEL ARTE.	12
3.1. CLASIFICACIÓN DE BUQUES ACTUALES	12
3.1.1. Características generales	12
3.1.2. Perfiles de consumo [5]	15
3.2 ENERGIAS RENOVABLES APLICABLES A BUQUES.....	19
3.2.1 Energía eólica.....	19
3.2.2. Energía solar	20
3.2.3. Energía undimotriz	24
3.2.4. Energía del hidrógeno	24
4. METODOLOGÍA.....	26
4.1. SELECCIÓN DE BUQUE.....	26
4.1.1. Características generales	26
4.1.2. Análisis del gasto energético actual.....	28
4.1.3. Rutas típicas y perfil operativo	30
4.2. SELECCIÓN DE MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO.....	38
4.2.1. Paneles fotovoltaicos.....	38
4.2.2. Selección de inversores y circuito de cableado.....	42
4.3. SIMULACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO.....	47
4.3.1. Producción energética mensual	48
4.3.2. Cálculo de autoconsumo	48
4.3.3. Cálculo de la energía a cubrir por combustible.....	49
4.4. COMPARATIVA	49
4.5. ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL Y REDUCCIÓN DE EMISIONES	50

4.6.	ANÁLISIS ECONÓMICO	51
5.	RESULTADOS.....	53
5.1.	SELECCIÓN DE BUQUE.....	53
5.1.1.	Análisis del gasto energético actual.....	53
5.2.	SELECCIÓN DE MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO.....	53
5.2.1.	Paneles fotovoltaicos.....	53
5.2.2.	Selección de cableado y soportes	56
5.3.	SIMULACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO.....	61
5.3.1.	Producción energética mensual.....	61
5.3.2.	Consumo mensual.....	65
5.3.3.	Cálculo de autoconsumo	66
5.3.4.	Cálculo de la energía a cubrir por combustible.....	67
5.4.	COMPARATIVA	68
5.5.	ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL Y REDUCCIÓN DE EMISIONES	75
5.6.	ANÁLISIS ECONÓMICO	76
6.	CONCLUSIONES.....	78
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	79

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representación de los seis tipos de buques (de arriba a abajo, izquierda derecha): Portacontenedores, multipropósito, petrolero, granelero, porta vehículos y buque de crucero[4].	15
Figura 2: Emisiones totales de CO2 del transporte marítimo y del transporte marítimo internacional basado en viajes y buques 2012-2018 (millones de toneladas)	18
Figura 3: Buque siendo propulsado adicionalmente con una cometa	20
Figura 4: Buque siendo propulsado adicionalmente por una vela rígida [6]	20
Figura 5: Buque “Auriga Leader” (NYK Line) con paneles solares de 40 kW	21
Figura 6: Ejemplo de panel monocristalino (Fuente: Autosolar)[8].	22
Figura 7: Ejemplo de panel de capa fina [9].	23
Figura 8: Buque de la empresa Magallanes Renovables de aprovechamiento de las corrientes marinas para extraer energía mareomotriz.	24
Figura 9: Buque ,Hydroville,, ferry con celdas de combustible.	25
Figura 10: Viabilidad de tecnologías renovables por tipo de buque (Fuente: elaboración propia).	25
Figura 11: Medidas de eficiencia energética - cuadro recapitulativo (Fuente:DNV).	26
Figura 12: Aclaración de partes del Buque de Estudio cochero (Fuente: Elaboración propia).	27
Figura 13: Puerto de Raos en Santander (Fuente: GoogleMaps)	31
Figura 14: Gráfica representativa de la irradiación solar mensual del puerto de Raos en el año 2023 (Fuente: PvGIS)	31
Figura 15: Gráfica representativa de la temperatura media mensual en el puerto de Raos en el año 2023 (Fuente: PvGIS)	32
Figura 16: Kirol Portua, San Sebastián (Fuente: GoogleMaps)	33
Figura 17: Gráfica representativa de la irradiación solar mensual del Kirol Portua en el año 2023 (Fuente: PvGIS)	33
Figura 18: Gráfica representativa de la temperatura media mensual en el Kirol Portua en el año 2023 (Fuente: PvGIS)	34
Figura 19: Floating Harbour, Bristol (Fuente: GoogleMaps)	35
Figura 20: Zoom Floating Harbour, Bristol (Fuente: GoogleMaps)	35
Figura 21: Gráfica representativa de la irradiación solar mensual del Floating Harbour en el año 2023 (Fuente: PvGIS)	36
Figura 22: Gráfica representativa de la temperatura media mensual en el Floating Harbour en el año 2023 (Fuente: PvGIS)	36

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

Figura 23: Mapa donde se ubican los dos puntos seleccionados de la ruta en mar abierto (Fuente: MarineTraffic)	37
Figura 24: Plano de las dimensiones libres para instalar los paneles fotovoltaicos junto a sus baterías correspondientes (Fuente: Elaboración propia).....	39
Figura 25: Boceto cambio de plano para el cálculo de las sombras (Elaboración propia)	40
Figura 26: Tipo de disposición horizontal de los paneles en un área ejemplo	41
Figura 27: Tipo de disposición vertical de los paneles en un área ejemplo.....	42
Figura 28: Explicación ilustrativa del recorrido que sigue la energía desde los paneles solares hasta los sistemas auxiliares [14].	43
Figura 29: Representación de las dimensiones del área 1 teniendo en cuenta la sombra del puente.....	54
Figura 30: Inversor a utilizar en la instalación Huawei SUN2000-100KTL-M1	57
Figura 31: Conductor de cobre tipo RZ1-K ,General Cable, [18]	61
Figura 32: Gráfica representativa de la producción de energía estimada en el Puerto de Raos (Fuente: PVGIS).....	62
Figura 33: Figura 29: Gráfica representativa de la producción de energía estimada en el Kirol Portua (Fuente: PVGIS)	62
Figura 34: Figura 29: Gráfica representativa de la producción de energía estimada en el Floating Harbour (Fuente: PVGIS)	63
Figura 35: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en ENERO del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab).....	69
Figura 36: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en FEBRERO del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)	70
Figura 37: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en MARZO del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab).....	70
Figura 38: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en ABRIL del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab).....	71
Figura 39: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en MAYO del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab).....	71
Figura 40: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en JUNIO del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab).....	72
Figura 41: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en JULIO del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)	72

Figura 42: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en AGOSTO del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab).....	73
Figura 43: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en SEPTIEMBRE del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)	73
Figura 44: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en OCTUBRE del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)	74
Figura 45: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en NOVIEMBRE del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)	74
Figura 46: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en DICIEMBRE del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)	75

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Consumo medio diario de cada elemento auxiliar del Buque de Estudio	29
Tabla 2: Tabla de horas solares pico promedio mensuales en el Puerto de Raos (Fuente: PVGIS)	32
Tabla 3: Tabla de horas solares pico promedio mensuales en el Kirol Portua (Fuente: PVGIS)	34
Tabla 4: Tabla de horas solares pico promedio mensuales en el Floating Harbour (Fuente: PVGIS).....	37
Tabla 5: Tabla de horas solares pico promedio mensuales en el P1 y P2 (Fuente: PVGIS)	38
Tabla 6: Ficha técnica del panel solar Longi	39
Tabla 7: Tabla guía identificación de referenciación de IP [15].	45
Tabla 8: Resumen ficha técnica paneles Longi LR5-72HPH-530M	46
Tabla 9: Media anual HSP de la ruta Santander-San Sebastián-Bristol	47
Tabla 10: Tabla de resultados de la cantidad de paneles que pueden caber en cada área según la disposición.....	56
Tabla 11: Ficha técnica del inversor	57
Tabla 12: Resumen ficha técnica paneles Longi LR5-72HPH-530M	59
Tabla 13: Tabla resumen del cálculo de secciones por ambos métodos	61
Tabla 14: Ejemplo de tabla que exporta el software PVGIS acerca del rendimiento medio mensual en el Puerto de Raos (Fuente: PVGIS).....	63
Tabla 15: Producción mensual y total de las tres localizaciones a estudiar de la ruta del año 2019-2023 (Fuente: Elaboración propia).....	64
Tabla 16: Media de energía producida mensualmente en los tres puertos del 2019 al 2024	65
Tabla 17: Tabla comparativa del consumo de la ruta total y mensual en el año 2023 (Fuente: Elaboración propia).....	65
Tabla 18: Calculo de los autoconsumos mensuales de cada localización	66
Tabla 19: Tabla de resultados de los cálculos de la energía necesaria a cubrir por combustible mensualmente en los tres puertos.....	67
Tabla 20: Presupuesto al compuesto de todos los elementos de la instalación fotovoltaica	76
Tabla 21: Calculo de la rentabilidad del proyecto	76

1. INTRODUCCIÓN.

El transporte marítimo es actualmente el medio de transporte del que más depende el comercio mundial, concretamente, el 90% del mercado. Entre otros factores, esto se debe a su efectividad en costos transportando materia prima, como, por ejemplo, petróleo o gas, su gran capacidad de carga, pudiendo transportar toneladas de carga de una sola vez o por su gran resiliencia en crisis mundiales como la pandemia o el bloqueo del Canal de Suez. Sin embargo, pese a que ser el transporte más eficiente en emisiones por tonelada transportada, frente a otros medios como la aviación o el transporte terrestre, sigue teniendo un gran impacto ambiental en nuestro planeta debido a la gran cantidad de carga movilizad[a][1].

Actualmente las principales fuentes de emisiones en transporte marítimo son cinco. El dióxido de carbono (CO_2) producido por la quema de combustibles fósiles como el fueloil pesado (HFO). El metano (CH_4), gas de efecto invernadero veinticinco veces más potente que el CO_2 , que directamente se libera a la atmósfera sin quemar, a consecuencia del uso del gas natural licuado. Este fenómeno se llama *methane slip*, y ocurre porque los motores actuales no queman el gas completamente[2]. Otra fuente de emisiones son el óxido de azufre (SO_2), provenientes del alto contenido de azufre en los combustibles marinos obteniendo como resultado la lluvia ácida, y el óxido de nitrógeno (NO_2) causando también contaminación en el aire y contribuyendo al calentamiento global. Por último, destacaría el material particulado (PM), definiéndose como pequeñas partículas en suspensión que afectan a la calidad del aire y a su vez a la salud humana.

No todos los buques marítimos producen la misma cantidad de emisiones, por ello, en este trabajo seleccionaré un tipo de buque óptimo para la incorporación de energías renovables a su estructura, como búsqueda de un ahorro en combustible y a su vez una disminución de la cantidad de emisiones emitidas a la atmósfera. Así mismo, se dejará constancia de qué energías renovables no se considerarían aptas para el proyecto, ya sea por su eficiencia, método de instalación, coste o mantenimiento.

2. ALCANCE Y OBJETIVOS.

2.1. ALCANCE

Mediante el presente trabajo se expone un estudio sobre la viabilidad técnico-económica de la integración de energías renovables en un Buque de Estudio, con el objetivo principal de reducir significativamente el consumo de combustible fósil mediante la cobertura parcial o total de la demanda de potencia auxiliar, tanto en puerto como durante la navegación.

Para ello, se realiza primero un análisis comparativo de las diferentes opciones de generación de energía renovable que pueden aplicarse en el entorno marino, valorándose factores como la eficiencia de cada sistema, los costes de instalación y mantenimiento, la facilidad para integrarlo en la estructura del buque y su adaptación a las condiciones de la ruta que sigue el barco.

Una vez determinada la tecnología más adecuada se selecciona un buque tipo cuya geometría, perfil operativo y disponibilidad de superficie permitan una integración efectiva de dicha tecnología. A partir de ello, se diseña la instalación renovable adaptada a dicho buque, incluyendo el dimensionamiento, selección de equipos y evaluación de producción energética estimada.

El diseño de la instalación se basará únicamente en la elección del inversor junto la sección del cableado puesto que este proyecto es un estudio de ahorro y no un proyecto de ejecución de una instalación fotovoltaica.

Finalmente, se compara el desempeño energético y económico del buque con y sin el sistema renovable, estimando el ahorro de combustible, la reducción de emisiones y el retorno de inversión asociado a la implementación del sistema

2.2. OBJETIVOS

2.2.1. Objetivos del Trabajo

El principal objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad técnica, energética y ambiental de implementar un sistema de generación de energía renovable a bordo de un Buque de Estudio de tipo cochera, con el fin de alimentar parte de su demanda auxiliar y reducir así el consumo de fuelóleo pesado (HFO).

- *Estudio sobre la viabilidad técnico-económica de la integración de energías renovables en un Buque de Estudio*
- *Análisis del perfil de consumo energético auxiliar del buque, considerando los principales sistemas consumidores (purificadoras, ventilación, iluminación...) y estableciendo un reparto horario basado en un perfil de consumo diario*
- *Determinación de la energía producida por el medio renovable seleccionado aprovechable por el buque, comparando generación y demanda horaria, para establecer la cobertura de autoconsumo posible en condiciones reales de operación.*
- *Cuantificar la producción energética total en la ruta Santander-San Sebastián-Bristol a partir de datos meteorológicos reales de cinco años.*
- *Cálculo de la reducción de emisiones de CO₂ anual asociada a la disminución del consumo de HFO, considerando un factor de emisión oficial de 3,114 kg CO₂/kg de combustible, siguiendo las directrices de la Organización Marítima Internacional.*
- *Evaluación del impacto ambiental y normativo del sistema propuesto en el contexto de las actuales políticas de descarbonización marítima.*
- *Análisis de la rentabilidad del sistema seleccionado instalado, estimando el ahorro económico derivado de menor consumo de combustible frente a los costes de inversión y mantenimiento.*

2.2.2. Objetivos del Proyecto

El objetivo principal del proyecto es proporcionar una herramienta de evaluación integral de potencial de la energía utilizada como medida de eficiencia energética para buques de tipo Ro-Ro con servicios auxiliares eléctricos significativos, contribuyendo a una transición hacia un transporte marítimo más sostenible.

3. ESTADO DEL ARTE.

3.1. CLASIFICACIÓN DE BUQUES ACTUALES

Los buques se pueden clasificar según diversos factores; tipo de carga, consumo, tamaño, eficiencia, capacidad, etc. Para contextualizar el proyecto, en primer lugar, se definen los tipos de buques haciendo referencia a sus características principales para posteriormente hacer una clasificación según sus perfiles de consumo.

3.1.1. Características generales

Los buques pueden clasificarse en diversas categorías según su propósito y diseño, pero uno de los criterios más relevantes es el tipo de carga que transportan. A continuación, se describirán las principales tipologías de buques según su carga. Esto permitirá contextualizar el impacto de las fuentes de energía renovables en la navegación moderna y cómo pueden optimizarse según el perfil de cada tipo de embarcación.

- *Buques Graneleros (Bulkcarrier)[3]*

Transportan cargas secas a granel (carbón, mineral, cereales) de manera simple, caracterizados principalmente por hacer largas esperas en puerto.

Al ser una carga densa, este buque destaca por llevar una altura sobre el agua baja, cuando este se encuentra cargado en su totalidad.

Su estructura y sistemas están optimizados para maximizar la eficiencia en la carga, transporte y descarga de la carga.

Existen diferentes categorías de buques graneleros según su tamaño y capacidad de carga:

- **Handy Size:** 10,000 - 39,999 toneladas de peso muerto.
- **Handy Max:** 40,000 - 59,999 toneladas de peso muerto.
- **Panamax:** 60,000 - 99,999 toneladas de peso muerto (máximo tamaño permitido para el Canal de Panamá).
- **Capsize:** Más de 100,000 toneladas de peso muerto.

- *Buques Petroleros (Tankers)[4]*

Transportan carga líquida a granel de crudo de petróleo o productos refinados derivados de este. Destacan factores importantes de seguridad en su diseño, como el doble casco para reducir el riesgo de derrames y un sistema de bombeo formado por bombas centrifugas de alta capacidad para la carga y descarga rápida y eficaz de la carga.

Los buques petroleros siguen rutas estratégicas que conectan los principales centros de producción con los mercados de consumo. Además de estas rutas, estos buques operan bajo sistemas de fletamento

- Clasificación por tamaño:
 - o Aframax: 80,000 - 125,000 toneladas de peso muerto.
 - o Suezmax: 125,000 – 200,000 toneladas de peso muerto.
 - o VLCC (Very Large Crude Carrier): Más de 300,000 toneladas de peso muerto.
 - o ULCC (Ultra Large Crude Carrier): Más de 500,000 toneladas de peso muerto.

- *Buques Gaseros (Gas Tankers/Carriers)[1]*

Estos buques pueden transportar distintos gases licuados como gas natural licuado (LNG), metano o gas licuado del petróleo (LPG). Para este tipo de buques, es necesario el proceso de reliquefacción, que se basa en un método de conversión de un gas ya evaporado, a líquido mediante enfriamiento y compresión. Dicho gas licuado se transporta a -162 °C para mantenerlo en estado líquido. Este proceso es necesario debido a pequeñas evaporaciones producidas durante el transporte del gas, que podrían generar presión en los tanques. A este otro fenómeno se le llama *boil-off gas*, (BOG).

- Proceso de reliquefacción: El gas evaporado (BOG) se comprime, lo que aumenta su temperatura para posteriormente enfriarse a -162 °C mediante intercambios de calor y sistemas de refrigeración. Finalmente, el gas vuelve al estado líquido y se reinyecta al tanque de carga.

Pese a que este tipo de buques albergan una gran magnitud, su carga es de menor densidad.

Estos buques utilizan tanques de membrana, esféricos o independientes con aislamiento térmico avanzado para evitar pérdidas de carga. Su propulsión generalmente es basada en gas natural empleando el Boil-off para mayor eficiencia. Además, cuentan con sistemas de seguridad como detección de fugas, inertización y control de presión para garantizar operaciones seguras.

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

- *Buques Porta vehículos (PCTC) [3]*

También denominados, cocheros, debido a su tipo de carga, Transportan desde vehículos de 4 ruedas, hasta camiones de más de 12 metros. Su estructura destaca por tener varias cubiertas a modo de aparcamiento para estos vehículos y amortizar el máximo espacio posible. Sus rutas son mixtas y dispone de una gran maniobrabilidad.

Debido a su función de aparcamiento de vehículos, su estructura es tipo ,caja, con una altura sobre el nivel de flotación del casco alta.

A diferencia de los gaseros, la carga de estos buques es muy voluminosa, en comparación a su peso ya que son relativamente ligeros.

- *Buques de pasaje[3]*

Los buques de pasaje están diseñados para el transporte de pasaje, ya sea en rutas cortas, viajes transoceánicos o cruceros turísticos. Se clasifican en varias categorías según su función y diseño:

- Transbordadores (ferries): Operan en rutas cortas, transportando pasajeros y, en muchos casos, vehículos. Pueden ser monocascos o catamaranes de alta velocidad.
- Cruceros: Diseñados para el turismo, con múltiples comodidades como restaurantes, teatros, piscinas y áreas de entretenimiento.
- Transatlánticos: Históricamente utilizados para viajes de larga distancia, aunque hoy en día han sido reemplazados en gran medida por los cruceros.
- Buques Ro-Pax: Combinan transporte de pasajeros con carga rodada, como camiones y automóviles.

- *Buques Portacontenedores (Containership)[4]*

Los buques portacontenedores son diseñados para transportar carga en contenedores intermodales, optimizando el espacio y la eficiencia logística. Se clasifican según su capacidad en TEUs (Twenty-foot Equivalent Units), que representan contenedores de 20 pies.

- Tipos de portacontenedores
 - o Feeder: Pequeños, con capacidad de hasta 3,000 TEUs, utilizados en rutas cortas.

- Panamax: Diseñados para cruzar el Canal de Panamá, con capacidad de hasta 5,000 TEUs.
- Post-Panamax: Superan los 5,000 TEUs y operan en rutas internacionales.
- Ultra Large Container Vessels (ULCV): Los más grandes, con capacidad de más de 18,000 TEUs.

Transportan contenedores normalmente en rutas regulares de larga distancia a una velocidad medianamente alta, entre 20 y 25 nudos que equivale a 37/46 km/h para portacontenedores de tamaño medio mientras que los buques más grandes podrían alcanzar incluso los 30 nudos.



Figura 1: Representación de los seis tipos de buques (de arriba a abajo, izquierda derecha): Portacontenedores, multipropósito, petrolero, granelero, porta vehículos y buque de crucero[4].

3.1.2. Perfiles de consumo [5]

El perfil de consumo depende de muchos factores tanto internos como externos. Como factores internos se puede destacar que porcentaje de la estructura total del buque se encuentra por encima de la línea de flotación, su carga total, al igual que el propio peso del carguero teniendo en cuenta que realizará rutas sin carga y con carga. En buques como los cruceros, se tienen en cuenta también los servicios adicionales o, extras, como factor interno para el perfil de consumo. Respecto a lo factores externos, el tipo de rutas que realizan los buques están directamente relacionadas con la velocidad que alcanza el mercante, el tiempo de entrega de mercancías y esperas en puerto, así como el tipo de

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

clima que frecuentan las rutas ya que el consumo no va a ser el mismo en aguas tranquilas o si se somete la estructura a temporales marítimos.

Para optimizar el consumo de combustible, muchos portacontenedores no navegan a su velocidad máxima posible, sino a la más eficiente en términos de consumo de combustible por tonelada transportada.

Además de los factores externos e internos, para hacer un análisis más profundo se estudia en cada tipo de buque, el tipo de combustible usado, el consumo típico en toneladas días (ton/día) y su eficiencia relativa.

El consumo auxiliar es independiente del motor principal que consume combustible para la propulsión. En puerto a veces se usa, cold ironing, es decir, conexión eléctrica a tierra para suplir esta demanda y evitar emisiones. Por ello, a la hora de calcular el consumo eléctrico, se diferencian dos tipos de consumo, la potencia de auxiliares y la potencia total que serían auxiliares y propulsión.

- *Buques graneleros*

Este tipo de buques se caracteriza por tener una alta demanda en navegación lo que conlleva largas esperas en puerto, sin embargo, en esta última el consumo es relativamente bajo puesto que se encuentra atracado con motores apagados la mayor parte del tiempo. Son barcos muy eficientes en términos de energía/tonelada debido a su navegación de velocidad reducida (12-14 nudos). Son muy sensibles al calado y estado del mar por lo que el tipo de rutas influirán de manera significativa en el consumo de este. A pesar de su bajo consumo, los combustibles empleados no son de los más limpios del mercado, ya que utilizan por lo general combustibles pesados como HFO o VLSFO, con muy bajo contenido de azufre por el contrario siendo así mucho más limpio que el tradicional. El consumo típico como ya hemos comentado es bastante bajo rondando los 60-90 ton/día en buques grandes y los 30-50 ton/día en buques más pequeños.

En graneleros el consumo eléctrico esta entre 0,5 y 3 MW lo que sería una potencia total de 10-25 MW, el cual puede ascender en caso de que el buque disponga de grúas propias.

- *Petroleros y gaseros (LNG Carriers)*

Los petroleros disponen de rutas estables y de trayectos largos por lo que su consumo es constante, pero con un requerimiento energético alto. En cambio, los gaseros son barcos más especializados con un potencial de eficiencia significativamente alto, debido a la gran cantidad de calor residual y por ende el uso de a reliquidación, además de ser altamente tecnológicos.

Ambos cargueros utilizan, al igual que en los graneleros, combustible pesado HFO y VLSFO, pero en el caso de los gaseros también usan parte de su carga como combustible (boil-off gas). En el caso de los petroleros su consumo típico es de 80-100 ton/día, mientras que en los gaseros llega a 130-180 ton/día.

En este caso, debido a las bombas de carga muy demandantes durante su actividad el consumo eléctrico es de 1-5 MW y que en total asciende a los 10-30 MW.

- *Buques Ro-Ro (PCTC)*

Estos buques portadores de vehículos no son los mercantes más eficientes en relación peso/energía, pero sí en operaciones logísticas. Requieren de un alto consumo energético debido a su demanda en maniobras a parte de la carga y descarga de los contenedores. Realizan trayectos específicos por lo que la velocidad de navegación se mantiene constante, convirtiéndose así, en buques más eficientes, sin embargo, este fenómeno se contrarresta con la estructura de este, ya que, al ser de tipo, caja, ejerce más resistencia al viento. En referencia a los combustibles utilizados, como es lo común, se utilizan de nuevo combustibles pesados HFO, además de MGO o combinaciones, e incluso exploran LNG o metanol. Un buque que transporta aproximadamente 6.500 vehículos podría llegar a consumir 30-60 ton/día.

El consumo eléctrico es de entre 2 y 6 MW, debido a la ventilación de las cubiertas, rampas, ascensores, etc. lo cual asciende a 15-30 MW si contamos la propulsión de este.

- *Buques de crucero*

Parecido al buque porta vehículos en cuanto a consumo debido a su similar estructura, sin embargo, debido a que se tiene la certeza que la mayor parte de la estructura se encontrara por encima de la línea de flotación, su diseño es más aerodinámico. El combustible utilizado para este tipo es MGO, VLSFO, cada vez más el LNG e incluso algunos están realizando pruebas con metanol y su consumo aproximado es de 120/250 toneladas por día, con una velocidad de 18-22 nudos. Además de su consumo debido al transporte, el hecho de ser un buque destinado al ocio hace que su demanda de energía auxiliar llegue a unos niveles altos.

Su consumo eléctrico es parecido al de una ciudad pequeña de 20.000 habitantes ya que se abastece hostelería, entretenimiento, cocinas, lavanderías... lo que deja un consumo auxiliar de 8-20 MW y un consumo total de hasta 25-70 MW

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

- *Portacontenedores*

Al igual que los graneleros, dispone de una alta demanda de consumo energético, además de estable y predecible ya que es perfecto para la recuperación de calor residual (WHR- Waste Heat Recovery). Navega a velocidades más altas (20-25 nudos) siempre priorizando la eficiencia energética. También incorporan sistemas de propulsión optimizada puesto que son muy sensibles a la velocidad, los pequeños aumentos generan un gran incremento en consumo por efecto cúbico. por ese motivo a veces se reduce la velocidad para ahorrar consumo fenómeno que se conoce como, slow steaming. El combustible principalmente utilizado es el fueloil pesado (HFO) aunque muchos usan VLSFO, LNG el gas natural licuado mencionado anteriormente o dual-fuel para los que dispongan de motores de doble combustible. Los consumos típicos dependen del tamaño del container; en estructuras grandes llegaría a los 200-300 ton/día, mientras que en estructuras pequeñas tan solo alcanzaría los 100-200 ton/día.

Su consumo eléctrico depende principalmente de la refrigeración de los contenedores la cual es muy demandante, por ese motivo, su consumo auxiliar suele ser de entre 1 y 6 MW mientras que su consumo total es de 30-80 MW[1].

Cabe destacar, que todos los datos de consumo son aproximados debido a los grandes factores de los que dependen las cifras; carga real, ya que el mercante puede estar en plena carga o en lastre; la edad del buque; el tipo de motor, sistemas eléctricos y por último la velocidad operativa.

Year	Global anthropogenic CO ₂ emissions	Total shipping CO ₂	Total shipping as a percentage of global	Voyage-based International shipping CO ₂	Voyage-based International shipping as a percentage of global	Vessel-based International shipping CO ₂	Vessel-based International shipping as a percentage of global
2012	34,793	962	2.76%	701	2.01%	848	2.44%
2013	34,959	957	2.74%	684	1.96%	837	2.39%
2014	35,225	964	2.74%	681	1.93%	846	2.37%
2015	35,239	991	2.81%	700	1.99%	859	2.44%
2016	35,380	1,026	2.90%	727	2.05%	894	2.53%
2017	35,810	1,064	2.97%	746	2.08%	929	2.59%
2018	36,573	1,056	2.89%	740	2.02%	919	2.51%

Figura 2: Emisiones totales de CO₂ del transporte marítimo y del transporte marítimo internacional basado en viajes y buques 2012-2018 (millones de toneladas) [1]

3.2 ENERGÍAS RENOVABLES APLICABLES A BUQUES

Una vez que se hace el estudio de consumo, se identifica de que otras fuentes de energía disponen los mercantes. Ya no solo para abastecer el consumo de la potencia auxiliar, sino que también se puede recurrir a ellas para ahorro de combustible a la hora del arranque del motor.

3.2.1 Energía eólica

Esta fuente de energía es proporcionada por diversas infraestructuras dependiendo del tipo de buque. En el caso de graneleros las cometas o *kites* son la opción más acertada, su simple instalación y una reducción de 10-30% de consumo en potencias auxiliares hace que sea la opción eólica más eficiente. Sin embargo, esta opción es muy dependiente del viento y complica las maniobras. Para los cruceros las velas rígidas son la mejor opción ya que ahorran entre un 5-20% de combustible, y no produce emisiones, pero también requiere mucho espacio en cubierta y su altura influye a la estabilidad del barco. Otra opción existente es el rotor flettner o *rotating cylinders* usado sobre todo en buques Ro-Ro, tienen un peso adicional elevado y en algunos casos se generan interferencias con la carga, pero tiene una reducción de consumo probada comercialmente de entre 5-15 %. [6]. Por último, las turbinas eólicas embarcadas, ideales para embarcaciones pequeñas a modo de ahorro de consumo de auxiliares, sin embargo, su potencia es tan limitada que no sería posible para grandes buques.

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables



Figura 3: Buque siendo propulsado adicionalmente con una cometa



Figura 4: Buque siendo propulsado adicionalmente por una vela rígida [6]

3.2.2. Energía solar

La energía solar es comúnmente utilizada en cruceros, buques Ro-Ro y portacontenedores, utilizándose ello tanto paneles fotovoltaicos como techos solares, también denominados, PV *roofing*. Esta metodología dispone de varias ventajas como puede ser la producción de energía limpia para auxiliares reduciendo así emisiones. Sin embargo, también tiene contras, en este caso, su cubrimiento de una pequeña fracción de

la demanda total puesto que la superficie es limitada. Haciendo uso de este sistema, la reducción de consumo de auxiliares podría llegar hasta un 2-5%. Si tenemos en cuenta su mantenimiento, encontramos algunas complicaciones puesto que debido su localización, principalmente marítima, el agua salada puede influir en su rendimiento e incluso en su coste dependiendo del mantenimiento específico que este necesite, convirtiéndolo en una opción no tan rentable hablando en términos de productividad y coste [7].



Figura 5: Buque “Auriga Leader” (NYK Line) con paneles solares de 40 kW

3.2.2.1. Paneles fotovoltaicos

Existen diversos factores técnicos que deben considerarse a la hora de seleccionar el tipo de panel fotovoltaico más adecuado para su instalación en el Buque de Estudio. Entre los más relevantes se encuentran la eficiencia energética, el peso específico, la flexibilidad estructural, la resistencia a condiciones marinas, como la oxidación o corrosión por salinidad y humedad, así como el coste por unidad de potencia instalada. Atendiendo a estos criterios, se ha llevado a cabo un análisis comparativo que permite identificar una selección de dos tecnologías fotovoltaicas que se consideran viables y adecuadas para su aplicación en el entorno operativo del buque.

- Panel monocristalino

Este tipo de panel es el idóneo para un espacio estructural rígido en cubierta, siendo además una de las instalaciones más eficientes si se es dependiente de la escasa superficie de la que dispone. En relación al mantenimiento que esta requiere, se usa encapsulados marinos con protección salina y UV para prolongar la vida útil del panel.

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

En aspectos técnicos, estos paneles están compuestos por celdas solares de silicio monocristalino (mono-Si), siendo muy fáciles de reconocer por su aspecto uniforme y coloración ya que esto indica una alta pureza en silicio. El peso de estos paneles varía entre los 10 y 12 kg/ m² con una efectividad energética de hasta un 23% [8].

Su estructura es muy característica debido al tipo de acabado del cristal. Estos se fabrican con bloques de silicio, con forma cilíndrica. Con el objetivo de reducir los costes de fabricación de las celdas fotovoltaicas monocristalinas además de optimizar su rendimiento se recortan los cuatro lados de los bloques cilíndricos para hacer láminas de silicio.



Figura 6: Ejemplo de panel monocristalino (Fuente: Autosolar)[8].

- Panel CIGS Flexible

Los paneles solares de capa fina, concretamente aquellos basados en tecnología CIGS, resultan especialmente adecuados para su instalación en superficies curvas o de geometría compleja, donde los módulos monocristalinos convencionales no pueden adaptarse debido a su rigidez estructural. Estos módulos ligeros presentan un peso entre 2 y 5 kg/m², lo que los convierte en una solución óptima en aplicaciones donde la carga estructural debe mantenerse al mínimo. Además, ofrecen un buen rendimiento en condiciones de radiación difusa, como entornos con nubosidad frecuente, como es el caso de la zona de Bristol.

Su instalación es sencilla y de bajo coste, ya que suelen incorporar sistemas de fijación mediante adhesivos industriales, eliminando la necesidad de estructuras de soporte adicionales o perforaciones en la cubierta. No obstante, su eficiencia energética es inferior a la de los paneles monocristalinos, por lo que su aplicación se limita habitualmente a zonas específicas del buque donde no es viable instalar módulos convencionales, funcionando, así como una solución complementaria.



Figura 7: Ejemplo de panel de capa fina [9]

3.2.2.2. Baterías.

Un sistema fotovoltaico autónomo o híbrido almacena la energía producida por los paneles para su uso posterior gracias a las baterías. Los paneles solares generan electricidad en corriente continua cuando reciben la radiación solar, esta electricidad se consume directamente o se almacena en baterías mediante un regulador de carga. Posteriormente un inversor transforma esa energía almacenada en corriente alterna, que es la que se usa normalmente a bordo o en instalaciones domésticas.

Es por ello que, si se hace la instalación de una planta fotovoltaica en el cochero, se dimensiona a su vez un espacio para estas.

- Baterías de litio (LiFePO₄)

Estas baterías disponen de una alta densidad energética además de una profundidad de descarga de hasta el 90 % Su vida útil prolongada alcanza los 5000 ciclos y su mantenimiento es mínimo.

- Baterías de Plomo-Ácido (GEL o AGM)

Otra opción a considerar son las baterías de plomo-Ácido, las cuales disponen de un coste inferior a las baterías de litio. Sin embargo, tienen menos profundidad de descarga (50-60%) además de una vida útil más corta (1500-2000 ciclos) y un mayor mantenimiento.

3.2.3. Energía undimotriz

Esta energía se obtiene a partir de las olas del mar, por medio de flotadores oscilantes o alas sumergidas, dependiendo principalmente del movimiento vertical (subida/bajada) y el movimiento horizontal (avance /retroceso) del agua. Es predecible y constante en zonas de buen oleaje además de que dispone de una gran densidad energética comparada con la solar o eólica (más energía por m^2). Sin embargo, es una tecnología inmadura en todos los buques puesto que aún está en desarrollo y su coste de instalación es muy elevado[10].



Figura 8: Buque de la empresa Magallanes Renovables de aprovechamiento de las corrientes marinas para extraer energía mareomotriz

3.2.4. Energía del hidrógeno

La energía del hidrógeno se genera de tres formas diferentes. La primera son las pilas de combustible donde el hidrógeno (H_2) reacciona con oxígeno y genera electricidad, agua y calor, sin combustión. Este tipo se usa en *ferries* o buques costeros de pequeña magnitud. Después se encuentran los motores modificados, donde el hidrógeno se quema en un motor similar al de gasóleo generando energía mecánica, sin embargo, este método se encuentra aún en periodo de prueba. Por último, el hidrógeno como portador de energía usado para almacenar energía, mayormente de renovables y luego alimentar sistemas eléctricos a bordo. Este último método se emplea en generadores auxiliares en barcos y energías híbridas. En general, su almacenamiento voluminoso y el hecho de la existencia de infraestructuras limitadas, además de sus costes elevados, hace que no sea el método más óptimo para un barco.



Figura 9: Buque,Hydroville, ferry con celdas de combustible.

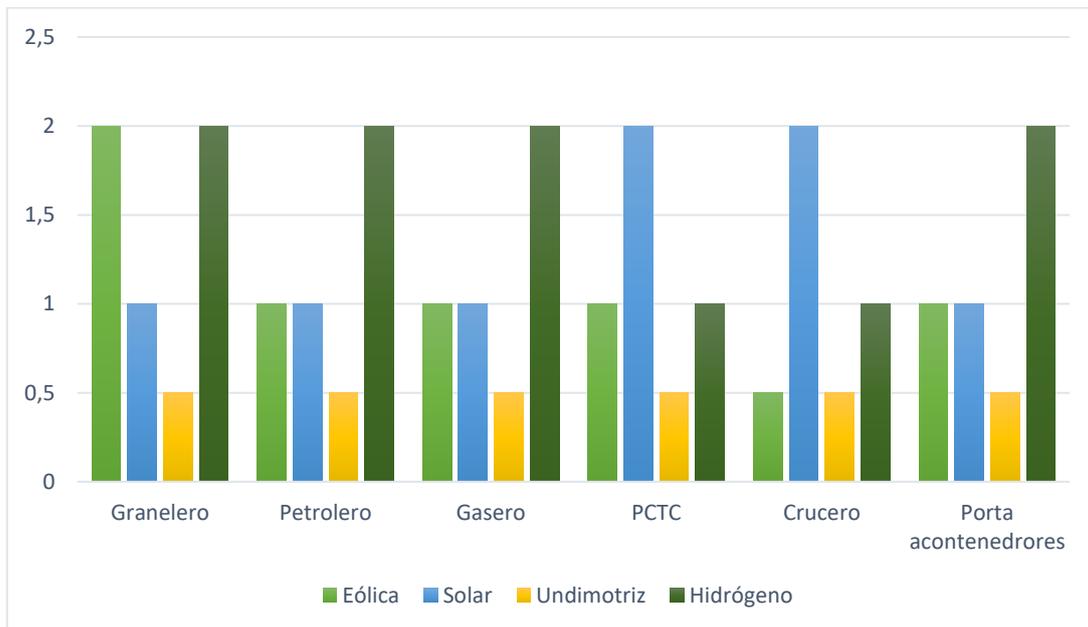


Figura 10: Viabilidad de tecnologías renovables por tipo de buque (Fuente: elaboración propia)

4. METODOLOGÍA.

Una vez identificados los tipos de buques existentes y las energías renovables aplicables a estos, se hace una elección del objeto del proyecto. Teniendo en cuenta, efectividad, coste, dimensiones y rentabilidad, el buque seleccionado es buque Ro-RO también llamado, PCTC. Tal como se ha estudiado en el apartado anterior, debido mayoritariamente a las dimensiones de este, las energías renovables seleccionadas son un híbrido entre eólica y solar, puesto que una sola no daría abasto para cubrir toda la potencia auxiliar que un cochero genera.

Category	Measure	METRICS					IMPACT ON INDEXES			VESSEL TYPES APPLICABILITY				
		Efficiency gain (%)	CAPEX (kUSD)	OPEX (% or kUSD)	Implementation time	NB / Retrofit / Both	Design Index (EEDI/EECI)	Operational index (CII, ETS)	Fuel-based index (FuelEU, GFI)	Bulk carriers	Tankers	Gas carriers	Car carriers	Cargo ships
Energy consumers	Auxiliary systems optimization	0.5-1.5	50-1,000	1-2%	6 months	Both	-	Yes	Yes	✓	✓	✓	✓	✓
	Energy-efficient lighting system	0.1-1	20-1,200	-	12 months	Both	-	Yes	Yes	✓	✓	✓	✓	✓
	Optimization of cargo handling systems	0.5-1	5-30	-	1-2 months	Both	-	Yes	Yes	✓	✓	✓	✓	✓
Energy harvesting	Solar panels	0.2	700-3,000	<1%	12 months	Both	Yes	Yes	Yes	✓	✓	✓	✓	✓
	Wind-assisted propulsion systems	5-40	500-3,000	2-5%	12 months	Both	Yes	Yes	Yes	✓	✓	✓	✓	✓

Figura 11: Medidas de eficiencia energética - cuadro recapitulativo (Fuente:DNV)

4.1. SELECCIÓN DE BUQUE

Para el presente TFG se ha seleccionado un buque del tipo Ro-Ro (Roll-on/Roll-off), el cual se caracteriza por contar con grandes cubiertas superiores continuas, libres de elementos como contenedores y grúas, lo que lo convierte en un escenario idóneo para la instalación de paneles solares. Asimismo, desde el punto de vista de la energía eólica, este tipo de buques presenta un perfil operativo favorable, con velocidades medias-bajas, rutas regulares y un régimen de viento adecuado, lo que lo hace especialmente apto para la implementación de tecnologías como los rotores Flettner. La combinación de trayectos prolongados y regulares permite una mayor eficiencia en el ahorro de combustible mediante el aprovechamiento de fuentes de energía renovable.

4.1.1. Características generales

El análisis se fundamenta en un caso de uso específico: un buque cochero, cuyas características estructurales se corresponden con los planos presentados en (Figura 11).

Este tipo de buques ofrece una cubierta corrida de gran amplitud, lo que facilita la integración de diversas tecnologías energéticas.

El buque objeto de estudio, denominado en este documento como "Buque de Estudio", es un monocasco construido en diferentes calidades de acero. Dispone de una capacidad de lastre de 1.719 toneladas y un volumen de almacenamiento de fuelóleo de 665 m³. Su velocidad máxima de operación alcanza los 14,4 nudos[11].

- *Dimensiones principales*

Respecto a las medidas principales del buque, se dividen en estructura, tonelaje y propulsión. En el siguiente plano, se definen las partes principales de un buque mercante.

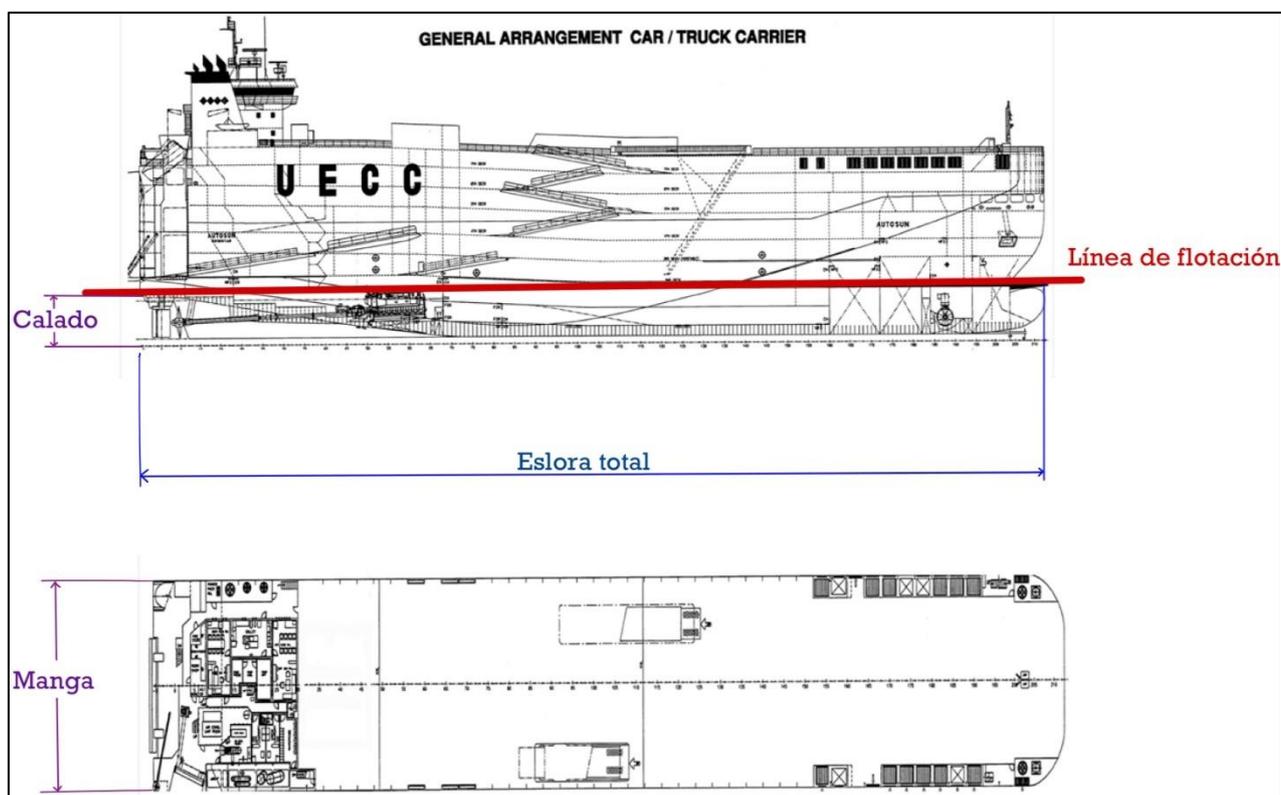


Figura 12: Aclaración de partes del Buque de Estudio cochero (Fuente: Elaboración propia)

- ESTRUCTURA
 - o Eslora total: 111,89 m
 - o Profundidad: 9,5 m
 - o Calado: 7,52 m
 - o Manga: 23 m

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

- Altura del puente: 3 m
- TONELAJE
 - Tonelaje bruto: 5321t
 - Tonelaje neto: 3065t
 - Tonelaje de peso muerto: 8790t
- PROPULSIÓN
 - Número de motores
 - Calibre: 460 mm
 - Cilindros: 6 Uds.
 - Potencia: 3309 kW
 - RPM: 220 rpm
 - Carrera: 880 mm
 - Tipo de combustible: Diesel marítimo

4.1.2. Análisis del gasto energético actual

En primer lugar, se llevará a cabo una estimación detallada de las demandas energéticas auxiliares que se pretende cubrir mediante sistemas de generación renovable instalados a bordo, concretamente de tipo fotovoltaico y eólico. Este análisis se basa en el perfil operativo del buque, que realiza una ruta regular entre Santander, San Sebastián y Bristol, con una escala intermedia y periodos de parada tanto en el puerto final como en el intermedio. Se considera que la embarcación opera los 365 días del año, por lo que se requiere una solución energética capaz de adaptarse a diferentes condiciones de navegación y atraque.

La selección de los sistemas de generación se fundamenta en la necesidad de reducir el consumo de combustibles fósiles a bordo, en línea con los objetivos marcados por la Organización Marítima Internacional (OMI), especialmente la Estrategia Inicial sobre la Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del Transporte Marítimo [1].

El estudio de la demanda energética auxiliar incluirá tanto los consumos en navegación como los asociados a la estancia en puerto, considerando servicios como iluminación, ventilación, equipos de comunicación y sistemas de control, entre otros. Esta caracterización será fundamental para dimensionar adecuadamente las instalaciones renovables, teniendo en cuenta no solo la generación potencial, sino también las limitaciones de espacio, peso y condiciones ambientales a bordo.

CONSUMO MEDIO DIARIO

	NAVEGACIÓN	PUERTO	COEF DE SIMULTANEIDAD	CONSUMO ESPERADO DIARIO	L/kWh
	MEDIA DIA/NOCHE	MEDIA DIA/NOCHE		E_i	C_i
SERVICIO DE PURIFICADORAS	25	5	0,5	15	0,22
CALDERA	13	18	0,7	21,7	0,35
GENERADORES DE AGUA DULCE	7	0	0,3	2,1	0,22
SERVICIOS SANITARIOS	21	15	0,6	21,6	0,18
CALEFACCIÓN	19	13	0,7	22,4	0,33
VENTILACIÓN	191	59	0,8	200	0,21
AIRE ACONDICIONADO	58	59	0,6	70,2	0,25
GAMBUZAS REFRIGERADAS	16	16	0,9	28,8	0,25
COCINA-OFICE	88	44	0,5	66	0,3
LAVANDERÍA	3	3	0,3	1,8	0,23
ALUMBRADO	10	9	0,6	11,4	0,17
TOTAL (kW/día)	451	241		461	2,38

Tabla 1: Consumo medio diario de cada elemento auxiliar del Buque de Estudio

Para saber cuántos litros consume cada elemento se realizará una media ponderada para posteriormente utilizarlo en el cálculo de energía a cubrir por la instalación fotovoltaica. Es decir, el dato que transforma la energía en Litros de combustible.

$$\bar{C}_{L/kWh} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i * E_i)}{\sum_{i=1}^n E_i}$$

$\bar{C}_{L/kWh}$: Media ponderada del consumo (L/ kWh)

C_i : Consumo específico del elemento i (L/kWh)

E_i : Consumo energético total del elemento (kW/día)

n : Número total de elementos consumidores considerados

4.1.3. Rutas típicas y perfil operativo

Como ya está mencionado con anterioridad en el estado del arte, un buque Ro-Ro se caracteriza por realizar trayectos específicos manteniendo su velocidad de navegación constante, convirtiéndolo en un buque más eficiente.

Para este buque, se hace un estudio de su ruta mas concurrida, Santander-San Sebastián-Bristol, teniendo en cuenta los puertos de recalada y las condiciones a las que se someterá nuestro cohero. Para ello es necesario la realización de un estudio de la radiación solar media en la ruta que va a seguir el Buque de Estudio, para posteriormente extraer las HSP (Horas Solares Pico) en cada puerto además de puntos intermedios de la ruta.

Las horas solares pico indican cuantas horas equivalentes al día de irradiancia solar máxima se reciben de media en un lugar. Al tener un espacio restrictivo debido a las dimensiones del buque, se hace un estudio promedio mensual de las HSP, sin embargo, los paneles que se utilizarán finalmente se escogerán teniendo en cuenta el mes más restrictivo. Esto ocurre puesto que, si se opta por un dimensionamiento basado en el promedio anual, se considera que en los meses de menor radiación la producción será inferior, necesitándose de este modo fuentes de energías complementarias.

Para extraer los datos se utiliza el software de cálculo de instalaciones solares fotovoltaicas, PVGIS.

- *Puerto de Raos – Santander*

Se comenzará ubicando en el mapa la geolocalización del puerto del cual partirá el cohero, En este caso el puerto de Raos en Santander, cuyas coordenadas son:

- 43.4427, -3.8313

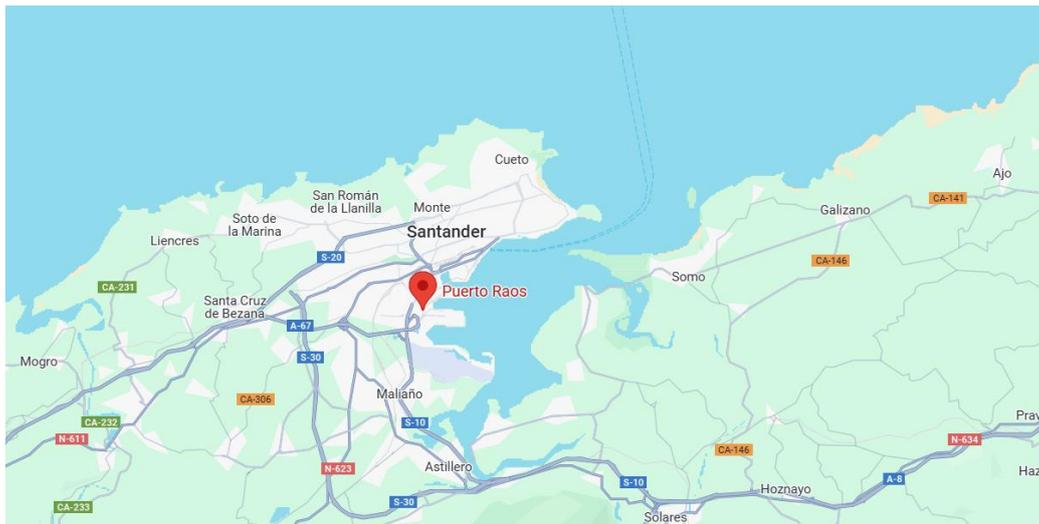
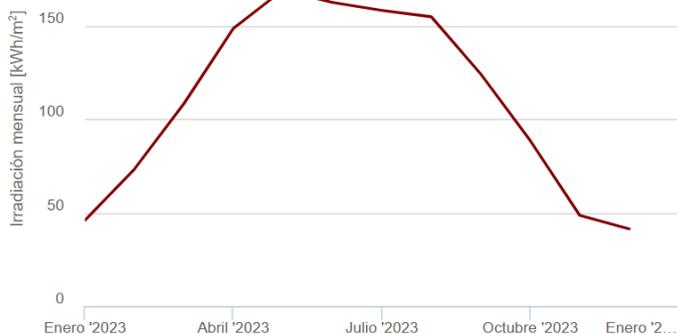


Figura 13: Puerto de Raos en Santander (Fuente: GoogleMaps)

Posteriormente, extraeremos datos tanto de la irradiación solar como de la temperatura mensual del puerto, con el software PVGIS, además de las horas solares pico[12].

IRRADIACIÓN SOLAR MENSUAL

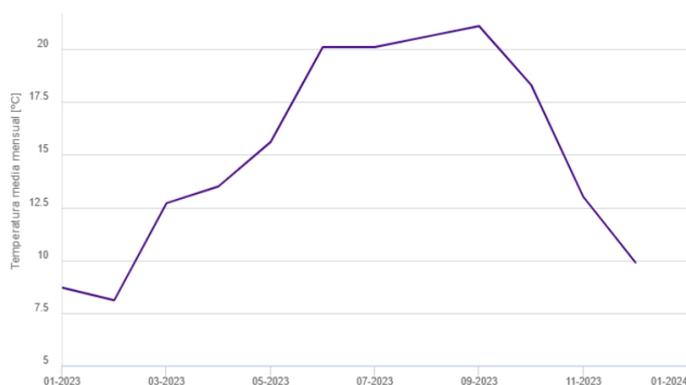


Mes	2023
Enero	45.74
Febrero	73.1
Marzo	108.03
Abril	148.34
Mayo	168.77
Junio	162.21
Julio	157.93
Agosto	154.57
Septiembre	123.87
Octubre	88.34
Noviembre	48.4
Diciembre	41.19

Figura 14: Gráfica representativa de la irradiación solar mensual del puerto de Raos en el año 2023 (Fuente: PvGIS)

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL



Month	2023
Enero	8.7
Febrero	8.1
Marzo	12.7
Abril	13.5
Mayo	15.6
Junio	20.1
Julio	20.1
Agosto	20.6
Septiembre	21.1
Octubre	18.3
Noviembre	13
Diciembre	9.9

Figura 15: Gráfica representativa de la temperatura media mensual en el puerto de Raos en el año 2023 (Fuente: PvGIS)

Para las horas solares pico, se introducen las coordenadas de cada punto de la ruta en el software PvGIS. Posteriormente se selecciona una inclinación baja para cada panel (10°), con una orientación 0° (sur) siendo un sistema fijo.

HORAS SOLARES PICO PROMEDIO MENSUALES

MES	HSP Promedio Mensuales
ENERO	1,8
FEBRERO	2,5
MARZO	3,8
ABRIL	4,8
MAYO	5,8
JUNIO	6,2
JULIO	6,1
AGOSTO	5,5
SEPTIEMBRE	4,5
OCTUBRE	3,2
NOVIEMBRE	2,1
DICIEMBRE	1,6
Promedio Anual	3,9

Tabla 2: Tabla de horas solares pico promedio mensuales en el Puerto de Raos (Fuente: PvGIS)

- *Kirol Portua - San Sebastián*

Se hacen los mismos calculos para el Puerto de San Sebastián, con coordenadas:

- 43.3224, -1.988

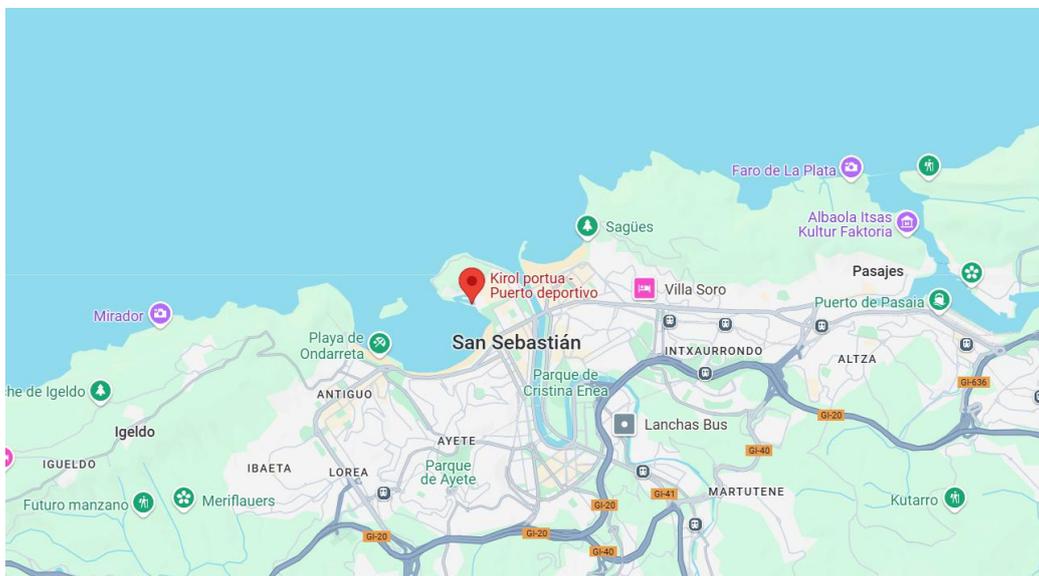
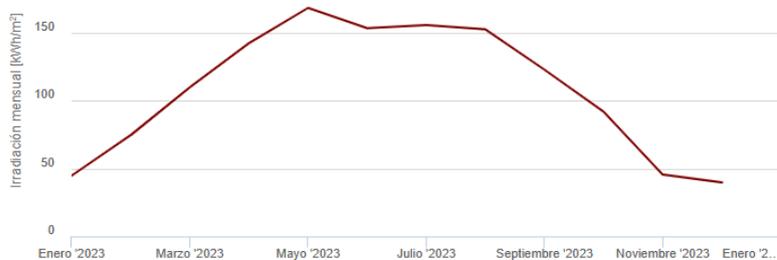


Figura 16: Kirol Portua, San Sebastián (Fuente: GoogleMaps)

IRRADIACIÓN SOLAR MENSUAL



Mes	2023
Enero	44.67
Febrero	74.46
Marzo	109.57
Abril	142.06
Mayo	167.98
Junio	153.11
Julio	155.33
Agosto	152.22
Septiembre	122.5
Octubre	91.62
Noviembre	45.37
Diciembre	39.71

Figura 17: Gráfica representativa de la irradiación solar mensual del Kirol Portua en el año 2023 (Fuente: PvgIS)

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

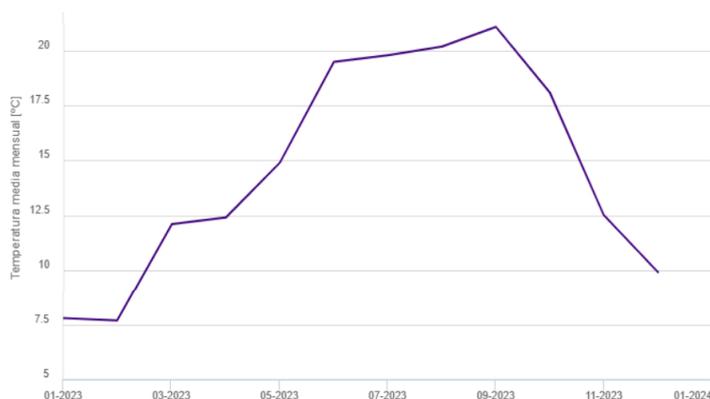


Figura 18: Gráfica representativa de la temperatura media mensual en el Kirol Portua en el año 2023 (Fuente: PvGIS)

Month	2023
Enero	7.8
Febrero	7.7
Marzo	12.1
Abril	12.4
Mayo	14.9
Junio	19.5
Julio	19.8
Agosto	20.2
Septiembre	21.1
Octubre	18.1
Noviembre	12.5
Diciembre	9.9

HORAS SOLARES PICO PROMEDIO MENSUALES

MES	HSP Promedio Mensuales
ENERO	1,7
FEBRERO	2,4
MARZO	3,6
ABRIL	4,6
MAYO	5,6
JUNIO	6
JULIO	5,9
AGOSTO	5,3
SEPTIEMBRE	4,3
OCTUBRE	3
NOVIEMBRE	2
DICIEMBRE	1,5
Promedio Anual	3,7

Tabla 3: Tabla de horas solares pico promedio mensuales en el Kirol Portua (Fuente: PVGIS)

- *Floating Harbour – Bristol*

De nuevo el mismo proceso con el Puerto de Bristol, con coordenadas:

- 51.496,-2.721

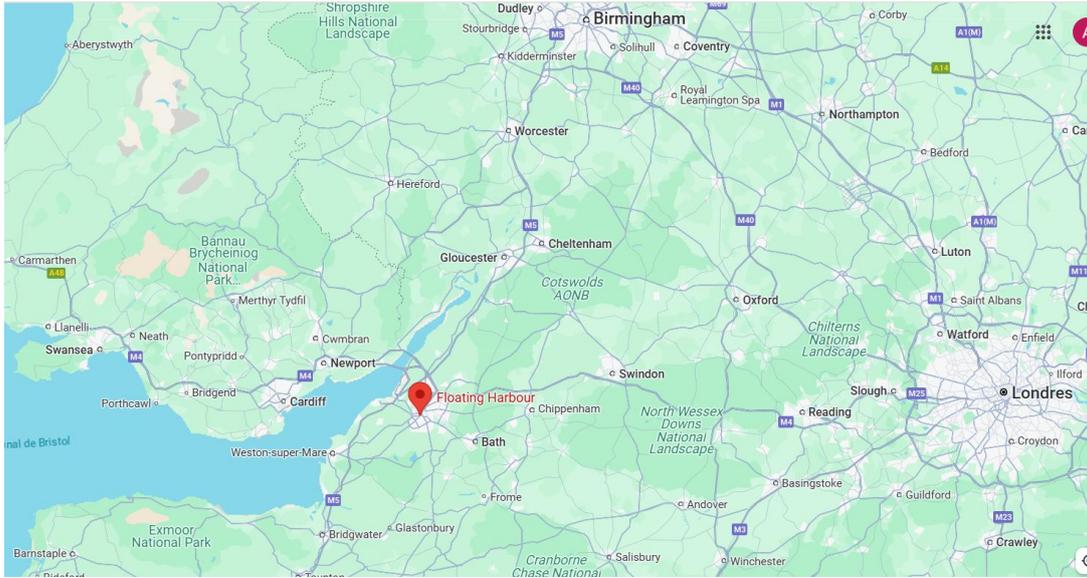


Figura 19: Floating Harbour, Bristol (Fuente: GoogleMaps)

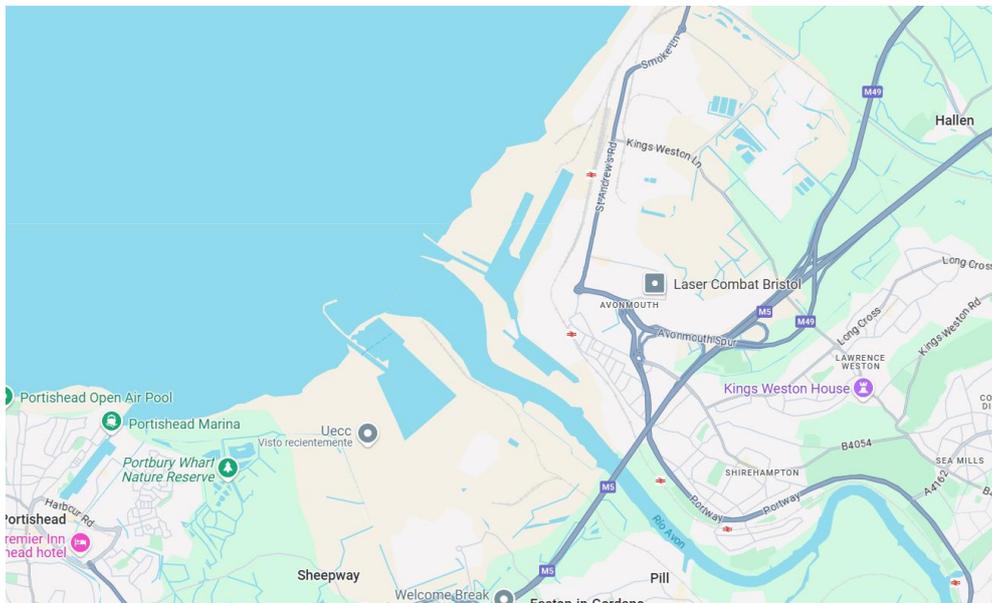


Figura 20: Zoom Floating Harbour, Bristol (Fuente: GoogleMaps)

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

IRRADIACIÓN SOLAR MENSUAL

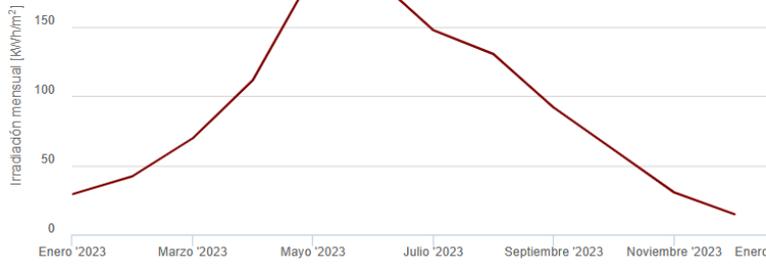


Figura 21: Gráfica representativa de la irradiación solar mensual del Floating Harbour en el año 2023 (Fuente: PvGIS)

Mes	2023
Enero	29.05
Febrero	42.02
Marzo	69.38
Abril	111.3
Mayo	188.19
Junio	186.28
Julio	147.28
Agosto	130.07
Septiembre	91.45
Octubre	60.9
Noviembre	30.3
Diciembre	14.66

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

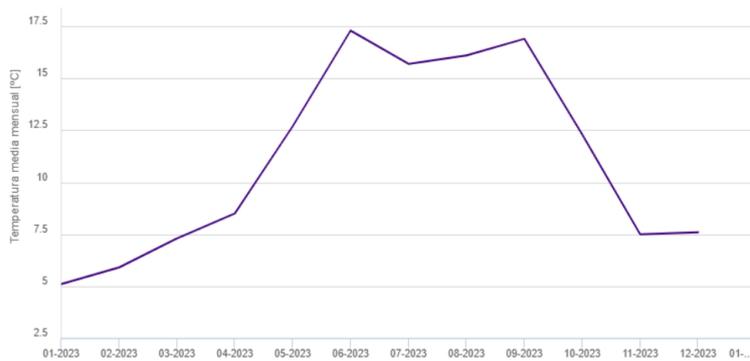


Figura 22: Gráfica representativa de la temperatura media mensual en el Floating Harbour en el año 2023 (Fuente: PvGIS)

Month	2023
Enero	5.1
Febrero	5.9
Marzo	7.3
Abril	8.5
Mayo	12.7
Junio	17.3
Julio	15.7
Agosto	16.1
Septiembre	16.9
Octubre	12.3
Noviembre	7.5
Diciembre	7.6

HORAS SOLARES PICO PROMEDIO MENSUALES

MES	HSP Promedio Mensuales
ENERO	1,2
FEBRERO	1,8
MARZO	2,8
ABRIL	3,8
MAYO	4,8
JUNIO	5,2
JULIO	5
AGOSTO	4,5
SEPTIEMBRE	3,5

OCTUBRE	2,4
NOVIEMBRE	1,5
DICIEMBRE	1
Promedio Anual	2,9

Tabla 4: Tabla de horas solares pico promedio mensuales en el Floating Harbour (Fuente: PVGIS)

- *Puntos en mar abierto*

Además de su estudio en puerto, también es necesario un estudio de las horas solares pico en alta mar, por ello escogemos dos puntos de la ruta:

- 49.7343, -5.8756 (P1)
- 46.3421, -5.233 (P2)

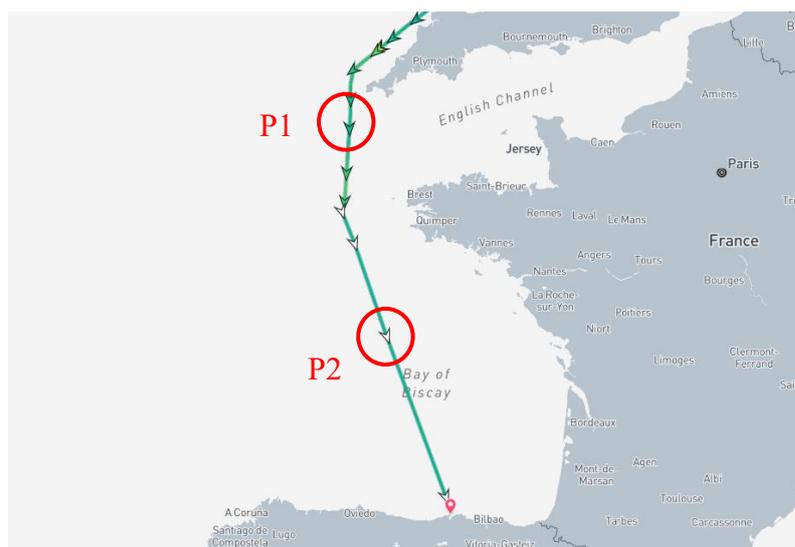


Figura 23: Mapa donde se ubican los dos puntos seleccionados de la ruta en mar abierto (Fuente: MarineTraffic)

HORAS SOLARES PICO PROMEDIO MENSUALES

MES	HSP Promedio Mensuales P1	HSP Promedio Mensuales P2
ENERO	1,5	2
FEBRERO	2,2	2,8
MARZO	3,4	4
ABRIL	4,5	5
MAYO	5,5	6

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

JUNIO	6	6,5
JULIO	5,8	6,3
AGOSTO	5,2	5,8
SEPTIEMBRE	4	4,5
OCTUBRE	3	3,5
NOVIEMBRE	2	2,5
DICIEMBRE	1,3	1,8
Promedio Anual	3,6	4,3

Tabla 5: Tabla de horas solares pico promedio mensuales en el P1 y P2 (Fuente: PVGIS)

4.2. SELECCIÓN DE MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO

Los paneles solares convierten directamente la luz solar en energía eléctrica, reduciendo así carga de los grupos electrógenos, reduciendo el consumo de combustible con un bajo OPEX. Sin embargo, consumen espacio y sólo pueden suministrar fracción limitada de la energía consumida. Para el espacio de cubierta libre y las operaciones en latitudes bajas (Norte y Sur), suelen generalmente permiten algunas ganancias energéticas. Por tanto, deben considerarse como un complemento.

Por otro lado, los sistemas de propulsión asistida por el viento (WAPS) utilizan el viento para propulsión y se prevé que en el futuro reduzcan hasta un 40 hasta un 40% en el futuro. El viento es la única fuente de energía que proporciona una propulsión sin emisiones de propulsión. No tiene coste alguno y, por tanto, está preparada para el futuro.

Aunque las tecnologías WAPS utilizan los mismos principios físicos que las velas tradicionales, los sistemas modernos aplican una aerodinámica, materiales modernos, automatización y enrutamiento para una mayor eficiencia de las velas y un mayor beneficio.

4.2.1. Paneles fotovoltaicos

Para realizar una selección adecuada del número de paneles que se quieren colocar en el cochera se empezara dimensionando el espacio del que se dispone en el cochera;

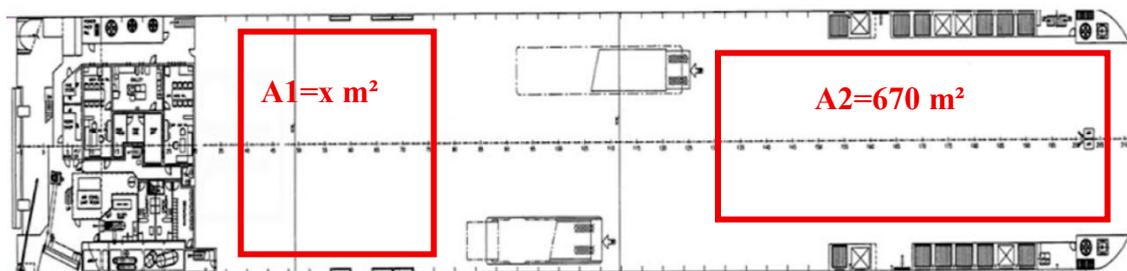


Figura 24: Plano de las dimensiones libres para instalar los paneles fotovoltaicos junto a sus baterías correspondientes (Fuente: Elaboración propia)

- Aclaración: El cálculo final del área 1 se hará con en el apartado de resultados cuando se calculen las distancias que se debe dejar entre paneles para que no se produzcan sobra entre ellos ya que se debe calcular a su vez el espacio libre de sombra que queda a la derecha del puente de control.

Después de hacerse el dimensionado de la cubierta libre, se elige el modelo de panel fotovoltaico que se quiere colocar. Según la búsqueda hecha en el estado del arte, la instalación elegida para este buque será en base a una infraestructura monocristalina, concretamente los correspondientes a la marca Longi Solar [13]., *Panel Longi LR5-72HPH-530M*, con una potencia de 530W y unas dimensiones de 1,94 m² cada panel, es decir, 1,7 m de largo (Y) y 1,1m de ancho (X). Con estos datos, se calcula el número de paneles a instalar en cada área seleccionada para posteriormente extraer la potencia total de la instalación fotovoltaica.

Para este cálculo, se tiene en cuenta la inclinación de cada panel debido a la necesidad de disponer de una posición óptima para la plena eficiencia del mismo, además de la separación entre el resto de paneles para que no se produzcan sobras entre ellos. Por esta razón, se hace un cálculo previo para saber la distancia óptima que hay que dejar entre paneles para que la sombra producida dependiendo de la posición del sol no afecte a su contiguo.

Electrical Characteristics	STC : AM1.5 1000W/m ² 25°C		NOCT : AM1.5 800W/m ² 20°C 1m/s				Test uncertainty for Pmax ±3%			
	LR5-72HPH-540M		LR5-72HPH-545M		LR5-72HPH-550M		LR5-72HPH-555M		LR5-72HPH-560M	
Testing Condition	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax/W)	540	403.6	545	407.4	550	411.1	555	414.8	560	418.6
Open Circuit Voltage (Voc/V)	49.50	46.54	49.65	46.68	49.80	46.82	49.95	46.97	50.10	47.11
Short Circuit Current (Isc/A)	13.85	11.20	13.92	11.25	13.98	11.31	14.04	11.35	14.10	11.40
Voltage at Maximum Power (Vmp/V)	41.65	38.69	41.80	38.83	41.95	38.97	42.10	39.11	42.25	39.25
Current at Maximum Power (Imp/A)	12.97	10.43	13.04	10.49	13.12	10.56	13.19	10.61	13.26	10.67
Module Efficiency(%)	20.9		21.1		21.3		21.5		21.7	

Tabla 6: Ficha técnica del panel solar Longi

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

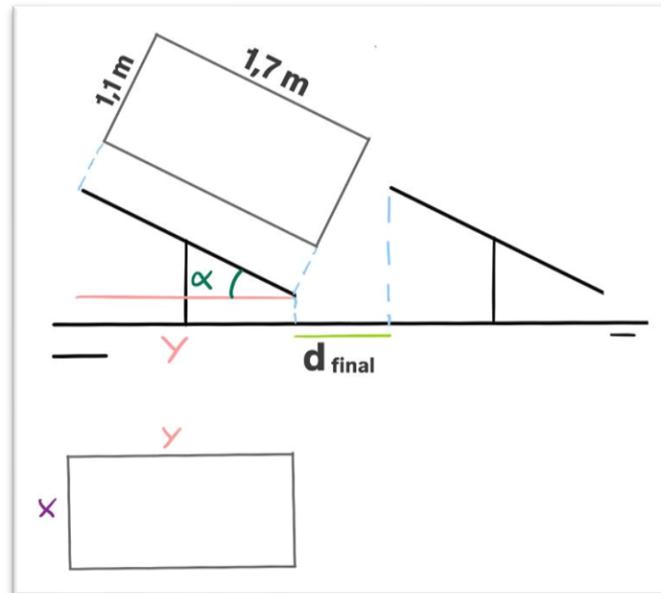


Figura 25: Boceto cambio de plano para el cálculo de las sombras (Elaboración propia)

- $A_1 = ? m^2$
 - o $L_1 = ? m$
 - o $B_1 = ? m$
- $A_2 = 670 m^2$
 - o $L_2 = 38'46 m$
 - o $B_2 = 17'5 m$
- $m = n^\circ$ paneles que caben de largo
- $n = n^\circ$ de paneles que caben de ancho
- $\alpha = 10^\circ$ de inclinación
- $Y = 1'7 m * \cos \alpha$
- $y = 1'7 m$
- $X = 1'1 m$
- $d =$ depende de si la disposición es horizontal o vertical
- Latitud media de la ruta $= 47^\circ$
- $d_{final} =$ distancia entre paneles

Cálculo de la d_{final} :

Para este cálculo se debe conocer también el ángulo de elevación solar mínimo,

$$\theta = 90 - (\text{latitud} + 23'45^\circ)$$

El dato $23, 45^\circ$ se conoce debido a que es el ángulo que determina el desplazamiento aparente del sol respecto al ecuador terrestre a lo largo del año,

alcanzando su máximo en los solsticios, es decir, la inclinación del eje de rotación de la tierra. En el cálculo se hace referencia al valor del solsticio de invierno ya que es cuando el sol esta más bajo y las sombras son más largas, de esta manera en las rutas invernales no se perderá rendimiento debido a las sombras.

Posteriormente se multiplica el lado que se eleva al inclinar el panel (X ó Y dependiendo de la disposición) por el seno del ángulo de inclinación de este (α) y se divide por la tangente del ángulo de elevación solar mínimo (θ), obteniendo así una distancia (d) que se multiplica por un coeficiente de 1,2 debido a que los paneles se encuentran en una infraestructura móvil y las sombras podrían variar dependiendo de los movimientos.

$$d = \frac{L * \text{Sen}(\alpha)}{\tan(\theta)}$$

$$d_{final} = d * \text{coeficiente}$$

Disposición horizontal,

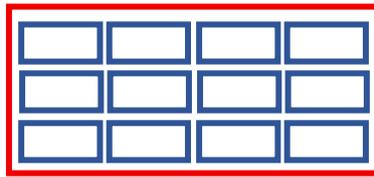


Figura 26: Tipo de disposición horizontal de los paneles en un área ejemplo

Para el área 1:

$$L_1 = Y * m + (m - 1) * d_{final}$$

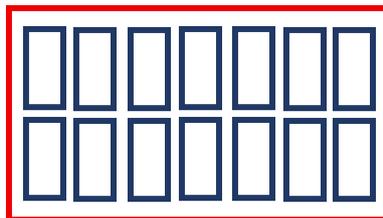
$$B_1 = X * n$$

Para el área 2:

$$L_2 = Y * m + (m - 1) * d_{final}$$

$$B_2 = X * n$$

Disposición vertical;



Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

Figura 27: Tipo de disposición vertical de los paneles en un área ejemplo

Para el área 1:

$$L_1 = X * m + (m - 1) * d_{final}$$

$$B_1 = Y * n$$

Para el área 2:

$$L_2 = X * m + (m - 1) * d_{final}$$

$$B_2 = Y * n$$

$$N^{\circ} \text{ de paneles} = m * n$$

$$\text{Potencia total} = N^{\circ} \text{ de paneles} \times \text{potencia de cada panel}$$

Una vez se conozca esta potencia, se utilizará el software PVGIS para introducir los datos y extraer una estimación de la producción mensual en cada punto destacado de la ruta.

Tomando en consideración la producción de energía eléctrica (kW) que calcula el software además de los datos extraídos en el punto anterior sobre el consumo de los equipos auxiliares (kW/día), se estima mensualmente cuanto es el autoconsumo de energía eléctrica de los paneles y cuanto es el gasto de combustible.

4.2.2. Selección de inversores y circuito de cableado

Una instalación fotovoltaica genera corriente continua (DC), pero para utilizarla posteriormente en los aparatos cotidianos del Buque de Estudio o simplemente conectarse a su red, es necesario el uso de un inversor para transformarla en corriente alterna. Esta conversión también permite sincronizar la producción solar con la red del cocherro garantizando un suministro estable y seguro.

La coexistencia de ambas formas de corriente dentro de la instalación requiere una planificación cuidadosa del sistema de cableado y protección, con criterios diferenciados para las secciones en DC, desde los paneles hasta los reguladores y las secciones en AC, desde los inversores hasta los puntos de consumo.

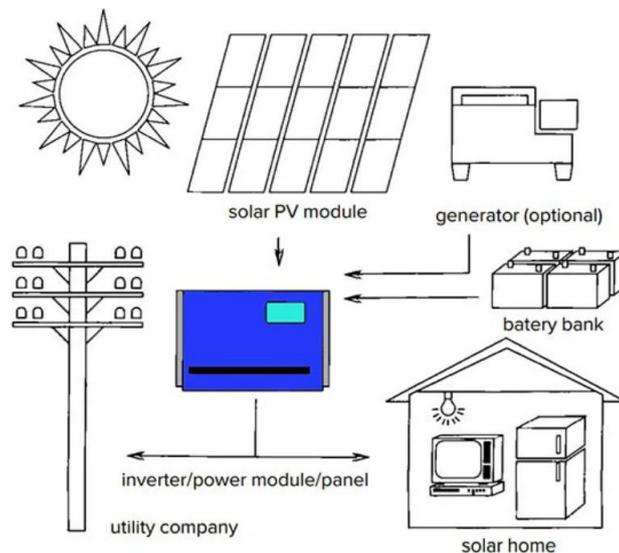


Figura 28: Explicación ilustrativa del recorrido que sigue la energía desde los paneles solares hasta los sistemas auxiliares [14].

La energía generada por los paneles solares fotovoltaicos como ya se ha mencionado es corriente continua (CC), que se canaliza mediante cableado, en este caso, específico puesto que se encuentran en el medio marino con lo que esto conlleva, humedad, plena radiación, salinidad... Por esta razón se deben incluir cables resistentes con aislamiento UV y salino. Una vez llega la corriente al inversor, la corriente alterna viaja por el cableado trifásico o monofásico dependiendo de la potencia, el número de paneles, distribución de las cargas auxiliares...hasta los cuadros eléctricos de consumo. Una vez allí, alimenta directamente los equipos auxiliares como la iluminación, purificadora, calefacción...

- *Inversor*

Para la selección del inversor ideal se realiza un procedimiento técnico que garantiza su compatibilidad con el campo fotovoltaico, su eficiencia y su resistencia en un entorno marino.

Teniendo en cuenta el dato calculado en el apartado anterior de número de paneles totales y potencia pico total, se realizará el cálculo para saber el número de paneles por string, tanto en serie como en paralelo.

- Serie

$$N_{serie} = \frac{V_{m\acute{a}x_inversor}}{V_{oc_panel} * F_T}$$

N_{serie} : Número de paneles en serie

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

$V_{m\acute{a}x_{inversor}}$: *tensión máxima que admite el inversor*

V_{oc_panel} : *tensión en circuito abierto del panel*

F_T : *factor de seguridad por temperatura*

- Paralelo

$$N_{paralelo} = \frac{N_T}{N_{serie}}$$

Posteriormente se realiza una verificación de la corriente máxima de entrada, ya que esta no debe ser superada por la corriente total en paralelo.

$$I_{entrada} = N_{paralelo} \times I_{sc_panel}$$

I_{sc_panel} : *corriente de cortocircuito del panel* Este factor corrige la tensión V_{oc_panel} según la temperatura mínima del lugar

Finalmente, para la selección del inversor, se tienen que seguir una serie de condiciones;

- La potencia nominal del inversor $\geq 90\%$ de la potencia pico del campo
 - o Debido a que un inversor con demasiada menos potencia que los paneles generaría pérdidas por limitación, lo que se conoce como clipping.
- La tensión de trabajo debe estar dentro del rango de operación del inversor
 - o Ya que si se queda por debajo este no se comenzará su funcionamiento y si está por encima puede resultar dañado.
- La corriente de entrada \leq corriente máxima del inversor
 - o Al conectar los strings en paralelo la corriente de cada panel se suma, si esta suma supera la entrada máxima del inversor podría haber riesgos eléctricos.
- Número de MPPTs (Maximum Power Point Trackers) adecuado al diseño de strings
 - o Al tener dos zonas de instalación, (área 1 y área 2) con diferentes sombras e inclinaciones se necesita más de un MPPT para que ambas zonas trabajen de forma independiente y eficiente.
- Grado de protección IP65 (*Ingress Protection*) o superior y materiales resistentes a ambientes salinos (*Fuente: PDF Normativa UNE-EN 60529 / IEC 60529*)

- Primer dígito (6): Protección total contra el polvo
- Segundo dígito (5): Protección contra chorros de agua a presión desde cualquier dirección.

PROTECCIÓN CONTRA CUERPOS SÓLIDOS		PROTECCIÓN CONTRA CUERPOS LÍQUIDOS
Sin protección	0	Sin protección
Protección contra objetos con diámetro superior a 50mm	1	Protección ante un goteo vertical
Protección contra objetos con diámetro superior a 12mm	2	Protección contra goteo con inclinación de hasta 15°
Protección contra objetos con diámetro superior a 2,5mm	3	Protección ante pulverización
Protección contra objetos con diámetro superior a 1mm	4	Protección ante salpicaduras
Protección ante el polvo	5	Protección ante chorros de agua
Protección totalmente estanco contra el polvo	6	Protección ante chorros continuos de agua
	7	Protección contra inmersiones temporales
	8	Protección contra inmersiones permanentes

Tabla 7: Tabla guía identificación de referenciación de IP [15].

- *Cableado*

Como se ha mencionado antes, esta instalación hace uso tanto de corriente continua como de corriente alterna por lo que se harán cálculos de sección de cable para ambas.

Al ubicar el sistema de cableado en un ambiente marino, se debe considerar la normativa de cableado adecuada para ello según la ITC-BT-42 del REBT (Reglamento Electrónico de Baja Tensión en España)

Los datos disponibles a tener en cuenta procedentes de los paneles fotovoltaicos para poder realizar el circuito de cableado son los siguientes:

FICHA TECNICA Panel Longi LR5-72HPH-530M	
Potencia nominal	$P_{m\acute{a}x} = 530 \text{ Wp}$
Tensión a potencia máx.	$V_{mpp} = 41,35V$
Corriente a potencia máx.	$I_{mpp} = 12,82A$
Tensión circuito abierto	$V_{oc} = 49,20V$
Corriente cortocircuito	$I_{sc} = 13,71A$
Eficiencia del panel	20,7%

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

Coefficiente temperatura Pmax	-0,34%/°C
Tensión máx. del sistema	1500V
Caja de conexiones	IP68,3 diodos
Garantía de potencia	84,8% al cabo de 25 años
Sección del cable de salida	4,0 mm ²

Tabla 8: Resumen ficha técnica paneles Longi LR5-72HPH-530M

Al tener la instalación tanto en corriente alterna como en corriente continua, el cableado tendrá un dimensionamiento que depende de la intensidad que transporta influyendo a la sección del cable si esta es mayor o menor. Esto es destacable puesto que si la sección del cable resulta ser de un grosor elevado dificultara la instalación.

Al ser un buque, los cables escogidos serán de tipo unipolar por seguridad, flexibilidad y facilidad de reparación. Además, este cableado tiene que ser libre de halógenos y resistentes a rayos UV, humedad y agua salada.

Para escoger la sección del cable se hará un estudio por caída de tensión y por intensidad admisible.

- Caída de tensión en DC

$$S = \frac{2 * l * I_{DC}}{\sigma * \Delta U}$$

l: Longitud del conductor (m)

I_{DC}: Intensidad de cortocircuito (*I_{SC}*) * N° strings en paralelo

σ: conductividad del cobre

ΔU: caída de tensión permitida por la ITC 1'5%

- Caída de tensión en AC

$$S = \frac{\sqrt{3} * l * I_{AC}}{\sigma * \Delta U}$$

l: Longitud del conductor (m)

I_{AC}: Corriente de salida del inversor

σ: conductividad del cobre

ΔU: caída de tensión permitida por la ITC 1'5%

$$I_{AC} = \frac{P_{AC}}{\sqrt{3} * V_{AC} * \cos\phi}$$

P_{AC}: potencia del inversor

V_{AC} : tensión trifásica

$\cos\phi$: factor de potencia

4.3. SIMULACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO

Se definen una media anual de las horas solares pico (HSP) de cada punto de ruta seleccionado para posteriormente realizar el cálculo de la potencia total necesaria de la instalación. Para ello disponemos de esta fórmula:

$$P_{pv} = \frac{E}{G * \eta}$$

Siendo;

P_{pv} = Potencia pico necesaria en la instalación (kWp)

E =Energía eléctrica diaria que se quiere cubrir

G = Irradiancia diaria promedio en kWh/ m²/día

η =Rendimiento total del sistema (80%)

LOCALIZACIÓN	MEDIA ANUAL HSP
Santander	3,9
San Sebastián	3,7
Bristol	2,9
P1	3,6
P2	4,3
MEDIA TOTAL	3,68

Tabla 9: Media anual HSP de la ruta Santander-San Sebastián-Bristol

Dado que la instalación fotovoltaica proyectada a bordo del Buque de Estudio presenta una clara limitación de espacio, se opta por utilizar un valor medio anual de las Horas Solares Pico (HSP) a lo largo de la ruta operativa (Santander–San Sebastián–Bristol). Esta decisión permite evitar el sobredimensionamiento de la instalación que resultaría de considerar los valores correspondientes al mes más desfavorable, ya que estos requerirían una potencia instalada considerablemente mayor para compensar la baja irradiancia, lo cual no es viable dada la superficie disponible.

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

Tomando en consideración la producción de energía eléctrica (kW) que calcula el software además de los datos extraídos en el punto anterior 4.1.2. sobre el consumo de los equipos auxiliares (kW/día), se estima mensualmente cuanto es el autoconsumo de energía eléctrica de los paneles y cuanto es el gasto de combustible.

4.3.1. Producción energética mensual

Para estimar la producción mensual de energía eléctrica generada por la instalación fotovoltaica propuesta, se ha utilizado el software PVGIS, herramienta la cual permite simular el rendimiento energético de un sistema fotovoltaico a partir de variables como la ubicación geográfica, la inclinación y orientación de los paneles, el tipo de tecnología fotovoltaica seleccionada, así como las condiciones climatológicas medias del lugar. En este caso, se introducen las ubicaciones de los puntos más representativo de la ruta del Buque de Estudio, es decir, las coordenadas de los puertos, debido a que no se disponen de datos en los puntos seleccionados en alta mar, la potencia pico de la instalación (181'79kW), la inclinación estimada de los paneles, así como la configuración de un sistema autónomo con capacidad de almacenamiento para dos días de autonomía. Como resultado, PVGIS proporciona una estimación de la producción media diaria para cada mes del año, en cada localización, la cual se utilizará posteriormente para el análisis del autoconsumo energético y la dependencia residual de combustible fósil.

4.3.2. Cálculo de autoconsumo

Para determinar el grado de aprovechamiento de la energía generada por la instalación fotovoltaica a bordo, se calcula el autoconsumo mensual. Este valor representa la cantidad de energía eléctrica producida que puede ser efectivamente utilizada por el buque cada mes.

Una vez obtenidos los datos de producción mensual de energía eléctrica mediante la herramienta PVGIS, y conocidos los valores de consumo diario del buque, se procede a realizar una comparativa entre ambos con el fin de estimar el grado de autoconsumo energético alcanzable y la energía restante que deberá ser suplida mediante el uso de combustible convencional.

Para ello, se ha considerado la producción horaria diaria de cada mes y se ha comparado con el consumo horario diario del sistema eléctrico del buque. De este modo, se ha determinado la fracción de energía cubierta por la instalación fotovoltaica y, por diferencia, la demanda energética no cubierta, que deberá ser abastecida con fuentes tradicionales.

El autoconsumo se define como el valor mínimo entre la energía generada por los paneles solares y la energía demandada por el buque, dado que no es posible consumir más energía de la que se necesita. Este análisis permite evaluar la viabilidad energética de la instalación renovable y servirá como base para el posterior estudio económico.

Autoconsumo mensual (kWh)

$$= \min (\text{producción horario diario}, \text{consumo horario diario})$$

4.3.3. Cálculo de la energía a cubrir por combustible

Una vez determinado el valor de autoconsumo mensual para cada punto representativo de la ruta del Buque de Estudio, se procede a calcular la fracción de energía que deberá ser suplida mediante el uso de combustible fósil. Esta cantidad se obtiene como la diferencia entre la demanda energética diaria del buque y la energía generada diariamente de manera horaria por la instalación fotovoltaica, es decir, lo que calcula el software PVGIS.

Este cálculo permite conocer la dependencia residual del buque respecto a fuentes convencionales de energía, cuantificando la energía no cubierta por la instalación renovable. El resultado obtenido se expresa en kilovatios-hora (kWh), permitiendo identificar los periodos del año en los que se requerirá mayor apoyo energético por parte del sistema auxiliar basado en combustibles fósiles. Esta información será fundamental para el posterior análisis económico, ya que permitirá estimar el ahorro potencial en consumo de combustible derivado de la implementación del sistema fotovoltaico. A este dato se le multiplicara posteriormente la media ponderada en L/kWh del consumo de cada elemento a cubrir en el cocheró.

Energía a cubrir con combustible(kWh)

$$= (\text{Consumo} - \text{Generación}) * \text{Media de consumo por elemento}$$

Litros de combustible necesarios para cubrir la demanda (L/kWh)

$$= \text{Energía a cubrir con combustible}$$

$$* \text{Media ponderada de consumo}$$

4.4. COMPARATIVA

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

Para estimar el ahorro de combustible derivado de la utilización de sistemas fotovoltaicos se ha realizado una comparativa entre el consumo energético total del sistema auxiliar del buque sin la utilización de apoyo solar y el consumo necesario tras integrar la generación renovable. A partir de los perfiles de consumo y generación horaria, se ha determinado la energía que debe seguir siendo cubierta mediante combustible fósil. Posteriormente, dicha energía se ha convertido a litros de fuelóleo utilizando un índice de consumo específico medio ponderado ($\bar{C}_{L/kWh}$). Este procedimiento permite cuantificar el volumen de combustible evitado gracias a la contribución solar, y sirve como base para evaluar tanto los beneficios económicos como la reducción de emisiones asociada al sistema.

$$\text{Litros necesarios sin paneles} = \text{Consumo kWh} * 0,242 \frac{L}{kWh}$$

$$\text{Litros necesarios con paneles} = \text{Energía a cubrir kWh} * 0,242 \frac{L}{kWh}$$

4.5. ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL Y REDUCCIÓN DE EMISIONES

El impacto ambiental del transporte marítimo ha dejado una huella considerable en los últimos años debido a su contribución a las emisiones de gases efecto invernadero. Particularmente, el consumo de fuelóleo pesado (HFO) en buques es lo que representa una fuente significativa de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas en suspensión.

El Buque de Estudio está sujeto al cumplimiento de diversas regulaciones como:

- **Anexo VI del Convenio MARPOL (IMO)** [1], el cual establece límites estrictos a las emisiones atmosféricas de los buques, especialmente:
 - o Óxidos de azufre (SO_x): Desde enero del año 2020, el contenido máximo permitido de azufre en el fuel marino es del 0,5% masa sobre masa a nivel global, y del 0,1% masa sobre masa en zonas de control de emisiones.
 - o Óxidos de nitrógeno (NO_x): Se establecen límites escalonados según la fecha de construcción del buque y la zona de operación.
 - o Eficiencia energética:
 - EEDI: (Energy Efficiency Design Index): Aplica a nuevos buques y establece una eficiencia mínima por tonelada milla.

- SEEMP: (Ship Energy Efficiency Management Plan): requiere que todos los buques mantengan un plan de gestión energética a bordo.
- **Reglamento (UE) 2015/757-Sistema MRV (Monitoring, Reporting and Verification)**[16], exige que todos los buques de más de 5000 GT que hagan escala en puertos europeos (En este caso, San Sebastián) realicen un seguimiento anual de sus emisiones de dióxido de carbono (CO₂), consumo de combustible y eficiencia energética.
 - Las compañías navieras deben presentar un informe verificado de sus emisiones de CO₂ por viaje, por año y por tipo de operación.
 - Este sistema previamente independiente se integró en 2024 en el sistema de comercio de derechos de emisión (ETS)
- **FuelEU MARitime (2023)**[16], aprobado en 2023 como parte del paquete legislativo 'Fit for 55', busca reducir la intensidad de gases de efecto invernadero (GEI) en la energía utilizada a bordo de los buques. Sus objetivos principales son:
 - Reducción progresiva de emisiones de GEI: en el combustible usado a bordo, en comparación con los niveles de 2020
 - -2% en 2025, -6% en 2030 y hasta -80% en 2050
 - Promoción de combustibles renovables y cero emisiones (e-amoniaco, hidrógeno, biofuel y energías renovables como lo son la eólica o en este proyecto, la fotovoltaica)
 - Obligación de uso de electricidad en puerto (OPS-Onshore Power Supply) para buques de pasaje y portacontenedores desde 2030 en puertos principales.

Estas emisiones pueden mitigarse mediante la incorporación de energías renovables a la instalación, siguiendo el estudio del proyecto, la fotovoltaica es de momento la seleccionada para cubrir parte del consumo auxiliar, reduciendo el uso de generadores alimentados por fuelóleo. Además del factor de mejora ambiental, esta estrategia se alinea con las políticas internacionales que regulan las emisiones marítimas.

4.6. ANÁLISIS ECONÓMICO

Seguidamente, se muestra en este apartado el análisis económico teniendo en cuenta tanto el presupuesto de la instalación y el ahorro económico de combustible gracias al uso de energías renovables.

El presupuesto total a cubrir depende de todos los elementos por los que está compuesta la instalación fotovoltaica, además al precio final se le aplicara un 10% de IVA, reducido debido al tipo de instalación que es. La instalación fotovoltaica está compuesta por:

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

- Paneles fotovoltaicos
- Inversor
- Soporte
- Cable DC y AC
- Protecciones
- Montaje y puesta en marcha

Una vez se hagan la suma del cálculo final del proyecto más la comparativa de ahorro de combustible con y sin instalación fotovoltaica se hace un estudio de viabilidad a través de los métodos financieros Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Anual Neto (VAN). El TIR indica la tasa de rentabilidad anual esperada mientras que con el VAN se calcula el valor presente de los flujos de caja futuros generados por la instalación, comparándolo con la inversión inicial, siendo el proyecto rentable si el VAN es positivo. Este método se aplica para un tope de 25 años que es el tiempo de vida medio de una instalación fotovoltaica.

$$VAN = \sum \frac{\text{Flujo de Caja}}{(1 + \text{interés})^{\text{año}}} - \text{Inversion inicial}$$

5. RESULTADOS.

5.1. SELECCIÓN DE BUQUE

5.1.1. Análisis del gasto energético actual

Para calcular los litros necesarios de combustible se debe calcular la media de litros de combustible por kWh que consumen las potencias auxiliares;

$$\bar{C}_{L/kWh} = \frac{111'6065L/kWh}{461 kWh}$$

$$\bar{C}_{L/kWh} = 0'2421 L/kWh$$

5.2. SELECCIÓN DE MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO

5.2.1. Paneles fotovoltaicos

Cálculo de las dimensiones del área 1;

- Altura del puente: 3m
- $\theta = 90 - (47^\circ + 23'45'') = 19'55''$

$$S = \frac{3m}{\tan(19'55'')} = 8'44 m$$

$$S_{final} = 8'44m * 1'2 = 10 m$$

Por lo tanto, las dimensiones de la sombra producida por el puente de control en la cubierta del cocheró son de 10 m, por lo tanto, finalmente, teniendo en cuenta la eslora y manga del barco y el ancho y largo del puente el área que queda libre en la cubierta es de $360m^2$.

- $A_1 = 360m^2$
 - o $L_1 = 16'78 m$
 - o $B_1 = 21'67 m$

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

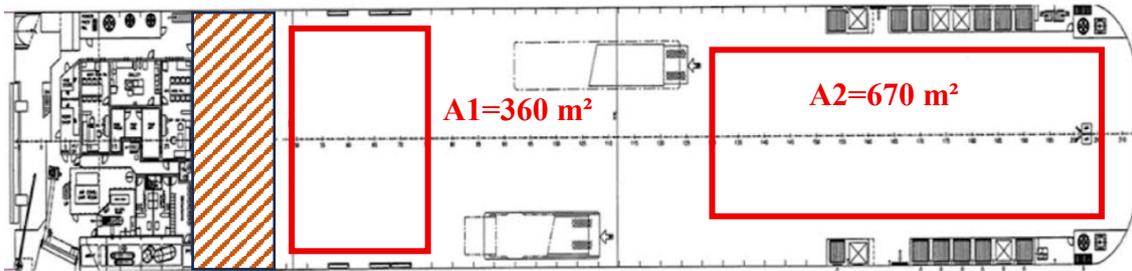


Figura 29: Representación de las dimensiones del área 1 teniendo en cuenta la sombra del puente

Cálculo de la d_{final} :

$$\theta = 90 - (47^\circ + 23'45'') = 19'55''$$

-Disposición Horizontal

$$d_H = \frac{1'1m * \text{Sen}(10^\circ)}{\tan(19'55'')} = 0'6m$$

$$d_{Hfinal} = 0'6 * 1'2 = 0'72m$$

-Disposición Vertical

$$d_V = \frac{1'7m * \text{Sen}(10^\circ)}{\tan(19'55'')} = 0'83m$$

$$d_{Vfinal} = 0'83 * 1'2 = 1m$$

En base a los paneles elegidos se dispone de una potencia de 530W por cada panel de 1,94m² por lo que para las dos áreas de las que dispone se pueden instalar:

- Área 1 (500m²)

Disposición horizontal:

$$23 = 1'67 * m + (m - 1) * 0'72$$

$$m = 7'32 \approx 7 \text{ paneles}$$

Alejandra García Fernández

$$21'67 = 1'1 * n$$
$$n = 19'7 \approx 19 \text{ paneles}$$

$$N^{\circ} \text{ de paneles} = 7 * 19 = 133 \text{ paneles}$$

Disposición vertical:

$$16'78 = 1'1 * m + (m - 1) * 1$$
$$m = 8'4 \approx 8 \text{ paneles}$$

$$21'67 = 1'67 * n$$
$$n = 12'97 \approx 12 \text{ paneles}$$

$$N^{\circ} \text{ de paneles} = 8 * 12 = 96 \text{ paneles}$$

- *Área 2 (670m²)*

Disposición horizontal:

$$38'46 = 1'67 * m + (m - 1) * 0'72$$
$$m = 16'4 \approx 16 \text{ paneles}$$

$$17'5 = 1'1 * n$$
$$n = 6'8 \approx 6 \text{ paneles}$$

$$N^{\circ} \text{ de paneles} = 16 * 6 = 96 \text{ paneles}$$

Disposición vertical:

$$38'48 = 1'1 * m + (m - 1) * 1$$
$$m = 21'5 \approx 21 \text{ paneles}$$

$$17'5 = 1'67 * n$$
$$n = 10'47 \approx 10 \text{ paneles}$$

$$N^{\circ} \text{ de paneles} = 21 * 10 = 210 \text{ paneles}$$

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

DISPOSICIÓN	HORIZONTAL	VERTICAL
Área 1	133	96
Área 2	96	210

Tabla 10: Tabla de resultados de la cantidad de paneles que pueden caber en cada área según la disposición

Finalmente, si se comparan ambas dimensiones, resulta más rentable si en el área 1 representada en la figura 24 se colocan los paneles como la disposición horizontal (figura 26) debido a que tiene más capacidad, y por la misma razón la disposición ideal para el área 2 representada en la figura 24 es la disposición vertical (figura 27).

$$N^{\circ} \text{ de paneles totales} = 133 + 210 = 343 \text{ paneles}$$

$$\text{Potencia total} = N^{\circ} \text{ de paneles} \times \text{potencia de cada panel}$$

$$\text{Potencia total} = 343 \text{ paneles} \times 530W = 181790W = 181'79kW$$

5.2.2. Selección de cableado y soportes

- *Inversor*

Como se calcula en el apartado anterior la instalación fotovoltaica consta de 343 paneles solares de 530 W cada uno distribuidos en dos zonas, área 1 en donde se posicionan 133 paneles en posición horizontal y el área 2 donde se posicionan 210 paneles en posición vertical. Debido a las condiciones explicadas en el apartado 4.2.2.1 y la potencia pico de 181,79 kW se escoge el inversor Huawei SUN2000-100KTL-M1[17], inversor trifásico de 100kW, con una capacidad de hasta 10 MPPTs (Maximum Power Point Trackers) cuyas características son las siguientes;



Figura 30: Inversor a utilizar en la instalación Huawei SUN2000-100KTL-M1

Especificaciones técnicas	SUN2000-100KTL-M1
Eficiencia	
Máxima eficiencia	98.8% @480 V, 98.6% @380 V / 400 V
Eficiencia europea ponderada	98.6% @480 V, 98.4% @380 V / 400 V
Entrada	
Tensión máxima de entrada ¹	1,100 V
Corriente de entrada máxima por MPPT	26 A
Corriente de cortocircuito máxima	40 A
Tensión de arranque	200 V
Tensión de funcionamiento MPPT ²	200 V – 1,000 V
Tensión nominal de entrada	720 V @480 Vac, 600 V @400 Vac, 570 V @380 Vac
Cantidad de rastreadores MPP	20
Cantidad máxima de entradas por MPPT	10
Salida	
Potencia activa	100,000 W
Max. Potencia aparente de CA	110,000 VA
Max. Potencia activa de CA (cosφ = 1)	110,000 W
Tensión nominal de salida	480 V/ 400 V/ 380 V, 3W+(N)+PE
Frecuencia nominal de red de CA	50 Hz / 60 Hz
Intensidad nominal de salida	120.3 A @480 V, 144.4 A @400 V, 152.0 A @380 V
Max. intensidad de salida	133.7 A @480 V, 160.4 A @400 V, 168.8 A @380 V
Factor de potencia ajustable	0,8 capacitivo ... 0,8 inductivo
Distorsión armónica total máxima	< 3%

Tabla 11: Ficha técnica del inversor

- Serie

$$N_{serie} = \frac{V_{m\acute{a}x_inversor}}{V_{oc_panel} * F_T}$$

$$N_{serie} = \frac{1100 V}{49,6 * 1,2} = 18,48 \approx 18 \text{ paneles en serie}$$

N_{serie} : Número de paneles en serie

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

$V_{m\acute{a}x_{inversor}}$: 1100 V (Fuente: Tabla 11)

V_{oc_panel} : 49,6 V (Fuente: Tabla 6)

F_T : 1,2, valor típico en ambientes marinos

A partir de la tensión en circuito abierto del panel V_{oc_panel} y aplicándose un factor de corrección por temperatura, se ha calculado que el número máximo de paneles en serie es 18.

- Paralelo

$$N_{paralelo} = \frac{N_T}{N_{serie}}$$

$$N_{paralelo} = \frac{343}{18} = 19 \text{ paneles en paralelo}$$

Dividiendo el total de 343 paneles entre los 18 paneles en serie, se obtiene un total de 19 strings en paralelo (18x19=342 paneles). Esto implica que un panel quedará fuera de la instalación, decisión que se justifica para mantener la simetría del sistema, evitar desbalances de potencia entre strings y asegurar que se respeten las tensiones y corrientes máximas admitidas por el inversor ya que, los paneles en serie forman un string, mientras que varios strings en paralelo alimentan al inversor. Esta configuración permite un aprovechamiento óptimo de la capacidad del inversor y garantiza el funcionamiento seguro y eficiente del sistema.

Posteriormente se realiza una verificación de la corriente máxima de entrada, ya que esta no debe ser superada por la corriente total en paralelo.

$$I_{entrada} = N_{paralelo} \times I_{sc_panel}$$

$$I_{entrada} = 19 * 13,94 = 264,48 \text{ A}$$

I_{sc_panel} : 13,92 A (Fuente: Tabla 6)

El inversor permite una corriente máxima de 26 A por MPPTs (Fuente: Tabla 11) y cada MPPTs admite hasta dos entradas de string, por lo tanto, al distribuir los 19 strings entre los 10 MPPTs. con un máximo de dos cadenas por MPPT;

$$I_{entrada} = 2 * 13,94 = 27,88 \text{ A}$$

Algunas entradas alcanzarían esa intensidad, superando el límite nominal, y debido a que se está realizando un sobredimensionamiento de una instalación fotovoltaica se crea la necesidad de instalación de un segundo inversor Huawei SUN2000-100KTL-M1 a modo de margen de seguridad, mejorando así la distribución de los strings, asignando aproximadamente la mitad de las cadenas a cada equipo, reduciendo la carga individual, y mejorando la gestión de la energía generada en las distintas zonas del buque. Se permite a su vez, un aprovechamiento más eficiente de los MPPTs. además de mejorarse la redundancia del sistema y facilitarse el mantenimiento en caso de fallos, aumentando la fiabilidad general de la instalación.

NOTA: El inversor cuenta con un margen de seguridad (20-25%) que le permite admitir corrientes ligeramente superiores a su valor nominal en condiciones puntuales, sin comprometer su funcionamiento ni su vida útil.

Finalmente, debido a la modificación de inversores, la distribución de los paneles se basará en dos zona diferenciadas; el área 1 con 133 paneles en disposición horizontal y el área 2 con 210 paneles en disposición vertical, como se ha mencionado anteriormente, para mantener una configuración equilibrada y eficiente se han establecido cadenas de 18 paneles conectados en serie, de este modo, en la primera zona se han configurado 7 strings en paralelo, haciendo un total de 126 paneles mientras que en la segunda zona suman un total de 216 paneles formando 12 strings, utilizando un total de 342 paneles de los 343 disponibles.

- *Cableado*

Los datos disponibles a tener en cuenta procedentes de los paneles fotovoltaicos son los siguientes:

FICHA TECNICA Panel Longi LR5-72HPH-530M	
Potencia nominal	$P_{m\acute{a}x} = 530 \text{ Wp}$
Tensión a potencia máx.	$V_{mpp} = 41,35V$
Corriente a potencia máx.	$I_{mpp} = 12,82A$
Tensión circuito abierto	$V_{oc} = 49,20V$
Corriente cortocircuito	$I_{sc} = 13,71A$
Eficiencia del panel	20,7%
Coefficiente temperatura Pmax	-0,34%/°C
Tensión máx. del sistema	1500V
Caja de conexiones	IP68,3 diodos
Garantía de potencia	84,8% al cabo de 25 años
Sección del cable de salida	4,0 mm ²

Tabla 12: Resumen ficha técnica paneles Longi LR5-72HPH-530M

- Sección del cable para corriente continua por caída de tensión;

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

$$S = \frac{2 * l * I}{\sigma * \Delta U}$$

l : 25 m

I_{SC} : 13,71 A * 19 strings en paralelo = 260,49 A

σ : 56 m/ $\Omega \cdot mm^2$

ΔU : (41'35V * 18 paneles) * 0,015 = 11,16V

$$S = \frac{2 * 25 * 260,49}{56 * 11,16} = 20'84 mm^2$$

Según la tabla de medidas normalizadas de sección del Reglamento Electrónico de Baja Tensión, se escoge la sección para el cable de corriente continua DC de 25 mm² redondeándolo al valor comercial más cercano.

Para realizar el cálculo por intensidad admisible de la sección del cable en corriente continua DC se toma como base la corriente total generada por los 19 strings en paralelo, cada uno con una corriente de 13,71 A, lo que da un total de 260,49 A. Si se tiene en cuenta la ITC-BT-40 y se toma de referencia las tablas de intensidades admisibles de la norma UNE-HD 60364-5-52 para conductores unipolares de cobre tipo RZ1-K, se determina que la sección ideal del cable es de 95 mm² ya que esta soporta una intensidad de hasta 285 A, proporcionando un margen de seguridad suficiente para garantizar el correcto funcionamiento de la instalación.

- Sección del cable para corriente alterna por caída de tensión;

$$I_{AC} = \frac{100\ 000}{\sqrt{3} * 400 * 0,95} = 151,93 A$$

P_{AC} : 100 000 W

V_{AC} : 400 V

$\cos\phi$: 0,95

$$S = \frac{\sqrt{3} * 25 * 151,93}{56 * 6} = 19'57 mm^2$$

l : 25 m

I_{AC} : 151'93A

σ : 56 m/ $\Omega \cdot mm^2$

$$\Delta U: 400 * 0,015 = 6V$$

Según la tabla de medidas normalizadas de sección del Reglamento Electrónico de Baja Tensión, se escoge la sección para el cable de corriente continua AC de 20 mm^2 redondeándolo al valor comercial más cercano.

Una vez se obtiene la corriente de salida del inversor (I_{AC}) se realiza la selección de sección de cable según intensidad admisible. Por motivos prácticos se decide elegir el mismo modelo de cable que en corriente continua por lo que para un cable RZ1-K en instalación fija a temperatura de 30°C , trifásico, en bandeja perforada y compuesto por cobre se seleccionan 50 mm^2 de sección, con un margen de hasta $176\text{A} > 151,93 \text{ A}$

	CAÍDA DE TENSIÓN	INTENSIDAD ADMISIBLE
DC	25 mm^2	95 mm^2
AC	20 mm^2	50 mm^2

Tabla 13: Tabla resumen del cálculo de secciones por ambos métodos

La sección del cable en corriente continua DC suele ser más gruesa que el de corriente alterna AC debido a que en corriente continua, aunque la tensión sea alta, en este caso 1500V la corriente no se transforma tan fácilmente como en la alterna, de este modo la intensidad es más alta para la misma potencia haciendo que la caída de tensión y el calentamiento del cable aumenten más rápidamente.

Debido a que se debe elegir la sección as restrictiva, finalmente se elegirán 95 mm^2 de sección para el cable de 25 m de corriente continua y 50 mm^2 de sección para el cable de 25 m de corriente alterna.



Figura 31: Conductor de cobre tipo RZ1-K, General Cable, [18]

5.3. SIMULACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO

5.3.1. Producción energética mensual

Este proyecto se ha diseñado calculando la potencia pico en base al espacio disponible en la cubierta superior del Buque de Estudio, es decir, que número de paneles se podían

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

colocar en el espacio libre disponible. Por ello para extraer la producción energética estimada para esta instalación fotovoltaica utilizaremos el software PVGIS con los datos disponibles a continuación:

- Potencia FV pico instalada: 181,79 kW
- La capacidad de la batería: 461000Wh
- El limitador de descarga: 80%
- El consumo diario: 461000Wh/día
- La inclinación=10°
- El azimut=orientado al sur 0°

PRODUCCIÓN ENERGÉTICA ESTIMADA PARA UN SISTEMA FV AUTÓNOMO

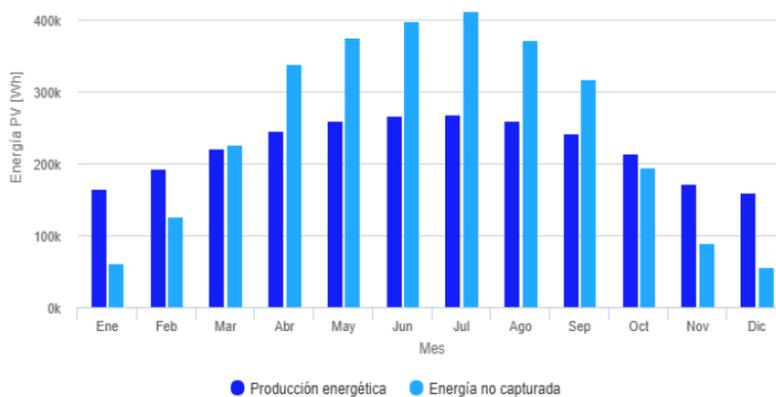


Figura 32: Gráfica representativa de la producción de energía estimada en el Puerto de Raos (Fuente: PVGIS)

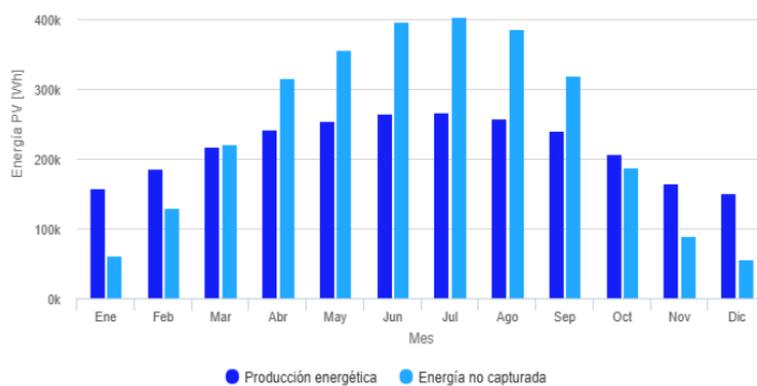


Figura 33: Figura 29: Gráfica representativa de la producción de energía estimada en el Kirol Portua (Fuente: PVGIS)

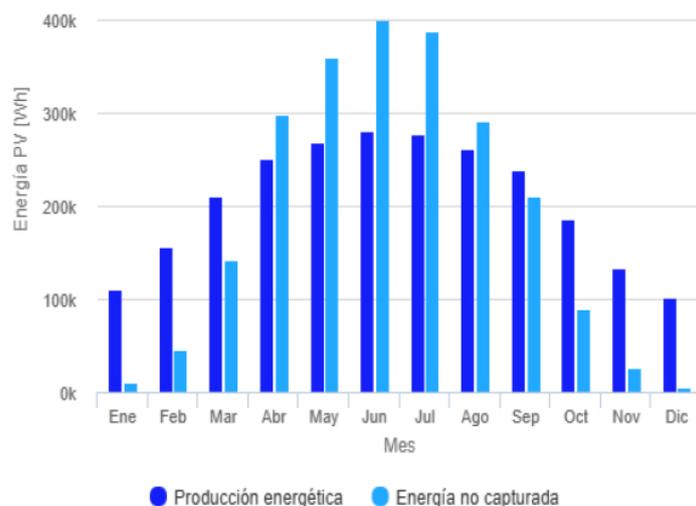


Figura 34: Figura 29: Gráfica representativa de la producción de energía estimada en el Floating Harbour (Fuente: PVGIS)

Gracias a los datos calculados por el software se extrae la producción energética media diaria (Wh/día), de cada localización introducida, en forma de tabla:

RENDIMIENTO MEDIO MENSUAL EN EL PUERTO DE RAOS

Mes	E_d	E_l	f_f	f_e
Enero	164461.0	61121.1	54.3	100.0
Febrero	192729.8	125805.4	66.9	100.0
Marzo	221251.1	226688.7	79.1	100.0
Abril	245845.5	338113.5	87.0	100.0
Mayo	259601.2	375795.4	90.7	100.0
Junio	266363.7	398748.9	87.7	100.0
Julio	268299.1	411573.8	92.2	100.0
Agosto	258982.2	371630.3	93.2	100.0
Septiembre	241537.7	318110.2	91.2	100.0
Octubre	213215.2	195495.2	83.0	100.0
Noviembre	171983.6	89884.5	58.8	100.0
Diciembre	159198.4	56755.4	54.2	100.0

E_d: Producción energética media diaria [Wh/día].
 E_l: Energía media diaria no capturada [Wh/día].
 f_f: Porcentaje de días con la batería cargada completamente [%].
 f_e: Porcentaje de días en los que la batería se descargó completamente [%].

Tabla 14: Ejemplo de tabla que exporta el software PVGIS acerca del rendimiento medio mensual en el Puerto de Raos (Fuente: PVGIS)

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

Para convertir los datos a producción mensual, es decir, kWh/mes, se selecciona el valor E_d de la tabla, es decir, la energía media generada por día en cada mes y se multiplica ese valor por el número de días del mes, haciendo una conversión posterior a kWh. Con esto se extrae la producción mensual de cada mes en cada localización del año 2023.

PRODUCCION MENSUAL (kWh)			
MESES	SANTANDER	SAN SEBASTIÁN	BRISTOL
ENERO	4433695,55	8784614,18	8329784,32
FEBRERO	7874466,18	12293592	12571807,4
MARZO	13726580	17760014	17327497,1
ABRIL	20810742,2	20548612,3	19886881,1
MAYO	26159414,9	24535929,1	24229846
JUNIO	23524928,3	21901897,7	22391668,4
JULIO	23829813,8	24401387,4	24098360,2
AGOSTO	20086146,1	21661342	22715144,4
SEPTIEMBRE	15171060,1	18722555,1	18906333,1
OCTUBRE	9700919,4	13464109,8	13033020,3
NOVIEMBRE	5218412,12	8169878,24	7913483,41
DICIEMBRE	3216414,1	7212504,41	7083253,93
Total general	173752593	199456436	198487080

Tabla 15: Producción mensual y total de las tres localizaciones a estudiar de la ruta del año 2019-2023
(Fuente: Elaboración propia)

Si se analizan los datos a primera vista se observan posibles contradicciones respecto al puerto de Bristol, puerto que dispone de menor producción durante los meses de invierno. Este fenómeno no es tan extraño puesto que cobra sentido si no solo se tiene en cuenta la temperatura del lugar ya que, a su vez, La producción fotovoltaica depende de aspectos como la irradiación global, la latitud y las condiciones climatológicas puntuales. Aunque Bristol recibe menos sol a lo largo del año, en los meses de primavera-verano puede tener mejores condiciones puntuales de irradiancia. Más horas de sol efectivas a causa de disponer latitudes más altas. Menos nubosidad en comparación a los meses españoles, o incluso menor temperatura media ya que esto hace que los paneles mejoren su eficiencia debido a que rinden mejor con temperaturas más frías.

Debido a que el estudio de producción de energía se realiza durante toda la ruta, se decide hacer un estudio medio de los tres puertos, para posteriormente saber el total anual de producción de los paneles fotovoltaicos.

MESES	ENERGÍA GENERADA (kWh)
ENERO	7.182,70
FEBRERO	10.913,29
MARZO	16.271,36
ABRIL	20.415,41
MAYO	24.975,06
JUNIO	22.606,16
JULIO	24.109,85
AGOSTO	21.487,54
SEPTIEMBRE	17.599,98
OCTUBRE	12.066,02
NOVIEMBRE	7.100,59
DICIEMBRE	5.837,39
Total general	190.565,37

Tabla 16: Media de energía producida mensualmente en los tres puertos del 2019 al 2024

Energía generada total medio en los tres puertos del año 2019 al 2024
 = 190565,37 kWh

5.3.2. Consumo mensual

MES	DIAS POR MES	CONSUMO MENSUAL (461 kWh/Día)
ENERO	31	14291
FEBRERO	28	13369
MARZO	31	14291
ABRIL	30	13830
MAYO	31	14291
JUNIO	30	13830
JULIO	31	14291
AGOSTO	31	14291
SEPTIEMBRE	30	13830
OCTUBRE	31	14291
NOVIEMBRE	30	13830
DICIEMBRE	31	14291
TOTAL	365	168726

Tabla 17: Tabla comparativa del consumo de la ruta total y mensual en el año 2023 (Fuente: Elaboración propia)

Consumo total del año 2019 al 2024 = 16872'6 kWh

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

El consumo eléctrico del buque se mantiene constante a lo largo del año, con una demanda diaria fija de 461 kWh lo que se traduce a 14291 kWh al mes en los meses de 31 días. Esta estabilidad en el consumo contrasta con la variabilidad de la producción renovable lo que hace imprescindible una planificación energética que contemple la acumulación en baterías o el respaldo con fueloil.

$$\bar{C}_{L/kWh} = \frac{111,605 L}{461 kWh} = 0,242 L/kWh$$

5.3.3. Cálculo de autoconsumo

Para realizar el cálculo del autoconsumo, es decir, la energía que se logra cubrir con los paneles, se realiza el mínimo entre la producción mensual y el consumo mensual, significando así, que si produces más energía de la que consumes, solo puedes usar la parte que necesites: Por el contrario, si se produce menos, auto consumes todo lo que generas, cubriéndose el resto con combustible.

Autoconsumo mensual (kWh) = min (producción mensual, consumo mensual)

MESES	AUTOCONSUMO (kWh)
ENERO	6.477,18
FEBRERO	7.613,78
MARZO	9.482,30
ABRIL	10.363,38
MAYO	11.524,47
JUNIO	11.360,39
JULIO	11.620,75
AGOSTO	11.029,33
SEPTIEMBRE	9.820,19
OCTUBRE	8.741,56
NOVIEMBRE	6.420,13
DICIEMBRE	5.527,22
Total general	109.980,68

Tabla 18: Calculo de los autoconsumos mensuales de cada localización

Autoconsumo total del año 2019 al 2024 = 109980,88 kWh

El análisis del autoconsumo evidencia que, en los meses con mayor radiación solar, como mayo, junio y julio, gran parte y casi en su totalidad del consumo eléctrico puede ser cubierta mediante la generación fotovoltaica. Sin embargo, en los meses de invierno, la energía generada es insuficiente para cubrir la demanda diaria, obligando a complementarlo con combustible fósil.

5.3.4. Cálculo de la energía a cubrir por combustible

$$\begin{aligned} \text{Energía a cubrir con combustible (kWh)} \\ = \text{Consumo mensual} - \text{Autoconsumo mensual} \end{aligned}$$

MESES	ENERGÍA A CUBRIR (kWh)
ENERO	7.813,82
FEBRERO	5.755,22
MARZO	4.808,70
ABRIL	3.466,62
MAYO	2.766,53
JUNIO	2.469,61
JULIO	2.670,25
AGOSTO	3.261,67
SEPTIEMBRE	4.009,81
OCTUBRE	5.549,44
NOVIEMBRE	7.409,87
DICIEMBRE	8.763,78
Total general	58.745,32

Tabla 19: Tabla de resultados de los cálculos de la energía necesaria a cubrir por combustible mensualmente en los tres puertos

$$\begin{aligned} \text{Energía total a cubrir en los tres puertos del año 2019 al 2024} \\ = 58745,32 \text{ kWh} \end{aligned}$$

El análisis de la energía mensual a cubrir, pone en manifiesto diferencias relevantes en función de la época del año donde se esté realizando el estudio. Por lo general los meses donde se necesita mayor aporte energético mediante combustibles fósiles coinciden con los meses con menor producción solar, siendo, enero, noviembre y diciembre.

5.4. COMPARATIVA

Teniéndose en cuenta los datos en base al cálculo horario se realizan los cálculos para extraer los litros de combustible necesarios para cubrir la potencia auxiliar con paneles para posteriormente hacer la comparativa sin paneles.

$$\text{Litros necesarios sin paneles} = 168726 \text{ kWh} * 0,242 \frac{\text{L}}{\text{kWh}} = 40831,69 \text{ Litros}$$

$$\text{Litros necesarios con paneles} = 58745,31 \text{ kWh} * 0,242 \frac{\text{L}}{\text{kWh}} = 14222,1 \text{ Litros}$$

$$\text{Ahorro de combustible en LITROS} = 40821,69 \text{ L} - 14222,1 \text{ L} = 26599,6 \text{ L}$$

Según los precios de búnker reportados para junio de 2025 en Rotterdam, que es el puerto de referencia en Europa, el fuelóleo pesado (IFO 380) se cotiza alrededor de 489 USD/tonelada [19], lo que equivale a;

$$\text{Densidad del fuelóleo} = 0,99 \text{ kg/L}$$

$$1 \text{ tonelada} = 1000 \text{ L}$$

$$489 \text{ USD}/1000\text{L} = 0,489 \text{ USD/L}$$

$$1\text{USD} = 0,92\text{EUR} \rightarrow 0,45\text{€}/\text{L}$$

$$\text{Coste sin paneles} = 40831,69 \text{ L} * \frac{0,45\text{€}}{\text{L}} = 18374,26\text{€}$$

$$\text{Coste con paneles} = 14222,1 \text{ L} * \frac{0,45\text{€}}{\text{L}} = 6399,94\text{€}$$

$$\text{Ahorro de combustible en EUROS} = 26599,6 \text{ L} * \frac{0,45\text{€}}{\text{L}} = 11969,81 \text{ €}$$

Con estas gráficas se hace la comparativa por meses entre la producción energética diaria horaria de la instalación y el consumo diario por horas del buque, teniéndose en cuenta datos desde 2019 hasta 2023. La potencia pico ronda los 181 kWh por lo que si se tiene en cuenta a modo de comprobación meses como agosto donde sobra producción energética ya que alcanza los 90kWh y se compara con enero donde apenas llega a 45kWh se pueden verificar los resultados.

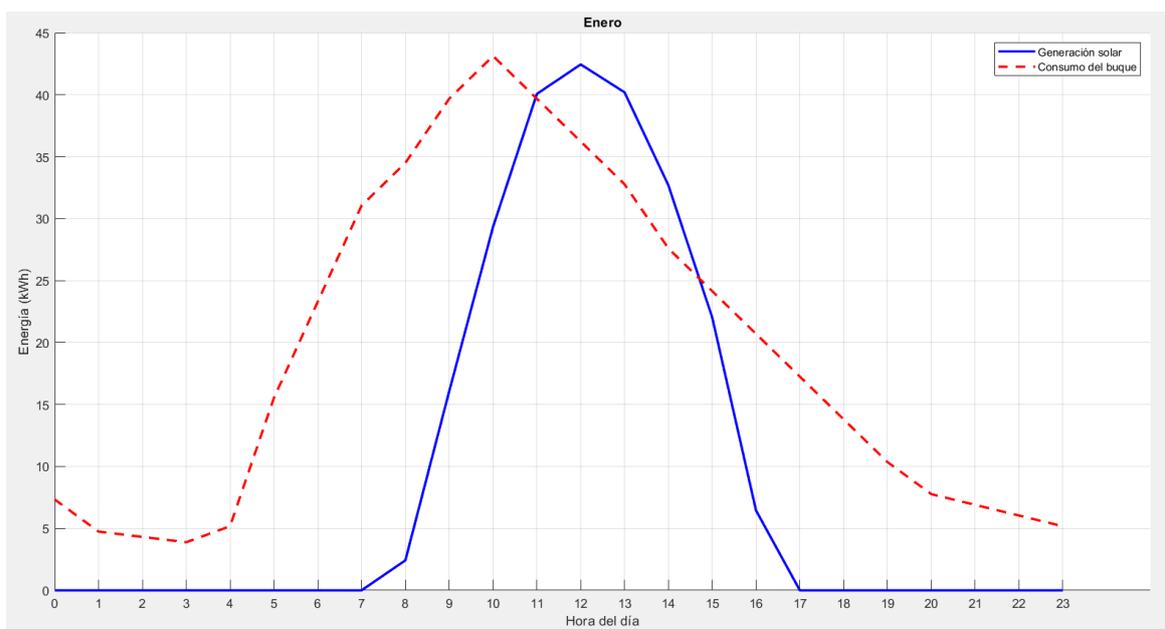


Figura 35: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en ENERO del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

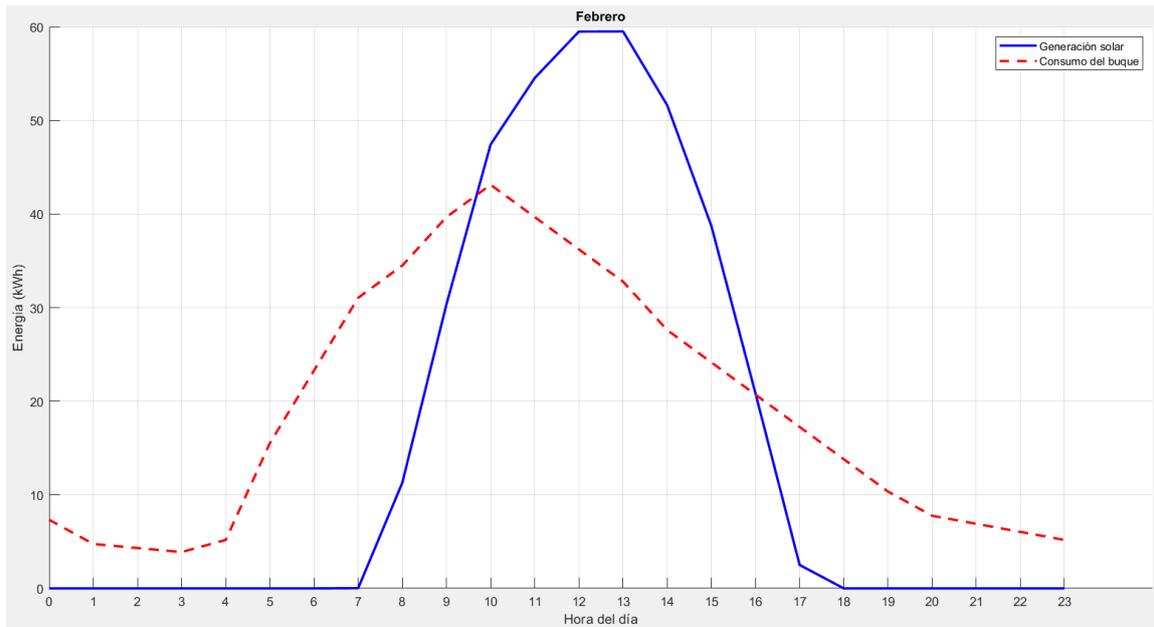


Figura 36: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en FEBRERO del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)

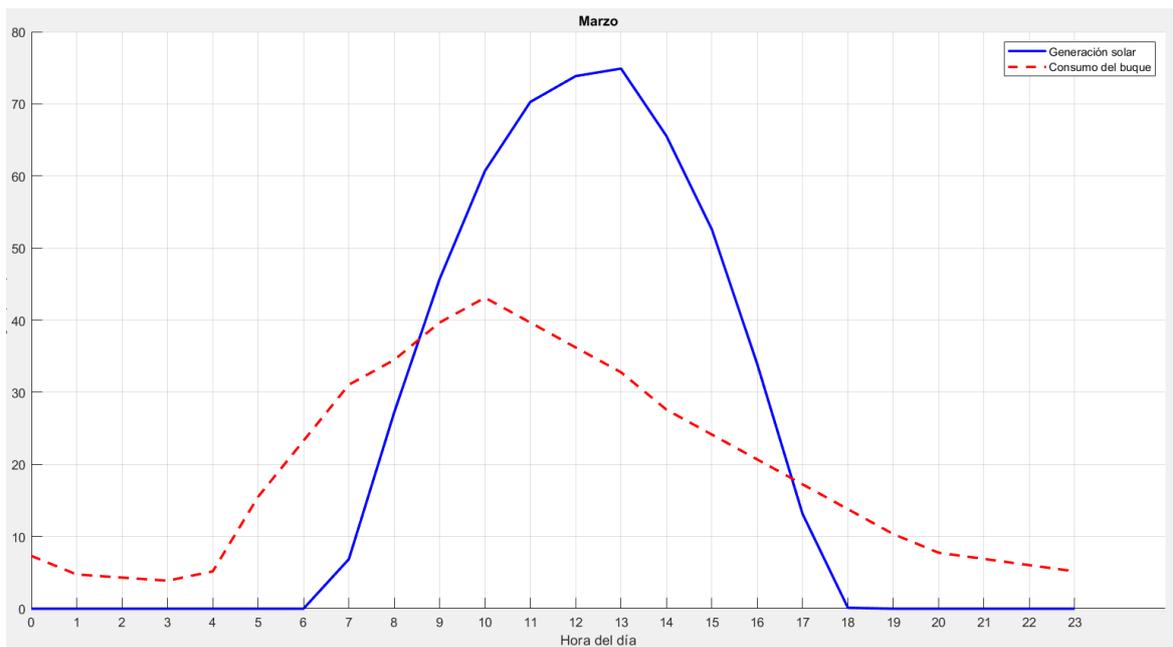


Figura 37: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en MARZO del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)

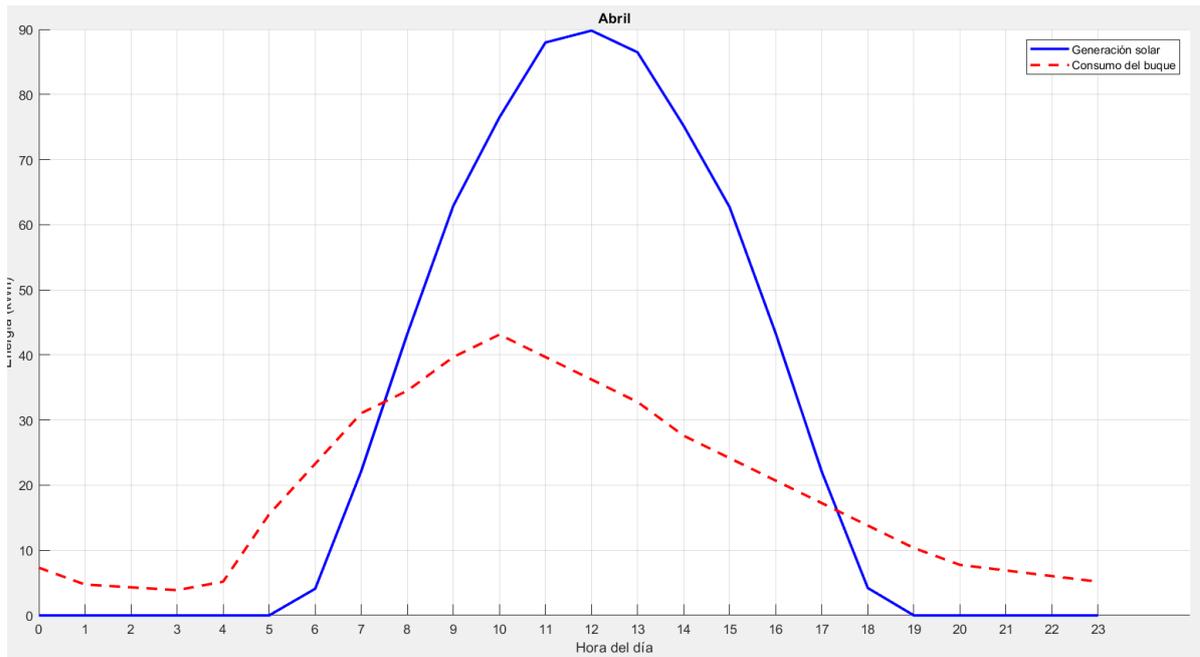


Figura 38: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en ABRIL del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)

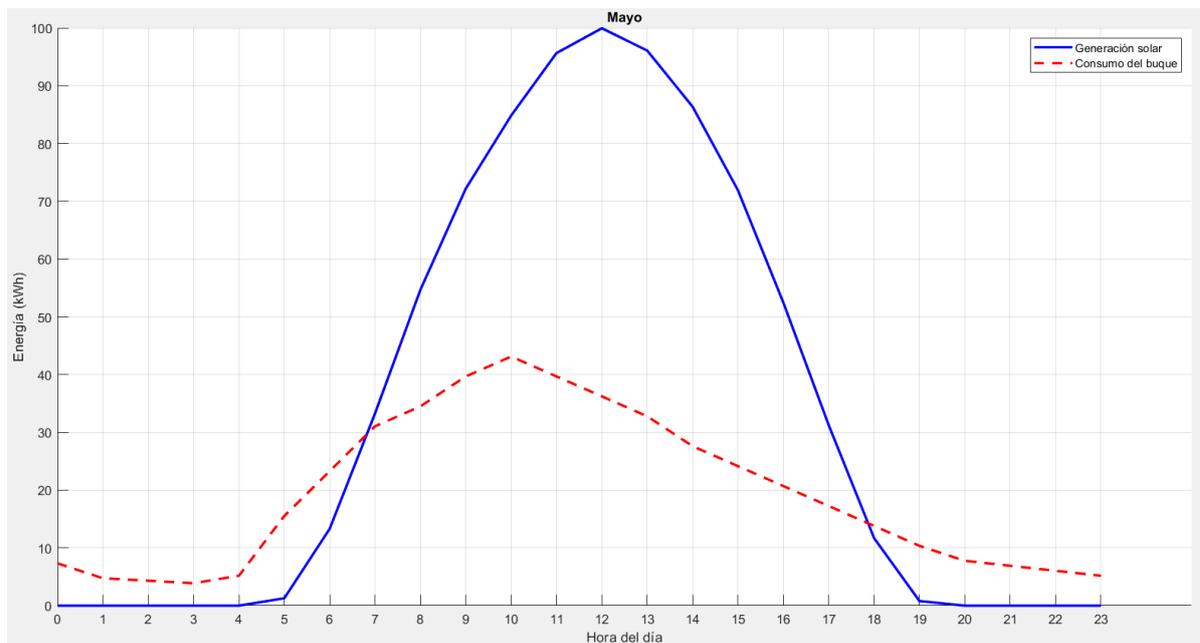


Figura 39: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en MAYO del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

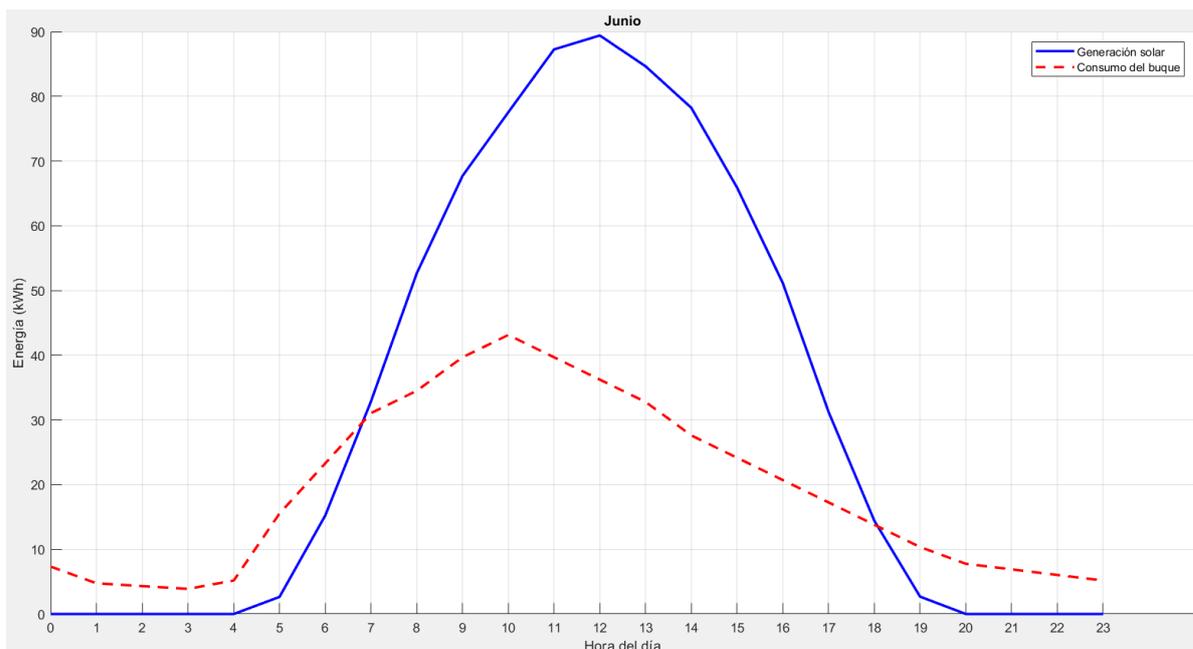


Figura 40: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en JUNIO del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)

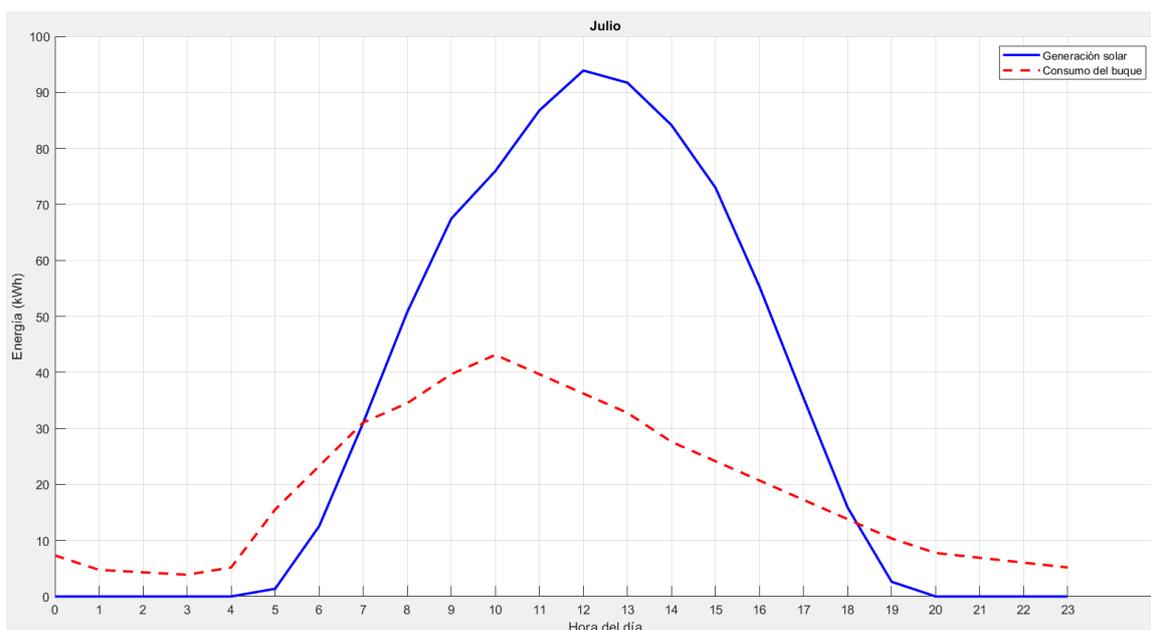


Figura 41: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en JULIO del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)

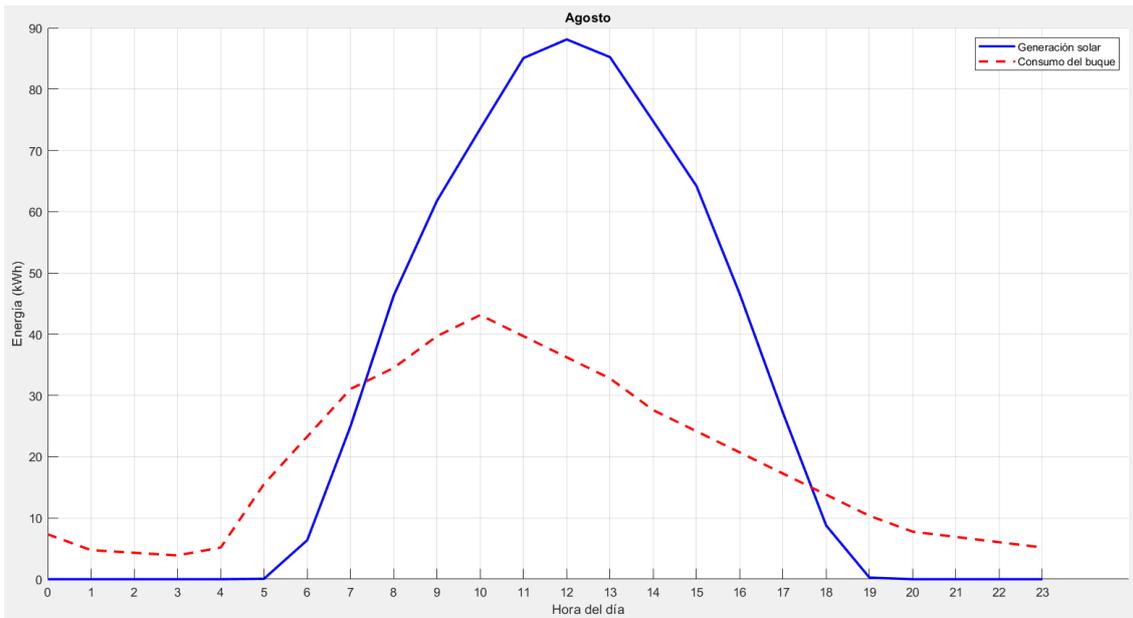


Figura 42: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en AGOSTO del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)

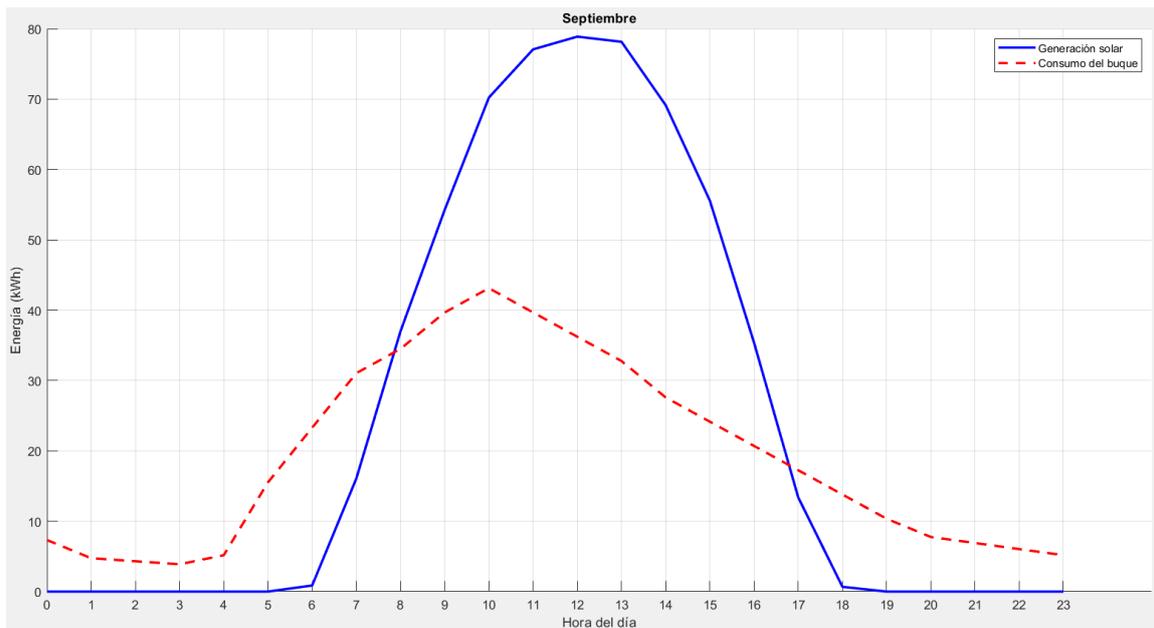


Figura 43: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en SEPTIEMBRE del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

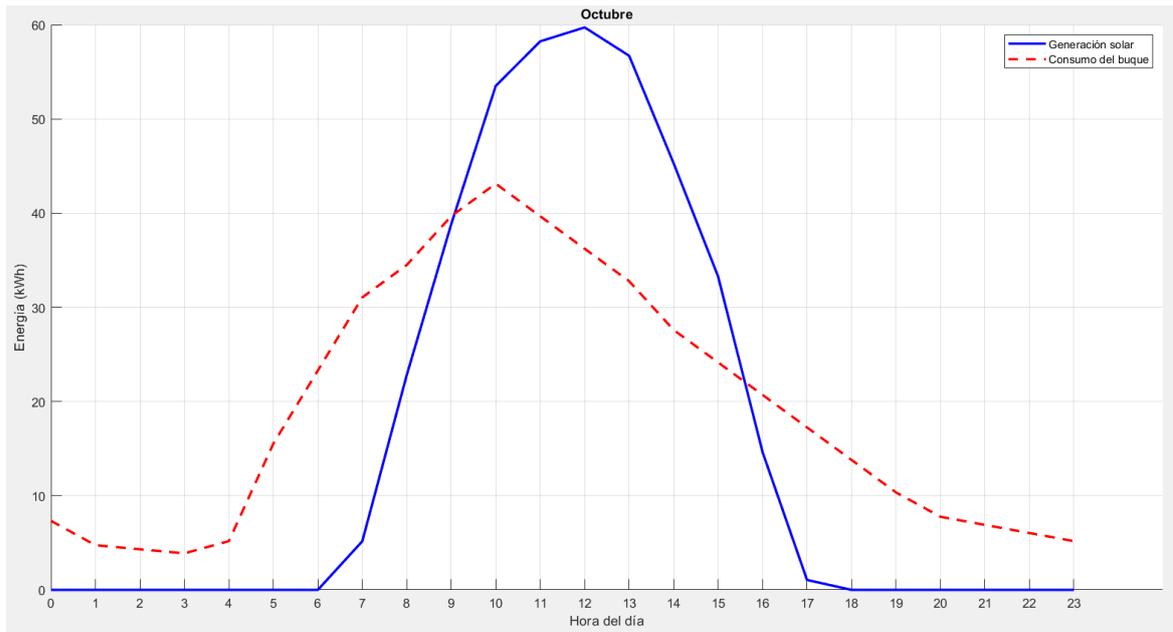


Figura 44: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en OCTUBRE del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)

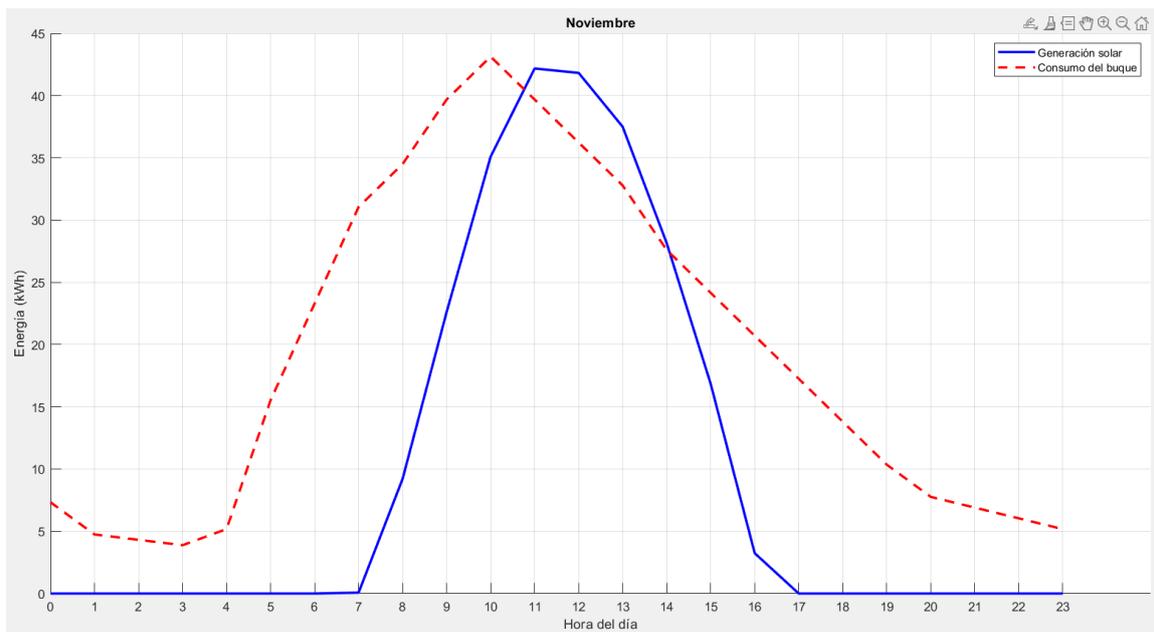


Figura 45: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en NOVIEMBRE del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)

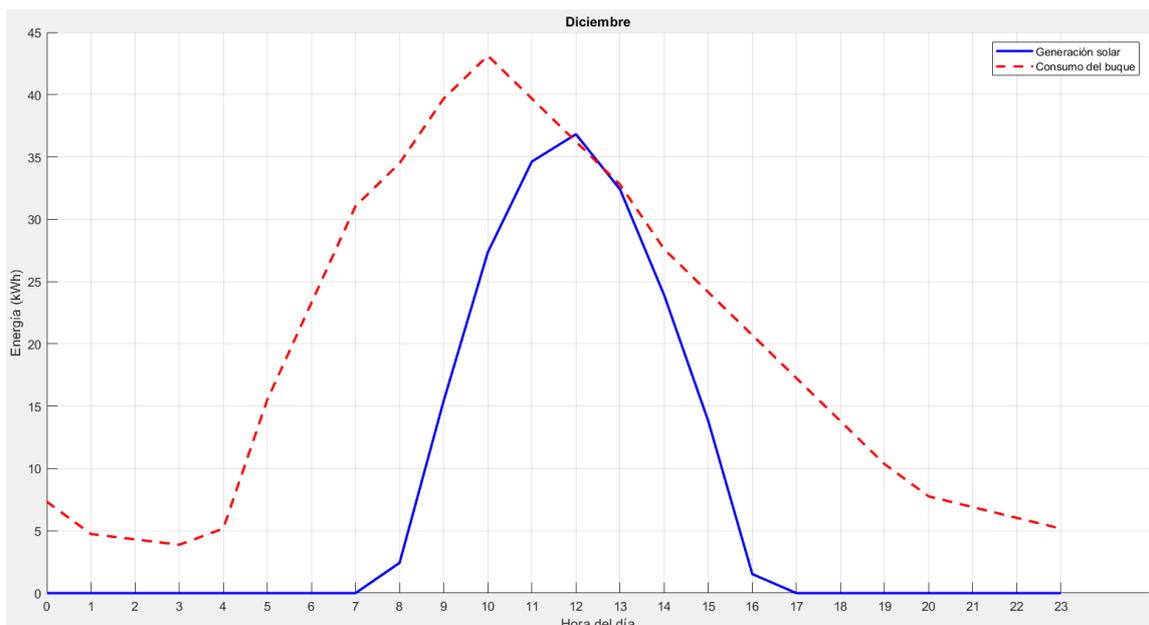


Figura 46: Media diaria horaria del consumo en comparativa a la producción energética del Buque Estudio en DICIEMBRE del 2019 al 2023 (Fuente: elaboración propia con el uso de Matlab)

5.5. ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL Y REDUCCIÓN DE EMISIONES

En base al Buque de Estudio analizado el consumo energético asociado exclusivamente a 168726 kWh lo que supone aproximadamente 9094,3 L anuales de fuelóleo, lo que representa una fuente considerable de emisiones contaminantes, especialmente en navegación a baja velocidad o en atraque en puerto.

Según los factores de emisión adoptados por la Organización Mundial Internacional (IMO) el fuelóleo pesado (HFO) tiene un factor de emisión de 3,114 kg de CO₂ por kg de combustible consumido [1].

$$\text{Emisiones anuales de CO}_2 = 9094,3 \text{ L} * 3,114 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{L}} = 28319,65 \text{ kg CO}_2/\text{año}$$

Emisiones las cuales se mtigan por lo ya mencioando anteriormente, el uso de una instalación fotovoltaica.

Por lo tanto, la instalación de un sistema de generación solar auxiliar no solo tendría beneficios ambientales directos, sino que también permitiría anticiparse al endurecimiento normativo previsto en los próximos años, mejorando la competitividad del buque reduciendo su huella de carbono.

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

En conclusión, el refuerzo de potencias auxiliares con fuentes de energías renovables a bordo representa un paso firme hacia una operación más sostenible, alineada con las directivas internacionales de descarbonización del transporte marítimo.

5.6. ANÁLISIS ECONÓMICO

PRODUCTO	PRECIO/Ud	UNIDADES	PRECIO TOTAL
Panel fotovoltaico	225,00 €	342	76.950,00 €
Inversor	4.751,23 €	2	9.502,46 €
Cable AC (25m)	221,50 €	3	664,50 €
Cable DC(25m)	421,00 €	1	421,00 €
Protecciones	170,00 €	1	170,00 €
Montaje y puesta en marcha	3.000,00 €	1	3.000,00 €
TOTAL INSTALACIÓN			90.707,96 €
TOTAL 10% IVA			99.778,76 €

Tabla 20: Presupuesto al compuesto de todos los elementos de la instalación fotovoltaica

AÑO	AHORRO ANUAL (€)	Factor de devaluación	Valor monetario aplicando el interés (respecto a hoy)	VAN (€)
0	-99778,76			
1	11969,81	1	11969,81	-99778,76
2	11969,81	0,952380952	11399,81905	-88521,941
3	11969,81	0,907029478	10856,97052	-77664,9704
4	11969,81	0,863837599	10339,97193	-67324,9985
5	11969,81	0,822702475	9847,59231	-57477,4062
6	11969,81	0,783526166	9378,659343	-48098,7469
7	11969,81	0,746215397	8932,056517	-39166,6903
8	11969,81	0,71068133	8506,720492	-30659,9698
9	11969,81	0,676839362	8101,638564	-22558,3313
10	11969,81	0,644608916	7715,846251	-14842,485
11	11969,81	0,613913254	7348,425001	-7494,06003
12	11969,81	0,584679289	6998,500001	-495,560026
13	11969,81	0,556837418	6665,238096	6169,67807
14	11969,81	0,530321351	6347,845806	12517,5239
15	11969,81	0,505067953	6045,567434	18563,0913

Tabla 21: Calculo de la rentabilidad del proyecto

Con una inversión inicial de 99.778,76 €, un ahorro anual de combustible de 11.969,81€/año y aplicando un interés del 5% debido a que el proyecto se basa en una instalación fotovoltaica, se ve reflejado en la tabla el cálculo del Valor Anual Neto,

resultando positivo en el año 13, significando así que el proyecto es rentable a partir de dicho año. Asimismo, se calcula el TIR del año 1 al 13 obteniéndose un 7,02%, valor mayor que el interés aplicado por lo que también resultaría rentable.

6. CONCLUSIONES.

El objetivo principal de este proyecto se basa en el ahorro de combustible del tipo de buque más adecuado para instalar uno de los diversos tipos de energías renovables del mercado, para posteriormente aprovechar todos los beneficios que esto supone. Pero, ¿Qué beneficios saca realmente una empresa instalando una planta fotovoltaica en un buque cochera? Basándose en los datos, una vez se haya construido la instalación, gracias al cálculo del TIR y el VAN se sabe que esta tiene una rentabilidad a largo plazo positiva, y que, tras cubrirse esos 13 años el ahorro anual, es decir, la ganancia que supondría sin el interés aplicado sería de 11970€. Además, es destacable la reducción de emisiones que se consiguen al disminuir el consumo de combustible, teniéndose en cuenta los beneficios que esto supone para la empresa en vista a ojos de la UE y las posibles subvenciones, méritos y visibilidad que a la larga reciben las empresas gracias a su lucha por reducir la huella de carbono.

En conclusión, no es fácil ni de bajo coste la introducción de energías renovables a los recursos energéticos ya existentes, pero no imposible. Se requiere a priori de una gran inversión, sin embargo, a la larga esta se convertirá en un beneficio económico para la empresa además de una reducción de la huella de carbono necesaria para seguir poder disfrutando y explotando de manera limpia, segura y legal el lugar donde vivimos.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. *Sitio web de la IMO* [en línea]. [Consulta: 1 abril 2025]. Disponible en: <https://www.imo.org/>
- [2] INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. *Home - ICCT* [en línea]. [Consulta: 1 abril 2025]. Disponible en: <https://theicct.org/>
- [3] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. *Sitio web de la IMO* [en línea]. [Consulta: 6 mayo 2025]. Disponible en: <https://www.imo.org/>
- [4] MARINETRAFFIC. *MarineTraffic: Global Ship Tracking Intelligence* [en línea]. [Consulta: 27 agosto 2025]. Disponible en: <https://www.marinetraffic.com/es/ais/home/shipid:6740890/zoom:6>
- [5] DELFIN GROUP. *Prácticas sostenibles para optimizar el transporte y minimizar el riesgo ambiental* [en línea]. [Consulta: 8 abril 2025]. Disponible en: <https://delfingroupco.com.pe/noticias/695-practicas-sostenibles-para-optimizar-el-transporte-y-minimizar-el-riesgo-ambiental>
- [6] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. *Fourth Greenhouse Gas Study 2020* [en línea]. [Consulta: 6 mayo 2025]. Disponible en: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/fourth-imo-greenhouse-gas-study-2020.aspx>
- [7] CARO, R. V. *Propulsión asistida por el viento con velas rígidas – Blog Naval*. Fundación Exponav en Ferrol [en línea]. [Consulta: 7 mayo 2025]. Disponible en: <https://exponav.org/blog/puertos-y-buques/propulsion-asistida-por-el-viento-con-velas-rigidas/>
- [8] SOLARDUCK. *About Us* [en línea]. [Consulta: 8 mayo 2025]. Disponible en: <https://solarduck.tech/about-us/>
- [9] AUTOSOLAR. *Estructura paneles solares | Estructura para placas solares* [en línea]. [Consulta: 20 mayo 2025]. Disponible en: <https://autosolar.es/estructura-paneles-solares>
- [10] MEDIAEXPERT.PL. *Ecoflow Elastyczny 100W Panel fotowoltaiczny* [en línea]. [Consulta: 20 mayo 2025]. Disponible en: <https://www.mediaexpert.pl/dom/inteligentny-dom/panele-fotowoltaiczne/panel-fotowoltaiczny-ecoflow-elastyczny-100w>
- [11] CORPOWER OCEAN. *Wave Power. To Power the Planet* [en línea]. [Consulta: 8 mayo 2025]. Disponible en: <https://corpowerocean.com/>
- [12] MARINETRAFFIC.COM. *AUTOSUN (MMSI: 255801490) Ship Photos* [en línea]. [Consulta: 12 mayo 2025]. Disponible en: <https://www.marinetraffic.com/en/photos/of/ships/shipid:299710/shipname:AUTOSUN>

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables

- [13] EUROPEAN COMMISSION. *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)* [en línea]. [Consulta: 12 mayo 2025]. Disponible en: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/
- [14] LONGI. *Sitio web oficial* [en línea]. [Consulta: 27 junio 2025]. Disponible en: <https://www.longi.com/es/>
- [15] ALTE STORE. *The Role of an Inverter in a Solar Electric System* [en línea]. [Consulta: 1 julio 2025]. Disponible en: <https://www.altestore.com/pages/the-role-of-an-inverter-in-a-solar-electric-system>
- [16] EMASCARÓ. *¿Qué son los grados de protección IP? - Faro Barcelona* [en línea]. [Consulta: 27 junio 2025]. Disponible en: <https://faro.es/es/blog/que-es-el-indice-de-proteccion/>
- [17] UNIÓN EUROPEA. *Reglamento (UE) 2015/757 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2015* [en línea]. Diario Oficial de la Unión Europea, 2015. [Consulta: 23 junio 2025]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/reg/2015/757/oj/spa>
- [18] SUMINISTROS DEL SOL. *Huawei SUN2000-100KTL-M1 | Inversor trifásico de 100kW* [en línea]. [Consulta: 30 junio 2025]. Disponible en: <https://suministrosdelsol.com/es/inversor-conexion-a-red/939-inversor-huawei-sun2000-100ktl-m1.html>
- [19] ILUMITEC. *Venta Cable RZ1-K flexible Libre de Halógenos 1X50 mm² 0,6/1 KV EXZHELLENT GENERAL CABLE* [en línea]. [Consulta: 30 julio 2025]. Disponible en: <https://www.ilumitec.es/cable-unipolar-libre-halogenos-50-mm2-rz1k>
- [20] BUNKER PORTS NEWS. *Bunker Prices Worldwide, Energy, Bunker Ports News Worldwide* [en línea]. [Consulta: 25 junio 2025]. Disponible en: <https://www.bunkerportsnews.com/BunkerPrices.aspx?ElementName=BunkerPrices>

Ahorro de combustible en un buque tipo con fuentes de energías renovables