



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE
NÁUTICA E MÁQUINAS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

“ENERGÍAS RENOVABLES EN EL BUQUE”

GRADO EN “TECNOLOGÍAS MARINAS”
ENERGÍA Y PROPULSIÓN

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

NOVIEMBRE – 2020

AUTOR: CARLOS COUCE RODRÍGUEZ

DIRECTOR: ÁLVARO BAALIÑA INSUA

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, en especial padres y hermanos, el apoyo y ánimo que me han transmitido durante mi etapa cursando el Grado en Tecnologías Marinas. Sin su comprensión y ayuda me habría sido imposible llegar hasta aquí. Gracias por brindarme y realizar todo lo posible para que mi única preocupación fuese avanzar en mis estudios, pudiendo cumplir con uno de mis principales objetivos académicos y personales. En particular, agradecerle a mi hermano Jaime la inestimable ayuda aportada a la realización de este trabajo de fin de grado, sin sus conocimientos y soluciones el camino recorrido durante la elaboración de este habría sido mucho más largo y obstaculizado.

En segundo lugar, pese a no hacerle justicia estas palabras a todo lo que he recibido de ella durante este período, agradecerle a mi pareja Pilar el apoyo incondicional y confianza transmitidos en todo momento, estando siempre dispuesta a ayudar fuese el problema que fuese, no permitiéndome que la motivación o el ánimo desfalleciese ni un solo instante.

En tercer lugar, agradecer a mis compañeros de piso Pablo y Julia el interés mostrado en mis estudios pese a no pertenecer a su rama, así como su apoyo y fácil convivencia, haciendo que mi experiencia universitaria esté repleta de anécdotas inolvidables.

En cuarto lugar, agradecer a todos mis amigos, y en especial a Ester y Jaime, haberme visto progresar y crecer durante esta etapa de mi vida, aportando siempre una paciente escucha y un sabio consejo a mis preocupaciones y una gran alegría ante mis éxitos. También mencionar a Inés, quién fruto de su inocencia respecto al mundo naval y mercante, dijo en una soleada tarde de agosto observando un mercante fondeado frente a la playa de Ver, de forma aleatoria, la semilla que terminó dándome la idea de la que surge el presente trabajo de fin de grado.

En quinto lugar, agradecer a todos mis compañeros de clase, en especial Cajoto, Nacho y Joaquín, el tiempo compartido en las aulas y las explicaciones que bien han valido algún que otro aprobado. Sin vosotros no habría sido lo mismo.

Por último, agradecer a todos aquellos que han compartido conmigo mi Erasmus en Sopot, sin duda la mejor experiencia que he vivido hasta el momento y la mejor oportunidad que me ha brindado la universidad para crecer como persona. Gracias por haber logrado que me sienta como en casa a 3000 km de ella.

RESUMEN

Este trabajo de fin de grado se centra en estudiar la viabilidad técnica, energética y económica de una instalación de producción de energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos en el buque de pasaje “Benchijigua Express”.

Primeramente, se explicarán los conceptos básicos por los que se produce energía eléctrica a partir de la radiación solar, destacando el efecto fotoeléctrico. Además, se profundizará mínimamente en el funcionamiento de un panel fotovoltaico y los distintos tipos disponibles en el mercado actualmente.

A continuación, se estudiará la radiación solar media en la ruta que realice dicho buque, con el fin de calcular la capacidad de producción de los paneles solares en función del máximo número posible que se pueda disponer en la cubierta de intemperie superior del mismo. Así, se podrá comparar con los consumos realizados por los motores utilizados para generar la misma cantidad de energía eléctrica (previamente calculados en función del motor, el régimen de trabajo y el hidrocarburo utilizado) y conocer el consecuente ahorro de combustible y emisiones que supondría dicha instalación fotovoltaica a bordo.

Por otra parte, se estudiará la magnitud y forma de toda la instalación fotovoltaica (más allá de únicamente los paneles) con el fin de poder conocer dos aspectos principales: el espacio ocupado por el sistema fotovoltaico y su consecuente viabilidad; y un precio real de todo el conjunto, que se enfrentará al ahorro generado de forma que se pueda saber el período de amortización de la instalación.

Por último, se presentarán unas conclusiones que permitan vislumbrar la viabilidad (o no) de un sistema de producción de energía eléctrica basado en el proceso fotovoltaico, fortaleciendo así el argumento defensor de aquellos que apuestan por la implementación de las energías renovables en el sector marítimo mercante.

RESUMO

Este traballo de fin de grao céntrase en estudar a viabilidade técnica, enerxética e económica dunha instalación de produción de enerxía eléctrica mediante paneis fotovoltaicos no buque de pasaxe “Benchijigua Express”.

Primeiramente, explicaranse os conceptos básicos polos que se produce enerxía eléctrica a partires da radiación solar, destacando o efecto fotoeléctrico. Ademais, afondarase minimamente no funcionamento dun panel fotovoltaico e os distintos tipos dispoñibles no mercado na actualidade.

A continuación, estudarase a radiación solar media na ruta que realice dito buque, co fin de calcular a capacidade de produción dos paneis solares en función do máximo número posible que se poida dispoñer na cuberta de intemperie superior do mesmo. Así, poderase comparar cos consumos realizados polos motores utilizados para xerar a mesma cantidade de enerxía eléctrica (previamente calculados en función do motor, o réxime de traballo e o hidrocarburo utilizado) e coñecer o consecuente aforro de combustible e emisións que suporía dita instalación fotovoltaica a bordo.

Por outra parte, estudarase a magnitude e forma de toda a instalación fotovoltaica (máis alá de unicamente os paneis) co fin de poder coñecer dous aspectos principais: o espazo ocupado polo sistema fotovoltaico e a súa consecuente viabilidade; e un prezo real de todo o conxunto, o cal será enfrontado ao aforro xerado de forma que se poida saber o período de amortización da instalación.

Por último, presentaranse unhas conclusións que permitan albiscar a viabilidade (ou non) dun sistema de produción de enerxía eléctrica baseado no proceso fotovoltaico, fortalecendo así o argumento defensor de aqueles que apostan pola implementación das enerxías renovables no sector marítimo mercante.

ABSTRACT

This end-of-degree work focuses on studying the technical, energy and economic feasibility of a photovoltaic energy production facility on the passenger ship "Benchijigua Express".

First, the basic concepts by which electrical energy is produced from solar radiation will be explained, highlighting the photoelectric effect. In addition, the operation of a photovoltaic panel and the different types currently available on the market will be studied in detail.

The average solar radiation on the route taken by that vessel shall then be studied in order to calculate the production capacity of the solar panels as a function of the maximum possible number available on the upper weathering deck.

Thus, it can be compared with the consumption made by the engines used to generate the same amount of electrical energy (previously calculated depending on the engine, the working speed and the fuel used) and to know the consequent saving of fuel and emissions that such an on-board photovoltaic installation would entail.

On the other hand, the magnitude and shape of the entire photovoltaic installation (beyond just the panels) will be studied in order to be able to know two main aspects: the space occupied by the photovoltaic system and its consequent viability; and a real price of the whole, which will face the savings generated so that you can know the depreciation period of the installation.

Finally, conclusions will be presented showing the feasibility (or otherwise) of an electricity production system based on the photovoltaic process, thus strengthening the defence argument of those who bet on the implementation of renewable energies in the merchant maritime sector.

Índice general

DEFINICIONES	11
ABREVIATURAS	13
1. INTRODUCCIÓN	15
2. OBJETIVO	17
3. ENERGÍA FOTOVOLTAICA	18
3.1. Efecto fotoeléctrico	18
3.2. Instalación fotovoltaica	19
3.2.1. Componentes de una instalación fotovoltaica.....	20
3.2.1.1. Panel fotovoltaico	20
3.2.1.1.1. Célula fotovoltaica.....	20
3.2.1.1.2. Características principales.....	22
3.2.1.1.3. Tipos de panel fotovoltaico.....	24
3.2.1.1.4. Tipos de configuraciones entre los paneles fotovoltaicos	25
3.2.1.2. Baterías.....	27
3.2.1.3. Reguladores de carga	28
3.2.1.4. Inversores	30
4. BUQUE OBJETO DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA	32
4.1. Ficha técnica del “Benchijigua Express”	35
4.2. Sala de máquinas del “Benchijigua Express”	36
4.2.1. Propulsión.....	36
4.2.2. Planta de generación eléctrica.....	39
4.3. Estructura y distribución de espacios del “Benchijigua Express”.....	42
4.4. Distribución de los espacios a bordo.	43
4.4.1. Posibles espacios a bordo para una instalación fotovoltaica.	45
5. CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DEL “BENCHIJIGUA EXPRESS”	47
5.1. Paneles fotovoltaicos.....	49
5.1.1. Panel fotovoltaico “A-335P GS”	50
5.1.2. Panel fotovoltaico “JST460M”	51
5.1.3. Panel fotovoltaico “JKM405M-72H”.....	53
5.1.4. Comparativa y selección final del panel fotovoltaico.	55
5.1.5. Número de paneles que conforman el campo fotovoltaico.....	58
5.1.6. Disposición de los paneles fotovoltaicos	61
5.1.7. Soporte de los paneles fotovoltaicos y anclaje a la cubierta.	63

5.2. Inversor.....	65
5.2.1. Conexionado entre los paneles fotovoltaicos.....	67
5.2.2. Transformador trifásico.....	70
5.3. Cableado de la instalación.....	70
5.3.1. Parte de corriente continua.....	72
5.3.1.1. Tramo paneles – cajas de conexiones.....	72
5.3.1.2. Tramo caja de conexiones – combiner box.....	73
5.3.1.3. Tramo combiner box – inversor.....	74
5.3.2. Parte de corriente alterna.....	75
5.3.2.1. Tramo inversor – transformador.....	76
5.3.2.2. Tramo transformador – cuadro de distribución.....	76
5.3.3. Resumen del cableado seleccionado en cada tramo.....	77
5.4. Elementos de protección de la instalación eléctrica.....	77
5.4.1. Elementos de protección en la parte de corriente continua.....	78
5.4.2. Elementos de protección en la parte de corriente alterna.....	79
5.5. Impacto del peso de la instalación en la estabilidad del “Benchijigua Express”. 80	
6. CÁLCULO DE LA ENERGÍA PRODUCIDA POR LA INSTALACIÓN FOTVOLTAICA.....	83
6.1. Cálculo de producción energética en el puerto de Los Cristianos (Sta. Cruz de Tenerife).....	84
6.2. Cálculo de producción energética en el puerto de San Sebastián de la Gomera. 85	
6.3. Cálculo de producción energética en el puerto de Santa Cruz de la Palma. .	86
6.4. Cálculo total de la energía producida por la instalación fotovoltaica.....	87
6.5. Impacto de la energía fotovoltaica en la generación eléctrica del “Benchijigua Express”.	90
7. BALANCE ECONÓMICO	93
7.1. Coste de la instalación	93
7.2. Amortización de la instalación fotovoltaica	96
8. CONCLUSIONES.....	101
9. BIBLIOGRAFÍA	104
ANEXO I.....	112
ANEXO II.....	113

Índice figuras

Figura 1.1. – Diseño del buque propulsado y abastecido mediante energía solar y eólica de la compañía Eco Marine Power (7).	17
Figura 3.1.1. – Representación gráfica del efecto fotoeléctrico (11)	19
Figura 3.2.1.1.1. – Panel fotovoltaico policristalino (12)	20
Figura 3.2.1.1.1.1. – Estructura de una célula fotovoltaica (13)	21
Figura 3.2.1.1.1.2. – Representación gráfica de la generación eléctrica en una célula fotovoltaica (14)	21
Figura 3.2.1.1.4.1. – Conexionado en serie de paneles fotovoltaicos (21)	25
Figura 3.2.1.1.4.2. – Conexionado en paralelo de paneles fotovoltaicos (21)	26
Figura 3.2.1.1.4.3. – Conexionado en paralelo de paneles fotovoltaicos (21)	26
Figura 3.2.1.4.1. – Esquema de un inversor de corriente (28)	31
Figura 4.1. – Vista general del buque “Benchijigua Express” (29)	34
Figura 4.2.1.1. – Esquema de disposición de una propulsión WaterJet (35)	37
Figura 4.2.1.2. – Especificaciones del MTU 20V8000 M71 (37)	38
Figura 4.2.2.1. Ficha técnica del “MTU 12V2000” (39)	40
Figura 4.2.2.2. Ficha técnica del alternador “STAMFORD HCM 63451” (40)	41
Figura 4.3.1. Vista lateral y frontal del “Benchijigua Express” (22)	43
Figura 4.3.1.1. Plano de cubiertas del “Benchijigua Express” (22)	44
Figura 4.3.2.1. Plano de la superficie libre en la cubierta de observación para una instalación fotovoltaica (22)	47
Figura 5.1. Esquema eléctrico de distribución de la instalación fotovoltaica del “Benchijigua Express” (22)	47
Figura 5.1.5.1. Esquema sobre los corredores de acceso a los paneles fotovoltaicos dispuestos (22) (modificada)	60
Figura 5.1.7.1. Configuración de los paneles fotovoltaicos según el soporte con perfil C40 (50)	64
Figura 5.2.1.1. Matriz del conexionado en serie-paralelo del campo fotovoltaico, (elaboración propia)	69
Figura 5.3.3.1. Esquema del cableado en la instalación fotovoltaica, (elaboración propia)	77
Figura 6.1.1. Ubicación sobre la que se realiza el cálculo en el puerto de Los Cristianos, Sta. Cruz de Tenerife (64)	85
Figura 6.1.2. Datos introducidos en el programa de cálculo PVGIS (izquierda), y resultados obtenidos de este (derecha) (64)	85
Figura 6.1.3. Gráfica con la producción energética mensual (izquierda), y con la irradiación mensual sobre plano fijo (derecha) (64)	85
Figura 6.2.1. Ubicación sobre la que se realiza el cálculo en el puerto de San Sebastián de la Gomera (64)	86

Figura 6.2.2. Datos introducidos en el programa de cálculo PVGIS (izquierda), y resultados obtenidos de este (derecha) (64).	86
Figura 6.2.3. Gráfica con la producción energética mensual (izquierda), y con la irradiación mensual sobre plano fijo (derecha) (64).	86
Figura 6.3.1. Ubicación sobre la que se realiza el cálculo en el puerto de Sta. Cruz de la Palma (64).	87
Figura 6.3.2. Datos introducidos en el programa de cálculo PVGIS (izquierda), y resultados obtenidos de este (derecha) (64).	87
Figura 6.3.3. Gráfica con la producción energética mensual (izquierda), y con la irradiación mensual sobre plano fijo (derecha) (64).	87
Figura 6.4.1. Gráfica de la producción fotovoltaica mensual, (elaboración propia). 89	89
Figura 6.4.2. Gráfica de la irradiación mensual, (elaboración propia).	89
Figura 6.5.1. Aportación anual de cada medio de generación eléctrica a bordo, (elaboración propia).	91
Figura 7.1.1. Gráfica comparativa con los costes totales de cada elemento [€], (elaboración propia).	95
Figura 7.2.1. Representación gráfica de la tasa de amortización respecto al coste de la instalación, (elaboración propia).....	98
Figura 7.2.2. Representación gráfica del reparto económico del ahorro generado por la instalación fotovoltaica, (elaboración propia).....	99

Índice de tablas

Tabla 4.1.1. – Especificaciones del Benchijigua Express, (elaboración propia)....	36
Tabla 4.2.1.1. – Elementos de propulsión y dirección del “Benchijigua Express”, (elaboración propia).	38
Tabla 5.1.1.1. Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico “A-335p GS” (43). 51	
Tabla 5.1.2.1. Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico “JST460M” (46)..	53
Tabla 5.1.3.1. Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico “JKM405M-72H” (47).	55
Tabla 5.1.4.1. Comparativa entre los tres paneles fotovoltaicos (43,46,47).....	57
Tabla 5.1.7.1. Cantidades y precios de los distintos elementos de sujeción, (elaboración propia).	65
Tabla 5.2.1. Especificaciones técnicas del inversor de corriente “Sirio K200” (54). 67	
Tabla 5.3.2.1. Clasificación de cables con conductores de cobre y clase de temperatura 90 °C (52).	76
Tabla 5.5.1. Masas de los elementos de la instalación fotovoltaica situados en la cubierta, (elaboración propia).	81
Tabla 6.4.1. Resultados energéticos obtenidos de la media aritmética de los tres puertos de referencia, (elaboración propia).	88
Tabla 6.5.1. Valores del coeficiente conversor C_f según el combustible (67).	92
Tabla 7.1.1. Desglose de los costes de la instalación fotovoltaica, (elaboración propia).	94

DEFINICIONES

Combustibles fósiles: Combustibles que proceden de la biomasa producida en eras pasadas, que ha sufrido enterramiento y tras él, procesos de transformación, por aumento de presión y temperatura, hasta la formación de sustancias de gran contenido energético.

Eficiencia energética: Optimización del consumo energético, logrando un mayor trabajo con un menor consumo.

Motores de combustión interna: Tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química de un combustible que arde dentro de la cámara de combustión, la que a su vez se encuentra dentro de la máquina térmica.

Panel solar: Dispositivo que aprovecha la energía del sol para generar electricidad.

Módulo fotovoltaico: Dispositivo que transforma la luz solar en energía eléctrica.

Rendimiento: Relación entre la potencia eléctrica entregada por un panel fotovoltaico y la radiación solar que este necesita para generarla.

Campo fotovoltaico: Conjunto de los paneles fotovoltaicos de una instalación.

Matriz fotovoltaica: Conjunto de los paneles fotovoltaicos conectados entre sí para aumentar la tensión e intensidad de la corriente entregada por estos.

Fast ferry: Buque dedicado al transporte de pasaje a altas velocidades de navegación.

Trimarán: Barco multicasco que consta de un casco principal y dos flotadores más pequeños al lado del casco principal con puntales laterales.

Eslora: Longitud de una embarcación desde la proa a la popa.

Calado: Distancia vertical entre el fondo del buque y el plano de flotación, es decir, la altura de la parte sumergida del buque.

Puntal: Altura del buque. En general, desde el fondo hasta la cubierta principal.

Peso muerto máximo: Es el peso que puede transportar el buque en una situación de calado determinada, incluyendo el peso de la carga máxima y los pesos de la tripulación, pertrechos, respetos, combustibles y provisiones. Normalmente se refiere al calado máximo y corresponde, por tanto, al peso máximo a transportar.

Manga: Anchura del buque en el sentido babor-estribor.

Sociedad de clasificación: organizaciones no gubernamentales o grupos de profesionales sin ánimo de lucro, con el objetivo de promover la seguridad de la vida humana en el mar y propiedades (buques y plataformas), así como la protección del entorno natural marino. Esto se consigue gracias al desarrollo de Reglas de Clasificación.

Tensión de circuito abierto: Diferencia de potencial eléctrico entre los terminales de un dispositivo cuando lo desconectamos de su circuito eléctrico

Caída de tensión: Reducción del valor de la tensión inicial de un circuito fruto de diferentes causas, como la reducida sección del cableado, por ejemplo.

Coefficiente de variación de temperatura de la tensión de circuito abierto del módulo fotovoltaico (%/°C): Valor que relaciona el porcentaje de caída de tensión de la corriente entregada por el panel en función del incremento de la temperatura de sus células fotovoltaicas.

Resistividad: Resistencia proporcional de un material conductor según su longitud y anchura.

Número de conductores: Número de elementos transportadores de corriente incorporados en un único cable.

Tensión de línea: La diferencia de tensión que aparece entre dos fases.

String o cadena: Grupo de paneles conectados en serie para aumentar el valor de la tensión de corriente generada por estos.

Estabilidad: Propiedad de un cuerpo de mantenerse en equilibrio estable o de volver a dicho estado tras sufrir una perturbación.

Centro de gravedad: Punto imaginario de aplicación de la resultante de todas las fuerzas de gravedad que actúan sobre las distintas porciones materiales de un cuerpo.

Metacentro: En un cuerpo simétrico flotante, punto en que la vertical que pasa por el centro de flotación corta, cuando aquel se desvía de su posición de reposo, la dirección que toma en tal caso la línea que pasaba antes por los centros de gravedad y de flotación, y que era vertical.

Centro de carena: Centro de carena es el centro de gravedad del volumen de agua desplazado por un flotador, para una condición dada. También se conoce con el nombre de centro de empuje, ya que es con fines de estabilidad donde se considera aplicada dicha fuerza.

Tasa de amortización: Relación porcentual entre el beneficio generado por una inversión y el coste de esta. Muestra la capacidad generadora de beneficios de la inversión y sirve para conocer el ritmo al que se recuperará el coste inicial.

ABREVIATURAS

CO₂: Dióxido de carbono

GEI: Gases de Efecto Invernadero

OMI: Organización Marítima Internacional

EVA: Etil vinil acetato

V: Voltio

AC: Alternating current; corriente alterna.

MPPT: Maximum Power Point Tracking

PWM: Pulse-Width Modulation

°C: Grados Celsius

MMSI: Identidad del servicio móvil marítimo es el número que identifica a cada estación de barco a efectos de seguridad y radiocomunicaciones, y que debe ser programado en los equipos automáticos de radiocomunicaciones de llamada selectiva digital de los buques (VHF, MF y HF) y en las radiobalizas por satélite

GT: Gross tonnage; toneladas brutas

NT: Net tonnage; toneladas netas

CNAE: Clasificación Nacional de Actividades Económicas

EPA 2: hace referencia a una norma sobre las emisiones en Estados Unidos, emitida por la Environment Protection Agency; Agencia de Protección del Medio Ambiente.

NO_x: Óxido de nitrógeno

Bhp: Boiler horse power; caballo de potencia de caldera. Unidad inglesa de potencia.

kW: kiloWatio. Unidad de potencia.

Rpm: Revolución por minuto. Unidad de velocidad de giro.

g/kWh: gramo/kiloWatio·hora. Unidad de consumo acorde a una producción.

Bar: Unidad de presión.

RCS: Ride Control System. Denominación en inglés al sistema electrónico de control y actuación sobre los waterjet.

Wp: Watios Pico. Unidad de potencia.

PERC: Passivated Emmitter Rear Contact. Tecnología que permite aumentar la eficiencia energética de los paneles.

HC: Half – Cell; media célula. Sirve para denominar la tecnología que duplica las células por panel para mejorar su rendimiento.

degradación de potencial inducido (PID)

IEC: International Electrotechnical Commission. Organismo Internacional de regulación.

PVGIS: Photovoltaic Geographical Information System. Aplicación de cálculo de radiación y energía producida proporcionada por la Comisión Europea.

MGO: Medium Gas Oil. Denominación inglesa del Diésel.

PP: Perpendiculares

CV: Caballos de vapor. Unidad de potencia.

m: metros. Unidad de longitud.

t: tonelada. Unidad de masa.

1. INTRODUCCIÓN

El mundo cambia y nosotros lo hacemos cambiar. El cambio climático es un hecho natural, mas el matiz de que se haya venido forzando y acelerando dicho cambio a causa del calentamiento global, motivo presente desde la revolución industrial, genera una situación actual crítica en la que se ha de cambiar el método productivo a escala global de inmediato para poder evitar el colapso natural y que el planeta se torne en un ambiente hostil (desde el punto de vista natural) que limite la vida en ciertas regiones del mundo cada vez mayores.

El Quinto Informe de Evaluación de la Organización de las Naciones Unidas Medio Ambiente (1) establece que la temperatura media global ha aumentado desde 1880 hasta 2012 0,85 °C, marcando el punto de inflexión en 1,5 °C, a partir de los cuales habría un impacto catastrófico y de no retorno en muchos aspectos naturales. Este mismo informe asegura que la causa principal de dicho calentamiento global es la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), entre los que el más abundante es el CO_2 (alrededor de dos tercios), cuya fuente proviene de la quema de combustibles fósiles.

Resulta obvio percatar la urgente necesidad de disminuir dichas emisiones de CO_2 para poder cumplir el objetivo de no sobrepasar el límite de 1,5 °C de calentamiento global.

Es por eso que, dada esta situación, se comienzan a desarrollar nuevos métodos de producción que persiguen este objetivo, entre los cuales destacan las llamadas energías renovables. Estas permiten generar energía eléctrica a partir de fuentes inagotables, con la particularidad de no generar la más mínima emisión de CO_2 al ambiente. Dichas fuentes inagotables las proporciona la propia naturaleza: agua, viento, sol y biomasa animal o vegetal.

En el desarrollo de las energías renovables, concretamente la que tiene como fuente primaria el sol, se recupera el concepto del primer panel fotovoltaico creado en 1883 por Charles Fritts (2), adaptándolo con la tecnología actual.

Un panel fotovoltaico es un dispositivo capaz de generar una corriente eléctrica continua al ser expuesto a una fuente lumínica haciendo uso del efecto fotoeléctrico. Dicha fuente lumínica que cumpla el requisito de ilimitada para poder ser renovable es la radiación solar.

Según se van desarrollando las energías renovables y otros métodos que persiguen reducir las emisiones de CO_2 a la atmósfera, estas se van

implementando en distintos ámbitos para así poder alcanzar su fin, destacando el ámbito de la industria y del transporte.

El sector del transporte marítimo es aquel que mejor une estos dos ámbitos, siendo causante de la emisión de aproximadamente 1.000 millones de toneladas de GEI, lo que supone el 3% de las emisiones a escala mundial (3), situándolo el sexto emisor (por delante de Alemania) si se le considerase un país. Así mismo, el tercer estudio de GEI de la OMI de 2014 (4) afirma que dichas emisiones podrían aumentar entre un 50% y un 250% en 2050. Dada esta situación y sus consecuentes predicciones, se elaboran una serie de medidas englobadas en la Estrategia Inicial de la OMI para reducir las emisiones de GEI (4), las cuales se centran en la mejora de la eficiencia energética y en la reducción de la intensidad de carbono de los buques, algo para lo que se adoptan normas operacionales en los mercantes.

Cabe destacar que dada la magnitud e importancia de las emisiones de GEI de los buques, la misma OMI redactó el Anexo VI del Convenio MARPOL 73/78 en 1997 (5), titulado “Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques”. En él se recogen una serie de reglas y medidas para reducir las emisiones de GEI, así como unos límites permisibles de contaminación a partir de los cuales se ejecutan procesos sancionadores para velar por el fiel cumplimiento de las normas del anexo. Este entró en vigor el 19 de mayo de 2005 tras la firma del número mínimo de países para que pudiese ser reconocido y aplicado. Esto demuestra la importancia y peligro que suponen la gran cantidad de GEI emitidos todos los años por los buques desde hace décadas.

Dada esta situación, más allá de las medidas de la propia OMI, surgen nuevos conceptos con el fin de reducir en lo máximo posible las emisiones de GEI causadas por un sector de vital importancia en el panorama actual de la globalización y que ha crecido un 40% entre el 2008 y 2018 según la OMI (6). Uno de esos conceptos es la implementación de la energía solar en los buques con el fin de sustituir o reducir la dependencia de los motores de combustión interna en las embarcaciones y sus consecuentes emisiones de GEI fruto de la quema de combustibles fósiles.

Hay numerosos proyectos en todo el mundo dedicados a experimentar y demostrar la viabilidad técnica, energética y económica del uso de la energía

fotovoltaica en el ámbito marino, entre los que destaca el buque “Aquarius Eco Ship” de la empresa Eco Marine Power (7), un prototipo de buque de carga general que busca propulsarse y abastecerse a base de la energía solar y eólica en alta mar. La figura 1.1. muestra el diseño desarrollado hasta el momento.

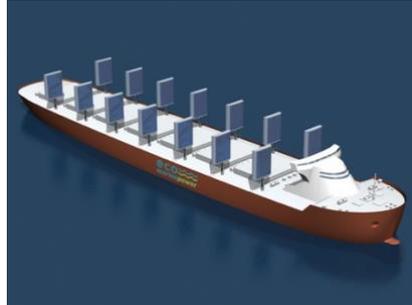


Figura 1.1. – Diseño del buque propulsado y abastecido mediante energía solar y eólica de la compañía Eco Marine Power (7).

Otro proyecto ya llevado a cabo en la realidad es la instalación de paneles solares en la cubierta del buque de pasaje “Blue Star Delos” que opera en el mar Egeo y capaz de transportar hasta 2400 pasajeros y 430 vehículos (8). El resultado del experimento confirma la viabilidad técnica y energética de una producción eléctrica a base de energía solar en este buque, en este caso dedicada a la iluminación y algún equipo auxiliar básico, generando un consecuente ahorro tanto de emisiones como de dinero.

En esa línea de investigación se enfoca este trabajo de fin de grado, que busca conocer la viabilidad técnica, energética y económica de la instalación de paneles solares en la cubierta de un buque de pasaje y carga rodada con ruta fija, generando la energía eléctrica que aportarían los diésel-generadores de la sala de máquinas de forma que se puedan cumplir los objetivos de reducción de emisiones de GEI marcados por la OMI y distintos organismos internacionales dedicados al sector marítimo.

2. OBJETIVO

Este trabajo busca comprobar la viabilidad técnica, energética y económica de la instalación de un sistema productor de energía eléctrica usando paneles fotovoltaicos en el buque de pasaje y carga rodada “Benchijigua Express” que opera en el archipiélago canario. Dicha instalación se diseñará con la intención de suplir a los diésel-generadores del propio buque, sin la necesidad emitir GEI para generar electricidad a bordo.

Para ello se ha de dimensionar la instalación fotovoltaica en conjunto (baterías, regulador de carga, inversor, paneles, soportes, etc.) teniendo en cuenta principalmente la energía eléctrica producida en función de los parámetros de radiación solar en la región del archipiélago canario en la que opera el buque “Benchijigua Express”.

Además, se buscará introducir los conocimientos básicos de la energía fotovoltaica aplicada al sector marino, relatando aspectos a tener en cuenta a la hora de dimensionar y proyectar una instalación fotovoltaica para un buque.

3. ENERGÍA FOTOVOLTAICA

La energía fotovoltaica es aquella energía eléctrica obtenida mediante la conversión de radiación solar en esta haciéndose uso del efecto fotoeléctrico. Dicho efecto tiene lugar en los paneles fotovoltaicos, los cuales están diseñados para tal fin, maximizando la captación de radiación solar y por tanto la producción de energía fotovoltaica.

3.1. Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno que tiene lugar cuando las partículas que componen un haz de luz, denominadas fotones (partículas que transportan la radiación electromagnética), impactan sobre la superficie de un material provocando el movimiento de los electrones que lo componen, generándose una corriente eléctrica continua como resultado (9).

Este hecho lo descubrió en 1839 Edmond Becquerel, llegando a construir la que sería la primera célula solar con dos electrodos de platino cubiertos de cloruro de plata. Este prototipo fue expuesto a la radiación de la luz solar obteniendo como resultado un voltaje de corriente continua mínimo. Sin embargo, pese a percatarse de este fenómeno, Edmond no conocía aún el porqué de esta cuestión, pues ignoraba la naturaleza de una onda electromagnética de radiación solar (9).

En 1905, Albert Einstein descubrió que las ondas o haces de luz estaban compuestas por pequeñas partículas denominadas fotones. Estas partículas son una agrupación de energía, dependiendo su tamaño de la frecuencia de onda de la radiación. Este hallazgo que resolvía el desconocimiento de Becquerel le hizo ser galardonado con el Premio Nobel de Física en 1921 (10).

Al impactar un fotón sobre una superficie, para poder provocar el movimiento de un electrón y la consecuente corriente eléctrica, dicho fotón ha de tener una energía mayor al trabajo necesario para liberar al electrón impactado. Es decir, un fotón ha de ser capaz de impactar a un electrón y transferirle su energía, la cual ha de ser mayor que el trabajo de atracción al que está sometido el electrón en reposo por parte del material que compone. La atracción a la que está sujeta el electrón se conoce como función de trabajo.

La cantidad de fotones que contiene un haz de luz es directamente proporcional a la intensidad de luz. A su vez, el número de electrones liberados (que dan lugar a la corriente fotoeléctrica) es proporcional al número de fotones que inciden en la superficie del material. Por lo tanto, la intensidad de luz es directamente proporcional al número de electrones liberados y por tanto a la intensidad de la corriente fotoeléctrica generada (10).

La siguiente figura resume el efecto fotoeléctrico de forma gráfica.

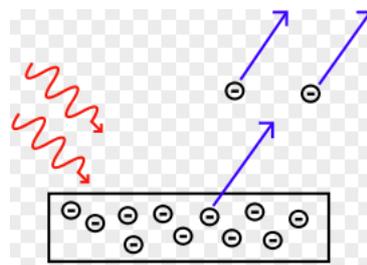


Figura 3.1.1. – Representación gráfica del efecto fotoeléctrico (11).

3.2. Instalación fotovoltaica

Para poder hacer uso del efecto fotoeléctrico de forma que se pueda generar electricidad para un posterior uso, ya sea doméstico o industrial, se precisa de una instalación fotovoltaica. Este tipo de instalaciones tienen como finalidad generar la mayor cantidad posible de corriente eléctrica usando como fuente primaria la radiación solar y como elemento productor células fotovoltaicas, las cuales se basan en el efecto fotoeléctrico para generar la corriente.

Esta se compone de una serie de elementos básicos y necesarios para la correcta generación de corriente eléctrica.

3.2.1. Componentes de una instalación fotovoltaica

3.2.1.1. Panel fotovoltaico

Un panel fotovoltaico es un dispositivo que contiene un gran número de células fotovoltaicas dispuestas de tal forma que se genera una corriente eléctrica continua al ser expuesto a radiación solar. Es el elemento principal e indispensable en cualquier instalación fotovoltaica, puesto que es el componente productor de esta. En la siguiente figura se muestra el aspecto de un panel fotovoltaico policristalino.



Figura 3.2.1.1.1. – Panel fotovoltaico policristalino (12).

El funcionamiento de un panel fotovoltaico está basado en el efecto fotoeléctrico y en el uso que hacen de este fenómeno las células fotovoltaicas.

3.2.1.1.1. Célula fotovoltaica

Una célula fotovoltaica es la unidad constitutiva y básica de un panel fotovoltaico, como se ha aclarado previamente. A su vez, es el elemento que produce una corriente eléctrica al recibir radiación solar.

Para poder realizar tal fin, una célula fotovoltaica está compuesta de dos finas láminas de un material semiconductor, que por lo regular es silicio cristalino. Cada una de las láminas está alterada, de forma que una tiene una carga positiva y la otra tiene una carga negativa, asemejándose a la estructura de un diodo. La lámina cargada negativamente se obtiene al dopar la oblea de silicio cristalino con fósforo con 5 electrones de valencia, mientras que la cargada positivamente se genera al incorporar boro con 3 electrones de valencia en el silicio cristalino. La siguiente figura muestra la estructura de una célula fotovoltaica.

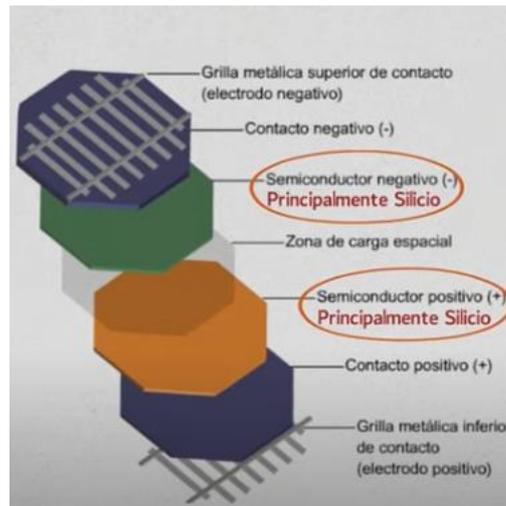


Figura 3.2.1.1.1.1. – Estructura de una célula fotovoltaica (13).

La oblea negativa es la expuesta a la radiación solar, mientras que la positiva está por debajo de la negativa y tiene un grosor mayor que esta. Al recibir radiación solar, los electrones de la oblea negativa adquieren energía cinética y tienden a moverse hacia la oblea positiva, generándose una denominada zona de agotamiento en el área de contacto entre ambas láminas y sus proximidades. En la zona de agotamiento se genera un campo eléctrico que a su vez devuelve los electrones a la lámina negativa, lo que provoca que estos se acumulen en grandes cantidades en la oblea negativa y se genere una diferencia de potencial entre la lámina negativa y la positiva. Así, al conectar la lámina negativa con la positiva se genera una corriente eléctrica continua. La siguiente figura muestra cómo las dos obleas superpuestas generan una zona de agotamiento al recibir radiación solar y su consecuente corriente eléctrica al conectarle una carga.

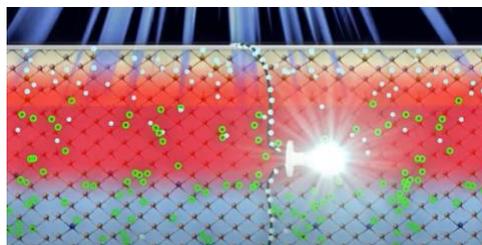


Figura 3.2.1.1.1.2. – Representación gráfica de la generación eléctrica en una célula fotovoltaica (14).

La corriente generada por una única célula fotovoltaica es mínima, pero si se conectan en serie un conjunto de células fotovoltaicas y estas a su vez en paralelo con otros conjuntos de células fotovoltaicas, se consigue una corriente

eléctrica considerable y útil. Estas conexiones entre células tienen lugar en el panel fotovoltaico (14).

3.2.1.1.2. Características principales

Existen distintos tipos de paneles fotovoltaicos, los cuales se detallarán más adelante, cada uno con sus factores particulares que los distinguen del resto. En cambio, hay una serie de características comunes entre todos y que se han de tener en cuenta a la serie de montar una instalación fotovoltaica. Estas son:

- **Partes de un panel:** Un panel está compuesto por distintas capas. Estas son en sentido descendente:

Marco de aluminio: Este constituye la carcasa o cierre perimetral del panel además de ser punto de anclaje para los soportes de este.

Superficie exterior: Hecha de cristal templado con alta transmitancia óptica. Sirve de protección contra los agentes exteriores.

Encapsulado superior: Hecha de una fina capa de EVA (etilvinilacetato, un polímero termoplástico formado por la unión repetitiva de etileno y acetato de vinilo) que busca aislar térmicamente las células fotovoltaicas.

Células fotovoltaicas: Capa en el que se encuentran todas las células fotovoltaicas con sus conexiones entre ellas incorporadas. Es el elemento principal y productor.

Encapsulado inferior: Hecha de una fina capa de EVA que busca aislar térmicamente las células fotovoltaicas.

Cubierta posterior: Panel hecho de Tedlar (fluoruro de polivinilo "PVF", un polímero termoplástico de estructura similar al PVC) que cierra posteriormente el panel y aporta protección al mismo contra golpes e inclemencias atmosféricas.

Caja de conexiones: Elemento en el que se recoge la salida de toda la electricidad generada en el panel y a través del cual se realizan las conexiones con otros paneles o con el consumidor eléctrico. Está equipada con conectores rápidos, cable de doble aislamiento y 3 diodos de by-pass como elementos de protección (13).

- **Influencia de la temperatura** en el rendimiento del panel fotovoltaico: Los paneles solares tienen una variación de rendimiento inversamente proporcional a la variación de temperatura de las células solares. Es decir,

según aumenta la temperatura de la celda solar, disminuye el rendimiento del panel fotovoltaico. Por eso, se realiza un encapsulado de EVA de las células fotovoltaicas con la finalidad de aislarlas térmicamente.

Los fabricantes de paneles incluyen en la ficha técnica un coeficiente de temperatura que muestra como varía el rendimiento del panel en función de la temperatura interior del encapsulado. Esta temperatura depende en gran medida de la temperatura ambiente del entorno en el que esté ubicado el panel (15).

- **SopORTE:** Los sistemas de anclaje de los paneles fotovoltaicos son algo común y de vital importancia en todas las instalaciones fotovoltaicas, pues han de mantener el panel en la posición diseñada para así captar la radiación solar necesaria para cumplir con los cálculos de diseño. Existen cuatro principales tipos de estructuras:

Estructuras fijas a suelo: Se basan en perfiles metálicos sobre los que se apoyan los paneles. Pueden ser planas al nivel de la superficie o con inclinación, en cuyo caso ha de estudiarse primero el ángulo en el que la radiación incide perpendicularmente y el viento y demás fuerzas meteorológicas que se aplicarán sobre la superficie del panel y que ha de mitigar la estructura (16).

Estructura lastrada: Se basa en perfiles metálicos al igual que la fija a suelo, pero usa una fijación a la superficie en la que se instala no invasiva haciendo uso de unos lastres. Esto permite una mayor rapidez en la instalación y eliminar los problemas de filtraciones en cubiertas recurrentes en las fijas a suelo. En cambio, precisa de un menor ángulo de inclinación (de haberlo) al resistir menos la fuerza del viento con los lastres. Estos se pueden sobredimensionar pero aumentaría el peso de la instalación, algo que no todas las cubiertas o superficies pueden soportar (16).

Estructura móvil: Hecha a base de perfiles metálicos, su base es móvil, por lo que el panel fotovoltaico es capaz de orientarse hacia la radiación solar igual que un girasol, maximizando así la producción energética. Es el sistema más caro, dada su tecnología capaz de calcular la posición óptima según el momento del año y su posición geográfica, pero también el más eficaz.

Puede ser móvil rotando sobre el eje X, el Y o ambos a la vez. También se les conoce como estructuras seguidoras (16).

Estructuras flotantes: Este sistema permite aprovechar la superficie acuática en lugar de la terrestre. Los paneles se apoyan en perfiles metálicos y estos a su vez en una serie de flotadores anclados al fondo marino. Es un método novedoso y con beneficios en el ecosistema marino de la superficie que cubre (17). Destacan por captar mejor la radiación solar difusa que se refleja en el agua, aunque requieren de un especial y mayor cuidado de las estructuras metálicas debido a la corrosión.

3.2.1.1.3. Tipos de panel fotovoltaico

Todos los paneles actuales, exceptuando algunos en desarrollo, se basan en celdas fotovoltaicas de silicio cristalino para su funcionamiento. Sin embargo, existen varios tipos de paneles en función del grado de procesamiento del silicio y de la forma del panel.

- Paneles monocristalinos: Se caracterizan por su color negro oscuro, un mayor rendimiento (entorno al 17%) y por tener los cantos de las celdas solares con un chaflán. Deben su nombre al proceso de formación de los cristales de silicio, en el cual se realiza un enfriamiento controlado del silicio, de forma que este cristaliza en una única dirección y consiguiendo un alineamiento de todos los componentes del cristal bastante cercano a la perfección (rozando el 99,99%) (18).
- Paneles policristalinos: Estos paneles contienen celdas solares de silicio cristalizado de forma abrupta y descontrolada, por lo que los cristales crecen en todas direcciones, dando lugar a una serie de cristales distintos pero unidos entre sí. Se diferencian de los monocristalinos por su color azul oscuro, por tener los bordes en ángulos de 90° y por tener un rendimiento siempre menor pese a tener las mismas condiciones ambientales (18).
- Paneles amorfos: Son los paneles más baratos y los de más bajo rendimiento. Se compone de una única lámina de silicio amorfo (sin cristalizar), considerablemente más fina que las de una celda solar de un panel mono o policristalino. Presentan un rendimiento mayor que los demás captando radiación difusa (días nublados, por ejemplo) (18).

- Paneles flexibles: Dada la finura de su capa de silicio y la ausencia de cristal y panel de tedlar posterior, este panel permite cierta flexibilidad, lo que lo hace útil a la hora de instalarlo en superficies curvas, como en las cubiertas de una embarcación de recreo, por ejemplo. Son más caros que el resto y ofrecen una producción menor, por lo que son utilizados en aplicaciones a pequeña escala. En cambio, disponen de una fácil instalación (19).

3.2.1.1.4. Tipos de configuraciones entre los paneles fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos, como se ha explicado anteriormente, generan una corriente eléctrica de tipo continuo con unas tensiones bajas comparadas con la corriente AC (12V o 24V según sean de 36 células fotovoltaicas o 72 (20)), por lo que a través de los conexiones en paralelo, en serie, o combinación de ambos, de los paneles, se busca aumentar las tensiones e intensidades de trabajo (según las propiedades de la corriente continua) con la finalidad de poder amoldar los parámetros de corriente lo máximo posible a las utilidades correspondientes o a las características de trabajo de reguladores de carga e inversores.

- **Conexión de los paneles fotovoltaicos en serie:** Este conexionado consiste en conectar el positivo de un panel con el negativo del siguiente, así sucesivamente con todos los paneles. Esto permite sumar la tensión de todos los paneles con una intensidad constante, tal y como se muestra en la siguiente figura.

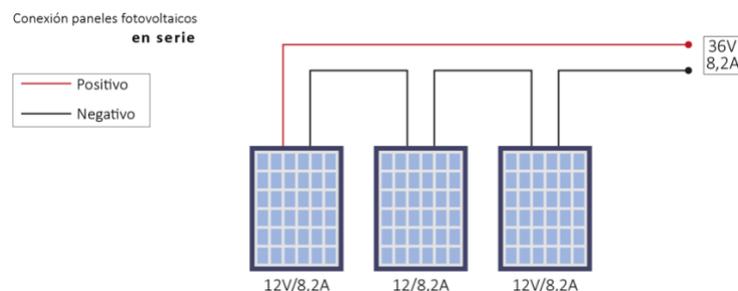


Figura 3.2.1.1.4.1. – Conexionado en serie de paneles fotovoltaicos (21).

Este tipo de conexiones se usa principalmente en instalaciones que cuentan con regulador de carga MMPT, porque se disponen de tensiones elevadas (100V o 150V de tensión máxima en circuito abierto), algo que no permitiría conectar a baterías. El número de paneles a conectar depende de la

capacidad del regulador de carga en un sistema con baterías, el cual (el MMPT) obtiene un 20% más de producción a los paneles (22), o de las características del input del inversor en una instalación sin baterías.

- **Conexión de los paneles fotovoltaicos en paralelo:** En este conexionado, se conectan todos los positivos en la misma línea y todos los negativos en otra línea. Esto permite sumar la intensidad de cada uno de los paneles manteniendo la tensión constante al valor del panel (22). La siguiente figura muestra el esquema de este tipo de conexión.

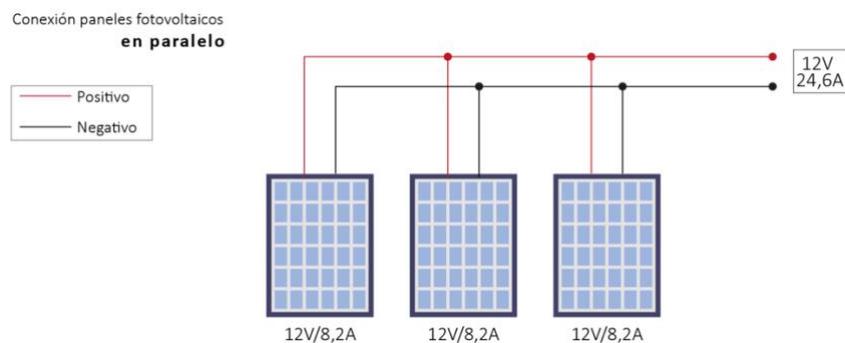


Figura 3.2.1.1.4.2. – Conexionado en paralelo de paneles fotovoltaicos (21).

- **Conexión de los paneles fotovoltaicos en serie-paralelo:** Este tipo de conexión persigue combinar las ventajas de los dos anteriores. Por un lado, consigue aumentar la tensión mientras que por otro la intensidad (22). Este sistema necesita que el número total mínimo de paneles sea 4, pues se han de conectar mínimo de dos en dos los paneles en serie y estos grupos a su vez en paralelo (23). La siguiente figura muestra el esquema de este tipo de conexionado.

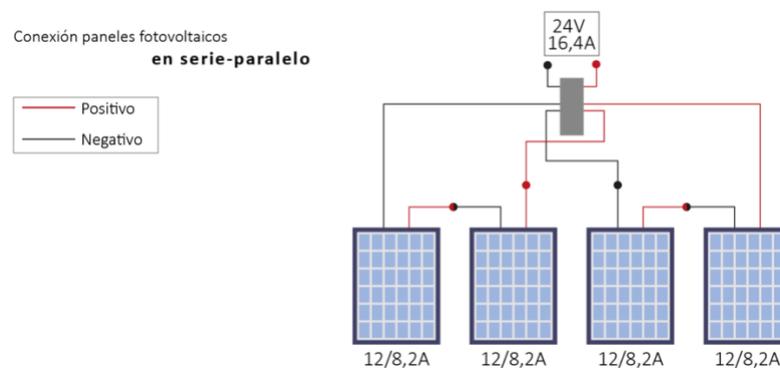


Figura 3.2.1.1.4.3. – Conexionado en paralelo de paneles fotovoltaicos (21).

Este tipo de conexiones es el más utilizado en instalaciones de media-alta potencia dotados de regulador de carga MMPT.

A su vez, la conexión en serie-paralelo permite conectar paneles de 12V o 24V indistintamente, siempre y cuando los que conformen un subgrupo conectado en serie sean el mismo tipo y modelo de panel (23).

3.2.1.2. Baterías

Las baterías son un elemento de almacenamiento de la energía eléctrica generada por los paneles fotovoltaicos. Son de vital importancia en instalaciones fotovoltaicas aisladas de la red o en las que existe riesgo de quedarse sin suministro eléctrico durante ciertos períodos de tiempo.

También conocidas como acumuladores solares, su funcionamiento se basa en una reacción química del tipo reducción – oxidación en la que un elemento le cede electrones al otro a través de un electrolito, generando así una corriente eléctrica de tipo continuo (24).

Su funcionamiento es el siguiente: estos dos elementos son dos electrodos, los cuales están cargados positiva y negativamente fruto de la corriente recibida como fuente de carga. Así, cuando se les conecta un circuito de descarga, comienza el flujo de electrones entre los electrodos a través del electrolito, generándose así una corriente eléctrica útil. Este flujo se debe a las propiedades químicas tanto de los electrodos como del electrolito, los cuales se seleccionan para poder generar esta reacción química de reducción – oxidación (25).

En cuanto a la operatividad de las baterías, existen dos parámetros principales a tener en cuenta a la hora de valorar su viabilidad y su operatividad: la velocidad de descarga y la profundidad de descarga.

Mencionar primero, que las baterías son cíclicas, es decir, el proceso de carga y descarga supone un ciclo en la vida de la batería. Cada ciclo supone un cierto degradado de la capacidad, y por lo tanto eficiencia, de la batería. Entonces, cuantas más veces se cargue y se descargue la batería, menos energía eléctrica proporcionará respecto a la misma energía suministrada como carga.

El proceso de carga de la batería está dividido en varias etapas entre las cuales hay pequeñas variaciones de intensidad y voltaje, lo cual maximiza la vida útil de las mismas.

La velocidad de descarga es un indicativo de la calidad de las baterías. Cuanto más rápido se descargue, menor será la duración de la vida útil de la batería.

A su vez, la profundidad de descarga nos indica la cantidad de energía eléctrica que podemos transmitir a la batería para que esta la almacene. Por contradictorio que parezca, cuanto mayor sea este parámetro, menor sería la vida útil de la batería. Es por eso por lo que no recomiendan descargar las baterías más del 50% de su capacidad total, porque supondría una gran cantidad de energía eléctrica volver a cargar a la batería al 100%, lo que dañaría considerablemente la vida útil de la misma (24).

Existen varios tipos de baterías dedicadas al uso en las instalaciones fotovoltaicas.

Por un lado, se encuentran las VRLA (también conocidas como ácido-plomo), que a su vez engloban a las baterías de tipo AGM (separador de vidrio absorbente) y a las baterías de gel. Las AGM incorporan una malla de fibra de vidrio entre las placas de la batería, lo que le proporciona la contención del electrolito. Están diseñadas para trabajar con alta corriente y a baja temperatura a la vez que mantienen una eficiencia del 95%. En cambio, las baterías de gel contienen el ácido en estado de gel (con una alta viscosidad), lo que las hace viables para trabajar en distintas posiciones distintas a la horizontal. Además, resisten a las bajas temperaturas de trabajo y proporcionan una vida útil mayor que las baterías líquidas.

Por otro lado, se encuentran las baterías líquidas, las cuales funcionan con 500°C para garantizar que su electrolito permanece en estado líquido (26).

3.2.1.3. Reguladores de carga

Un regulador de carga es un dispositivo electrónico encargado de gestionar el estado de carga de las baterías, en este caso, de una instalación fotovoltaica.

Este elemento es de vital importancia si la instalación está dotada con baterías, puesto que, como se ha explicado anteriormente, los acumuladores de energía tienen unos valores de descarga y carga necesarios para un buen funcionamiento y durabilidad. Por esto, los reguladores de carga son de vital importancia a la hora de maximizar la vida útil de las baterías y por tanto de la instalación en conjunto.

Los reguladores de carga van intercalados entre los paneles fotovoltaicos y las baterías. De esta forma, el regulador de carga, mediante la variación del voltaje y la intensidad de la corriente proveniente del campo fotovoltaico, regula el caudal de electricidad que llega a las baterías. Así, los acumuladores reciben siempre la corriente eléctrica para cargarse en las condiciones óptimas de intensidad y voltaje para cada etapa del proceso de carga de la batería. Además, el regulador de carga cumple la función de elemento protector de las baterías al controlar y mitigar posibles sobrecargas y picos de voltajes procedentes de los paneles solares (27).

Existen dos tipos principales de reguladores de carga: los PWM y los MMPT. Los reguladores PWM (Pulse-Width Modulation) funcionan mediante pulsos y cortes de la corriente generada en los paneles. Necesitan que el voltaje nominal de la batería coincida con el de los paneles solares, de forma que el regulador permite el paso de corriente a la tensión a la que se encuentre la batería y corta el paso de dicha corriente cuando el acumulador está al máximo de carga. Cuando el regulador corta el circuito entre los paneles y las baterías, el regulador entra en una fase de absorción de corriente para evitar la sobrecarga del acumulador, lo que repercute negativamente en el regulador en forma de disminución de eficiencia energética. Al necesitar del mismo voltaje nominal en baterías y paneles, este tipo de regulador de carga solo puede funcionar con módulos solares conectados en serie.

Por otra parte, los reguladores MPPT (Maximum Power Point Tracking) permiten obtener siempre el nivel de producción máxima de los módulos solares. Esto es posible gracias a un sistema que además de cortar la corriente de carga una vez que la batería ha alcanzado 100% de capacidad, es capaz de convertir la tensión máxima generada por los paneles en la tensión adecuada para cada etapa de carga de la batería con una alta eficiencia, lo que provoca que se pueda incrementar el valor de la intensidad de corriente de carga a la vez que permanece constante la potencia total producida en los paneles. Así, este tipo de regulador apenas desperdicia potencia generada en los paneles. Este tipo de reguladores aumenta su rendimiento cuando se combinan paneles en serie de forma que aumenta la tensión del campo fotovoltaico. Son idóneos para instalaciones con un gran número de paneles instalados ya que permite conectarlos de forma que se maximice la tensión producida.

Además, están equipados con un transformador de corriente continua de alta tensión a baja tensión, la cual es idónea para la carga de las baterías; y con un controlador electrónico del punto de máxima potencia (de ahí su denominación en inglés), lo que le permite adecuarse a la tensión entregada por los paneles en cada momento, de forma que puede obtener la máxima potencia para realizar la carga o la mínima necesaria para mantener el acumulador al 100% de carga (27).

3.2.1.4. Inversores

Los inversores son el elemento electrónico que transforma la corriente de tipo continua generada por los paneles fotovoltaicos en corriente de tipo alterna, la cual es la utilizada en la red general de consumo en todo el mundo. Esto permite que la corriente generada pueda ser consumida por los elementos que usen corriente alterna, los cuales son la inmensa mayoría de los dispositivos eléctricos dispuestos a bordo. Por eso, los inversores, también conocidos como onduladores de corriente, convertidores de corriente o rectificadores, son un elemento clave e indispensable en cualquier disposición fotovoltaica, pues de lo contrario se estaría limitando el aprovechamiento de la electricidad generada únicamente a los dispositivos alimentados con corriente continua.

Su funcionamiento se basa en la estructura de un transformador, es decir, en dos bobinas (la primaria y la secundaria), de forma que a base de inducir una corriente alterna en la primera se induce una corriente alterna en la secundaria de voltaje variable en función del número de espiras de la bobina. La diferencia entre la corriente continua y la alterna es que esta última cambia de polaridad según la frecuencia de onda, mientras que la continua mantiene constantes los polos negativos y positivos. Para poder inducir corriente alterna en la bobina primaria a partir de corriente continua, se usa un mecanismo de transistores o tiristores según el cual se invierte el sentido de la corriente continua un número de veces acorde a la frecuencia deseada, de forma que a la bobina le entra corriente continua con polaridad cambiante, lo que a efectos es corriente alterna. Una vez la bobina primaria recibe corriente alterna, esta le induce otra corriente alterna a la secundaria con los parámetros deseados, según se ha explicado anteriormente (28). La siguiente figura muestra el esquema básico de un inversor de corriente.

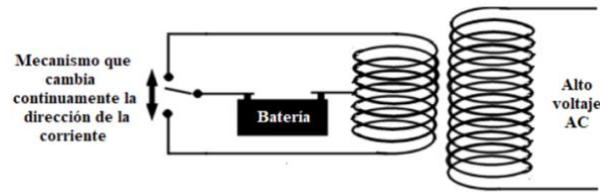


Figura 3.2.1.4.1. – Esquema de un inversor de corriente (28).

Según el tipo de mecanismo utilizado para conmutar la corriente continua para invertir su polaridad y hacerla alterna, la onda generada puede ser cuadrada, rectangular o sinusoidal pura, siendo esta última la más eficaz y útil por su número de aplicaciones. Todos los inversores usados en aplicaciones fotovoltaicas son de onda pura sinusoidal, ya que su mayor versatilidad le permite ser consumida por cualquier dispositivo. De la otra forma se estaría limitando el consumo a cargas resistivas o capacitivas únicamente, por ejemplo (28).

Existen tres tipos de inversores que son los más usados en instalaciones fotovoltaicas, en función de las características y necesidades de cada una de ellas. Estos cumplen la misma función, pero se distinguen en la forma de operar. Por una parte, los **inversores en cadena** o string modifican la corriente eléctrica generada por un conjunto de paneles fotovoltaicos conectados en serie (o en cadena, de ahí su nombre), de forma que les llega una intensidad constante, pero se suman las tensiones. Existen algunos modelos que permiten conectar como entrada de corriente varios circuitos en paralelo formados a base de paneles en serie. Presentan las ventajas de simplificar la instalación al haber un único inversor y de poder instalar unas baterías fácilmente al haber acceso directo a corriente continua, mientras que como inconveniente, muestran una reducción de la eficiencia si los módulos solares se encuentran en zonas con posibles sombreados parciales u orientaciones distintas, ya que el inversor se ajusta a la tensión del panel que menos genera en ese momento (el sombreado) (22).

Por otra parte, los **microinversores** son lo opuesto a los string, ya que se basan en instalar un inversor en cada una de las cajas de conexión de los paneles. De esta forma, se produce corriente alterna a la salida de cada uno de ellos y se conectan en paralelo para su posterior consumo. Presentan lo positivo de tener

la producción de la instalación protegida ante eventuales fallos individuales en la producción de cada panel, como los sombreados parciales (por ejemplo, ocasionados por los pájaros apoyados en cubierta), ofreciendo una mayor versatilidad de la instalación, pudiéndose incluso poner paneles de distintos modelos y fabricantes. También permiten monitorear la producción de cada uno de los paneles, pudiendo percatar rápidamente posibles fallos y corregirlos a la mayor brevedad posible, mejorando la eficiencia de la instalación. En cambio, disminuye la fiabilidad del sistema al haber un gran número de dispositivos sujetos a eventuales fallos y dificulta, tanto el mantenimiento de la instalación, como la incorporación de un sistema de baterías, ya que eso exigiría una doble transformación de la energía producida, al tener que ser convertida a corriente continua de nuevo para la carga de las baterías y otra vez a corriente alterna para su posterior distribución y consumo (22).

Por último, **los inversores con optimizadores de carga** suponen una combinación de los dos tipos anteriores. El sistema cuenta con un único inversor para toda la instalación, pero a su vez cada panel cuenta con un optimizador de potencia en su caja de conexiones, para posteriormente conectar esta corriente en serie. Así, se obtiene que cada panel trabaje de forma individual a la máxima de sus capacidades sin afectar en la producción de los demás, mientras que simplifica por una parte la instalación al haber un único inversor, lo que a su vez permite la instalación de un sistema de acumulación de energía sin necesidad de convertidores adicionales. Además, dada la independencia de cada módulo fotovoltaico, se puede monitorear la producción individual de cada panel, pudiendo subsanar posibles fallos de forma rápida y eficaz, lo que repercute en una mayor producción del conjunto de la instalación. El hecho de incorporar los optimizadores de potencia en cada panel da la posibilidad de crear instalaciones más grandes, ya que provoca una mayor estabilidad de operación. En cambio, al tener un dispositivo adicional en cada caja de conexiones de los paneles, la instalación sufre un mayor riesgo de avería, lo que provoca un mayor mantenimiento dada la complejidad en este aspecto de la instalación (22).

4. BUQUE OBJETO DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

Con la finalidad de poder concretar y mostrar unas conclusiones más fiables y visibles a la hora de debatir sobre las ventajas e inconvenientes de las energías

renovables en los buques, en particular de la fotovoltaica, se ha seleccionado un buque específico sobre el que poder calcular qué le supone la implantación de un método de producción eléctrica fotovoltaico, tanto en el ámbito energético como en el económico y técnico. El hecho de escoger un buque sobre el que centrar el estudio permite poder trabajar con datos concretos de radiación solar en función de la zona geográfica en la que realice sus servicios, conocer su planta propulsora y generadora actual para poder compararlas con la planta fotovoltaica y superficie disponible para paneles solares (lo que está directamente relacionado con la producción fotovoltaica), entre otros.

Como consecuencia de lo anterior, se ha realizado una búsqueda de un buque teniendo en cuenta tres factores principales: la disponibilidad de datos técnicos, la disposición de las cubiertas del buque y que operase en un ámbito geográfico fijo.

La primera fase de la búsqueda se centró en la facilidad de acceso a datos técnicos sobre el buque como son los planos de este, el equipamiento propulsor y el sistema generador y distribuidor de energía eléctrica a bordo. Todo esto permite conocer la posible disposición de una instalación fotovoltaica en cubierta, las potencias necesarias para la correcta operación del barco, su distribución eléctrica para poder conectar una instalación fotovoltaica y los consumos de los motores auxiliares.

El segundo cribado se estableció en base a la disposición de las cubiertas del buque, algo para lo cual es preciso disponer de planos del barco, requisito previsto en la primera fase de la búsqueda. Este apartado es clave, ya que la disponibilidad de espacio en las cubiertas del buque para poder ser ocupado por una posible instalación fotovoltaica afecta de manera directa en la eventual potencia generada por esta. Esto se debe a que, como se ha explicado anteriormente, el número de paneles fotovoltaicos está directamente relacionado con la potencia de la instalación, por lo que un buque que disponga de una gran superficie libre de elementos que impidan la instalación de paneles (o que produzcan sombras en estos) en sus cubiertas es más propenso a hacer rentable dicha instalación.

El tercer y último factor de filtrado fue que el buque objeto de estudio operase en una zona o ámbito geográfico fijo o estable, ya que la radiación solar incidente en la superficie terrestre y marítima varía en gran medida en función de la latitud.

La radiación solar, como se ha explicado anteriormente, afecta de forma directamente proporcional en la cantidad de energía eléctrica generada por un panel, por lo que para poder realizar los cálculos y conocer de forma fidedigna la potencia generada es necesario conocer los datos de la incidencia de radiación solar por donde navegue el buque. Si el buque navegase por todo el mundo según fletes o valores económicos del mercado de la carga (como el caso de los buques que operan bajo el mercado Tramp), estaría cada mes o semana en un punto distinto del globo y sería imposible predecir su próxima singladura. Esto dificulta mucho poder hacer un cálculo de producción energética haciendo uso de los registros de radiación solar. En cambio, en el caso de buques sujetos al mercado regular, como es el caso de los buques de pasaje, es posible calcular las producciones energéticas de una instalación fotovoltaica, ya que como el buque opera siempre en un ámbito geográfico fijo es posible conocer los datos de radiación solar de este y realizar por tanto los pertinentes cálculos. Cuanto menor sea la zona en la que preste sus servicios el buque mejor, por lo que se priorizaron los buques de pasaje de dimensiones reducidas que operasen en líneas fijas y cortas.

Tras la búsqueda realizada teniendo en cuenta todos los aspectos anteriormente relatados, se concluyó que el buque objeto de estudio y aplicación de las energías renovables, concretamente de la instalación fotovoltaica, es el “Benchijigua Express” de la compañía “Fred. Olsen, S.A”. La siguiente figura muestra una fotografía del buque en cuestión.



Figura 4.1. – Vista general del buque “Benchijigua Express” (29).

Este barco de tipo fast ferry opera como medio de transporte de pasajeros y carga rodada entre las islas canarias de Tenerife, La Gomera y Santa Cruz de la Palma, concretamente conectando el puerto de Los Cristianos (Tenerife) con

el de San Sebastián (La Gomera) en apenas 50 minutos y con el de La Palma (Santa Cruz de la Palma) en 2 horas y 50 minutos (30). Esta labor en tiempos de navegación mínimos la realiza siendo poseedor del título de trimarán más grande del mundo junto con su hermano gemelo el “USS Independence”, dedicado a usos militares. Ambas embarcaciones fueron construidas por parte de los astilleros australianos “Austal Ships” a base de una aleación de aluminio (material el cual destaca por sus propiedades de gran ligereza y alta resistencia) en el año 2005, exactamente el contrato número 206 de dichos astilleros, el cual culminaría el 25 de septiembre de 2005 con la botadura del trimarán de mayor dimensión del mundo de la marina civil (31).

La naviera dueña del ferry es “Fred Olsen, S.A”, empresa registrada tal y como se conoce en la actualidad el 08 de septiembre de 1975 bajo la categoría 5010, que concierne a las actividades empresariales dedicadas al transporte marítimo de pasajeros, de la clasificación CNAE. La sociedad anónima proviene de la compañía “Ferry Gomera, S.A”, creada por Fred Olsen para cubrir una ruta de pasaje entre el puerto tinerfeño de Los Cristianos y el de San Sebastián en La Gomera, que tuvo su singladura inicial el 8 de julio de 1974 (32).

En el presente dispone de 11 rutas, 10 de ellas entre territorios isleños y una con la península ibérica, cubiertas por 8 barcos, 2 catamaranes y 3 trimaranes, siendo todas embarcaciones clasificadas como fast ferry. Dentro de la flota destaca el “Benchijigua Express” como buque insignia de la naviera, que recibe su nombre del ayuntamiento Benchijigua situado en la isla de La Gomera, isla que conecta con Tenerife en una de sus rutas (33).

4.1. Ficha técnica del “Benchijigua Express”

La siguiente tabla recoge las especificaciones técnicas del buque sometido a estudio, el “Benchijigua Express” (30).

Tipo de buque	Fast Ferry Trimarán
Eslora total	126,65 m
Eslora entre PP	116,85 m
Manga máxima	30,40 m
Calado	3,98 m
Puntal	8,20 m
Peso muerto máximo	1.140 t
Arqueo bruto	8.973 GT

Arqueo neto	2.427 NT
Número IMO	9299056
Señal de llamada	ECHP
MMSI	224441000
Puerto base	Santa Cruz de Tenerife
Bandera	España
Año de construcción	2005
Sociedad de clasificación	DNV GL
Potencia total instalada	36.400 kW / 49.140 CV
Propulsión	WaterJet
Velocidad	38 nudos
Capacidad de pasajeros	1291
Capacidad de carga	450 m + 120 coches / 340 coches
Tripulación	22

Tabla 4.1.1. – Especificaciones del Benchijigua Express, (*elaboración propia*).

4.2. Sala de máquinas del “Benchijigua Express”

A continuación, se detallará el equipamiento presente en la sala de máquinas del “Benchijigua Express” relacionado con la propulsión y la generación eléctrica a bordo.

4.2.1. Propulsión

El “Benchijigua Express” cuenta con un sistema de propulsión tipo WaterJet, el cual se caracteriza por su utilización en fast ferries, como es el caso del buque objeto de estudio.

La propulsión WaterJet es un mecanismo basado en generar el movimiento del barco mediante la canalización de una corriente de agua concentrada a lo largo de una dirección en forma de chorro. Este chorro es posteriormente dirigido mediante unas cubetas que proporcionan maniobrabilidad a la embarcación. Este sistema inventado tal y como lo conocemos de forma primitiva en 1954 por Sir Hamilton (34) permite alcanzar grandes velocidades de servicio, en este caso de hasta 38 nudos, para una embarcación de grandes dimensiones.

Para el funcionamiento de la propulsión WaterJet, el buque precisa de un conducto que conecte el fondo del buque con el espejo de popa a través del cual circule el agua de mar y se le proporcione energía cinética mediante una bomba axial que propicia la formación del chorro de agua que provoca el

desplazamiento del buque. A continuación, en la salida del buque del chorro, se sitúa una cubeta que según su ángulo de ataque respecto al chorro (eje horizontal perpendicular a la dirección del agua) permite un desplazamiento avante o atrás. Además, la estructura de estas cubetas tiene también un ángulo de giro respecto a un eje vertical situado en el espejo de popa, que permite orientar el chorro de agua y así transferirle maniobrabilidad total al buque. La siguiente figura muestra esquemáticamente la disposición de una propulsión WaterJet.

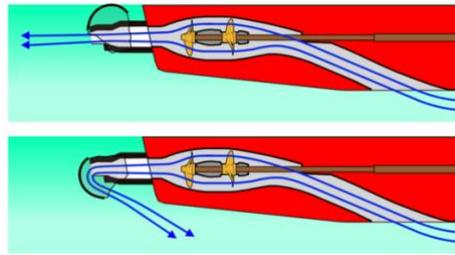


Figura 4.2.1.1. – Esquema de disposición de una propulsión WaterJet (35).

Los WaterJet pueden ir equipados con el sistema de cubetas o no, proporcionándole maniobrabilidad al buque o no. En el caso de no llevarlo, el chorro sale a en una única dirección, proporcionando únicamente propulsión, lo que se denomina WaterJet booster. En este tipo de WaterJet, como la única finalidad es proporcionar velocidad, el chorro de agua se hace pasar por una tobera a su salida, lo que le confiere todavía más velocidad a la corriente de agua, aumentando la eficiencia del WaterJet. En cambio, si está dotado con el sistema de cubetas que proporcionan maniobrabilidad al buque, se denominan WaterJet direccionales.

El “Benchijigua Express” está equipado por tanto con dos WaterJet direccionales y uno propulsor (booster). Todo esto está alimentado de energía mecánica por cuatro motores de combustión interna diésel que proporcionan 32.800 kW a los tres WaterJet, de forma que dos motores alimentan el booster mientras que los otros dos motores están dedicados a cada uno de los WaterJet direccionales (30). La totalidad de la planta propulsora se encuentra alojada en el casco central del buque (36). En la siguiente tabla se muestran los modelos de los WaterJet, así como de los motores que permiten este tipo de propulsión (30).

Motor	4 x MTU 20V8000 M71
WaterJet direccional	2 x Rolls Royce KaMeWa 125 SII

WaterJet propulsor

1 x Rolls Royce KaMeWa 180 BII

Tabla 4.2.1.1. – Elementos de propulsión y dirección del “Benchijigua Express”,
(elaboración propia).

La siguiente figura muestra las especificaciones técnicas de los motores propulsores.

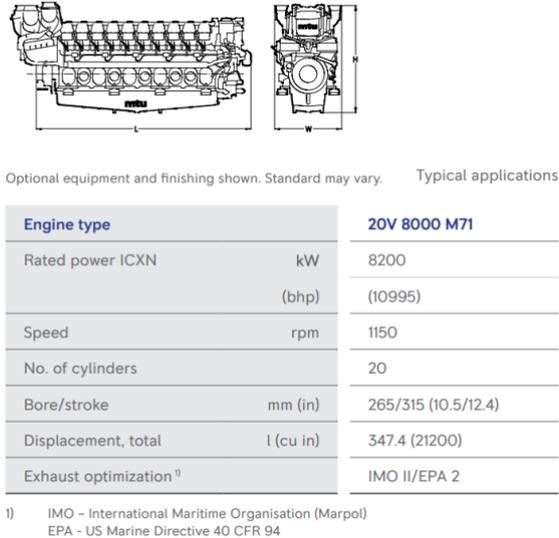


Figura 4.2.1.2. – Especificaciones del MTU 20V8000 M71 (37).

Los motores rápidos de esta categoría están alimentados por diésel, un combustible de mayor calidad que el fuel oil y demás derivados, por lo que es más caro. El uso de este combustible se debe en parte a dos motivos principales: el primero es que la instalación de almacén y trasiego de combustible es mucho más simple que en el caso del fuel, ya que no se necesitan de sistemas de calefacción dada su menor viscosidad a temperatura ambiente, lo cual es necesario en una sala de máquinas limitada como la propia de un trimarán; el segundo se debe a que los fast ferries como el “Benchijigua Express” operan en navegaciones cortas con variaciones habituales y en casos abruptas de los regímenes de trabajo del motor, algo que se adapta mejor a la mayor flexibilidad de operación que ofrece el diésel en comparación con el fuel. Estos motores de altas prestaciones están diseñados para ser capaces de entregar grandes potencias de la forma más eficiente y limpia posible, ya que la OMI ha estipulado unos estándares de emisiones a los cuales referirse para conocer el impacto medioambiental generado por las emisiones de cada buque en función de los motores con los que estén estos equipados (38).

En este caso, el motor cumple con dos estándares de emisiones, el EPA 2 de los Estados Unidos y el IMO II estipulado por la Organización Marítima Internacional, que regula la masa de NOx emitidos por unidad de potencia hora entregada por el motor. El buque, según sus condiciones actuales de operatividad, solo opera en aguas de las islas canarias, por lo que solo se le obliga el cumplimiento del baremo marcado por la institución marítima internacional. Tener la certificación IMO II, en el caso de este motor, asegura que este es capaz de entregar su potencia efectiva sin emitir más de 10,75 g/kWh. Esta cantidad depende del régimen de revoluciones a las que trabaje el motor (n) según la siguiente fórmula, la cual se aplica a los que operan entre 130 y 2000 revoluciones por minuto.

$$\text{Emisiones permitidas} = 44 \cdot n^{-0,2} \quad (4.2.1.1.)$$

Por otra parte, la disposición en V de los 20 cilindros de cada motor es idónea, ya que permite obtener un mayor número de cilindros por motor respecto a una disposición en línea por parte de una máquina térmica de dimensiones similares, lo que repercute en mayor potencia en el mismo espacio, el cual es bastante limitado dada la naturaleza del casco del buque. La planta propulsora se encuentra dispuesta en dos espacios de máquinas simétricos albergados en el casco central del buque, pero separados por un mamparo estanco transversal, de forma que dos motores propulsores que alimentan el WaterJet de empuje (el booster) se ubican en el espacio de máquinas de proa, y las otras dos máquinas térmicas destinadas a la alimentación de los WaterJet direccionales se encuentran en la cámara de máquinas de popa (36).

4.2.2. Planta de generación eléctrica

El “Benchijigua Express” está equipado con cuatro motores “MTU 12V2000” acoplados a sendos alternadores “STAMFORD HCM 63451” (22). En conjunto, estos elementos conforman la planta de generación eléctrica a bordo.

La ubicación de toda la planta generadora de electricidad está en el casco central del trimarán, junto con el resto de la sala de máquinas, siendo este el espacio más grande e ideal para organizar y repartir los pesos del diferente equipamiento del departamento de máquinas a bordo de forma que se garantice en todo momento la estabilidad del buque.

Por una parte, los motores diésel “MTU 12V2000” son capaces de entregar 887 kW cada uno a 1500 rpm. Cada motor cuenta con doce cilindros con disposición en V con los que genera y entrega la potencia de 887 kW efectivos fruto de una relación de compresión de 17,5:1, logrando que la presión media de trabajo de cada cilindro sea de 26,5 bar. Todas estas prestaciones son a costa de consumir 190 g/kWh al 100% de carga (39). La siguiente figura muestra las características de los motores de combustión interna diésel “MTU 12V2000”.

Application data ¹⁾

Engine	Fuel consumption optimized ²		Combustion air requirements	Fuel consumption optimized ²
	l/hr	g/kwh		
Manufacturer	MTU		Combustion air volume: m ³ /s	1.03
Model	12V2000G86F		Max. air intake restriction: mbar	40
Type	4-cycle			
Arrangement	12V		Cooling/radiator system	
Displacement: l	26.8		Coolant flow rate (HT circuit): m ³ /hr	31.6
Bore: mm	135		Heat rejection to coolant: kW	330
Stroke: mm	156		Heat rejection to charge air: kW	200
Compression ratio	17.5		Heat radiated to ambient: kW	35
Rated speed: rpm	1500		Fan power for mech. radiator (40°C): kWm	34
Engine governor	ADEC (ECU 9)		Fan power for mech. radiator (50°C): kWm	51.1
Speed regulation	± 0.25%		Air flow required for mech. radiator (40°C) cooled unit: m ³ /min	969
Max power: kWm	887		Air flow required for mech. radiator (50°C) cooled unit: m ³ /min	1328
Mean effective pressure: bar	26.5		Engine coolant capacity (without cooling equipment): l	63
Air cleaner	Dry		Radiator coolant capacity (40°C): l	59
			Radiator coolant capacity (50°C): l	140
Fuel system			Max. coolant temperature (warning): °C	102
Maximum fuel lift: m	5		Max. coolant temperature (shutdown): °C	105
Total fuel flow: l/min	30			
			Exhaust system	
Fuel consumption ²⁾			Exhaust gas temp. (after turbocharger): °C	520
At 100% of power rating:	203	190	Exhaust gas volume: m ³ /s	2.72
At 75% of power rating:	151	188	Maximum allowable back pressure: mbar	50
At 50% of power rating:	105	197	Minimum allowable back pressure: mbar	30
			Generator	
Lube oil system			Protection class	IP23
Total oil system capacity: l	80		Insulation class	H
Max. lube oil temperature (alarm): °C	103		Voltage regulation (steady state)	± 0.25%
Max. lube oil temperature (shutdown): °C	105		Radio interference class	N
Min. lube oil pressure (alarm): bar	4.5			
Min. lube oil pressure (shutdown): bar	4			

Figura 4.2.2.1. Ficha técnica del “MTU 12V2000” (39).

Por otra parte, los alternadores “STAMFORD HCM 63451” son los encargados de transformar la energía motriz entregada por los motores diésel en energía eléctrica. Estos son capaces de entregar 300 kVA y 2.300 kW en conjunto, con un factor de fase de 0,8 y una frecuencia de 50 Hz. Su estructura se basa en 2 pares de polos, con un régimen de giro de trabajo de 1500 rpm. Además, el conjunto del alternador está protegido con un aislante de tipo H, el cual garantiza el correcto funcionamiento del equipo siempre que este trabaje con temperaturas inferiores a 180 °C en su interior (40). La siguiente figura muestra la ficha técnica del alternador “STAMFORD HCM 63451”.

CONTROL SYSTEM	SEPARATELY EXCITED BY P.M.G.	
A.V.R.	MX321	
VOLTAGE REGULATION	± 0.5 % With 4% ENGINE GOVERNING	
SUSTAINED SHORT CIRCUIT	REFER TO SHORT CIRCUIT DECREMENT CURVES (page 7)	
INSULATION SYSTEM	CLASS H	
PROTECTION	IP23	
RATED POWER FACTOR	0.8	
STATOR WINDING	DOUBLE LAYER LAP	
WINDING PITCH	TWO THIRDS	
WINDING LEADS	6 (Wdg 312) or 12 (Wdg 311)	
STATOR WDG. RESISTANCE	0.0025 Ohms PER PHASE AT 22°C STAR CONNECTED	
ROTOR WDG. RESISTANCE	1.88 Ohms at 22°C	
EXCITER STATOR RESISTANCE	17 Ohms at 22°C	
EXCITER ROTOR RESISTANCE	0.079 Ohms PER PHASE AT 22°C	
R.F.I. SUPPRESSION	BS EN 61000-6-2 & BS EN 61000-6-4, VDE 0875G, VDE 0875N. refer to factory for others	
WAVEFORM DISTORTION	NO LOAD < 1.5% NON-DISTORTING BALANCED LINEAR LOAD < 5.0%	
MAXIMUM OVERSPEED	2250 Rev/Min	
BEARING DRIVE END	BALL 6224 (ISO)	
BEARING NON-DRIVE END	BALL 6317 (ISO)	
	1 BEARING	2 BEARING
WEIGHT COMP. GENERATOR	2117 kg	2145 kg
WEIGHT WOUND STATOR	1010 kg	1010 kg
WEIGHT WOUND ROTOR	866 kg	821 kg
WR ¹ INERTIA	20.0438 kgm ²	19.4965 kgm ²
SHIPPING WEIGHTS in a crate	2173 kg	2180 kg
PACKING CRATE SIZE	183 x 92 x 140(cm)	183 x 92 x 140(cm)

Figura 4.2.2.2. Ficha técnica del alternador “STAMFORD HCM 63451” (40).

En cuanto a su distribución eléctrica, esta comienza con los cuatro grupos electrógenos conectados a barras con una tensión de 690 V, con la particularidad de que dicha barra posee un interruptor de corte en el medio de forma que puede aislar, por un lado, dos grupos generadores y sus consumidores y, por el otro lado los otros dos grupos electrógenos y respectivos consumidores.

Por un lado, el embarrado con tensión a 690 V alimenta directamente tres consumidores distintos del equipo RCS de la propulsión WaterJet. Estos tres consumidores tienen sus respectivos cuadros eléctricos de reducido tamaño distribuidos por el buque según corresponda. Además, se alimentan otra serie de consumidores que precisan de 690 V para su funcionamiento, como por ejemplo las dos hélices de proa con las que está equipado el buque, las cuales son accionadas por sendos motores eléctricos.

Por otro lado, la planta eléctrica dispone de otros cuatro cuadros eléctricos repartidos por el buque según la ubicación y utilización de los consumidores que de ellos dependen. Estos cuadros precisan de una tensión en barras de 400 V, por lo que entre el embarrado con 690 V y cada cuadro (estos se conectan de forma independiente a dicha barra) se precisa de un transformador trifásico triángulo – estrella que modifique la tensión de línea de 690 V a 400 V añadiendo el neutro. Una vez logrado esto, dichos cuadros componen el elemento de distribución y conexión con los consumidores finales. Dos de estos son de distribución, uno en cada banda del buque; uno es secundario, del que se alimentan la mayor parte de consumidores que necesitan de 230 V; y por último uno es de emergencia, el cual está conectado por un lado a la barra de 690 V

(con un transformador a 400 V intercalado, como se ha explicado anteriormente) y por el otro al cuadro secundario a través de unos relés y conmutadores de protección (22). Además, este último cuadro de emergencia tiene la posibilidad de ser alimentado a 400 V directa y exclusivamente por el grupo electrógeno de emergencia, el cual tiene una capacidad de 250 kW. Esta configuración se debe que desde el cuadro de emergencia se alimentan todos los servicios esenciales del buque, entre los que destacan los relativos a la seguridad y comunicación del buque, por lo que se le establecen tres conexiones distintas de las que obtener corriente para que, en caso de emergencia, poder alimentar todos aquellos consumidores considerados como esenciales.

Cabe destacar que el “Benchijigua Express” no está equipado con un grupo electrógeno de cola (22), a diferencia de los buques mercantes habituales, ya que dada su condición de “fast ferry”, se precisa que toda la energía entregada por los motores propulsores sea dedicada a producir el avance del buque a la mayor velocidad posible, la cual se vería claramente disminuida si se le acoplase un generador de cola. Esto supone reducir la eficiencia energética del buque al precisar de un mayor consumo de diésel para poder autoabastecerse de energía eléctrica.

En el anexo I se adjunta el esquema de distribución eléctrica del “Benchijigua Express”, en el que se puede observar tanto el número de elementos presentes en la instalación, como el tipo y modo de las pertinentes conexiones entre estos.

4.3. Estructura y distribución de espacios del “Benchijigua Express”.

El “Benchijigua Express” es un buque que presenta un triple casco, comúnmente denominado como trimarán. Esta configuración del casco del buque, conformada por un casco central y principal en el que se albergan la mayor parte de equipos y elementos, y dos flotadores laterales que a su vez ejercen de soporte para las cubiertas superiores que abarcan toda la manga de la embarcación, permite mantener una estabilidad óptima al mismo tiempo que se alcanzan grandes velocidades (40,4 nudos de velocidad máxima en las pruebas de mar) (36). Por otra parte, en aras de aumentar y maximizar la velocidad del buque, el material elegido para su construcción fue una aleación de aluminio, la cual ofrece altas prestaciones, siendo capaz de garantizar una ligereza destacable sin perder resistencia. Además, al presentar una estructura

de tipo trimarán, el buque reduce su resistencia a la corriente, ya que presenta una menor superficie de contacto con el agua salada, es decir, una menor obra viva, siendo esta mucho más hidrodinámica, ya que los flotadores laterales y el casco son de poca manga al no necesitar albergar grandes espacios en su interior, puesto que los espacios necesarios se disponen en las cubiertas dispuestas sobre estos tres como soportes (36).

Por último, mencionar que el “Benchijigua Express” es más ligero que un buque convencional, ya que nuevamente su distribución del casco en trimarán le permite eliminar la necesidad de una quilla de gran tamaño y peso a lo largo del fondo de la obra viva, lo que supone otro método de reducir el peso de la embarcación (41).

La siguiente figura muestra la vista lateral y frontal del “Benchijigua Express”, pudiéndose observar claramente la disposición en trimarán del casco y las formas de la obra viva, resultando obvio la menor superficie de rozamiento con el mar respecto a un buque monocasco convencional.



Figura 4.3.1. Vista lateral y frontal del “Benchijigua Express” (22).

4.4. Distribución de los espacios a bordo.

Para lograr transportar el máximo número de personas y vehículos a bordo de cada travesía, el buque distribuye sus espacios en cuatro cubiertas: la cubierta principal, la cubierta superior, la cubierta de observación y la cubierta del puente de mando.

La cubierta principal está situada en la parte inferior del buque, justo por encima de los espacios de máquinas del casco central. Su finalidad es la de proveer al buque de un espacio de aparcamiento para poder transportar los vehículos pertinentes. Esta cubierta cuenta con dos niveles, ambos destinados al transporte de carga rodada. Se accede a ella por las rampas de popa, las cuales se pliegan contra el espejo de popa del barco durante las navegaciones. El espacio se conforma por grandes extensiones libres de obstáculos para favorecer la circulación a bordo durante la carga y descarga en puerto.

Por encima de la cubierta principal (incluyendo ambos niveles internos), se encuentra la cubierta superior. Esta cubierta se encuentra parcialmente a la intemperie, permitiendo la estancia de pasajeros al aire libre durante las travesías. Además, en esta cubierta se ubican los distintos equipos propios del departamento de marinería, como son las maquinillas, cabos y demás elementos de fondeo y amarre. Por otra parte, la cubierta alberga un espacio cerrado dotado con grandes cristaleras que, al igual que el espacio exterior, dedicada a acomodar a los pasajeros.

Subiendo una cubierta si se tiene la vista lateral del buque como referencia, se ubica la cubierta de observación. Esta cubierta está destinada nuevamente al transporte de pasajeros, por lo que también dispone de asientos y espacios de hostelería. Sin embargo, al estar sobre la cubierta superior, no dispone de espacios exteriores transitables, pese a tener una menor superficie que su homóloga inferior y por tanto no ocupar todo el techo de la cubierta inferior. En el espacio exterior existente pero no transitable de la cubierta de observación mencionado previamente, se ha trazado una salida de emergencia con espacio suficiente para realizar una eventual evacuación de un pasajero y/o tripulante mediante helicóptero con “winch”, constando así en los pertinentes planos del buque y en la misma cubierta mediante diversas señales y marcas (22).

Finalmente, en lo más alto del buque, nuevamente con una superficie menor a su cubierta inferior (la cubierta de observación en este caso), se encuentra la cubierta del puente de mando, en la que únicamente le está permitido el acceso a la tripulación del buque.

La siguiente figura muestra una vista lateral del “Benchijigua Express” en la que se especifican las diferentes cubiertas del buque y sus niveles.

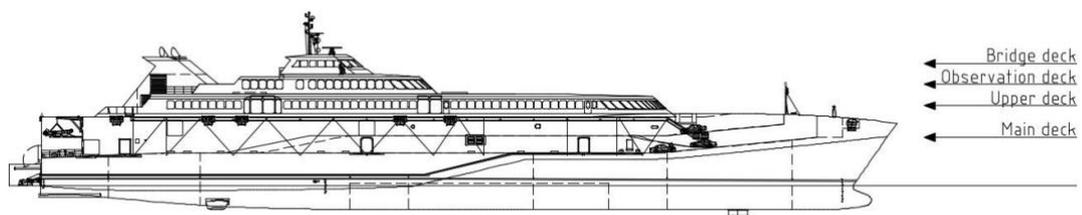


Figura 4.3.1.1. Plano de cubiertas del “Benchijigua Express” (22).

4.4.1. Posibles espacios a bordo para una instalación fotovoltaica.

A la hora de diseñar una instalación fotovoltaica, siempre se encuentra presente la premisa de que, a mayor número de paneles solares instalados, mayor será la potencia generada por el campo fotovoltaico.

En cambio, pese a lo que cabría pensar, además de la cantidad de paneles, hay que tener en cuenta la situación y orientación de estos respecto al sol, y es que es mejor tener menos pero bien ubicados, que una gran cantidad de paneles fotovoltaicos mal orientados.

Entre los criterios o requisitos a tener en cuenta durante la búsqueda e identificación de espacios viables para albergar una instalación fotovoltaica, destacan dos aspectos clave: la disposición de una superficie plana y libre de elementos y, la ausencia de objetos, equipos o cualquier otra disposición que suponga un obstáculo para la incidencia directa de la radiación solar sobre el panel fotovoltaico, es decir, cualquier elemento que ocasione sombras (bien sean parciales o totales, temporales o constantes) sobre los paneles solares.

Aplicando estos criterios de búsqueda a los espacios disponibles en el “Benchiigua Express”, estos se reducen a las cubiertas superior, de observación y del puente de mando, ya que son las que reciben la incidencia solar al tener contacto con el ambiente exterior, no siendo así en el caso de la cubierta principal.

Entre estas tres opciones, la cubierta del puente de mando queda descartada, ya que además de ser la de menor tamaño, esta alberga en su parte superior todos los equipos relativos a las comunicaciones y visibilidad del buque, como son el radar, antenas, luces, etc. Todos estos elementos suponen obstáculos para la incidencia directa de la radiación solar sobre los paneles, ya que generan sombras sobre estos, afectando grave y directamente al rendimiento de estos.

Por otra parte, entre la cubierta superior y la de observación, si bien es cierto que la cubierta superior es la de mayor superficie, esta está destinada a la ocupación por parte del pasaje durante las travesías, lo cual no es idóneo si se trata de términos de seguridad y mantenimiento de la instalación fotovoltaica, puesto que los pasajeros se acercarían constantemente a los paneles solares, con el consecuente riesgo de que voluntaria o involuntariamente alteren algún elemento de la instalación, con las posibles consecuencias tanto para los individuos como para el rendimiento de los paneles. Por tanto, de ubicarse aquí,

habría que restringir o prohibir el acceso a aquella zona de la cubierta destinada a la energía fotovoltaica, algo que iría en detrimento del pasaje, tanto en la calidad de su estancia a bordo, como posiblemente en la cantidad máxima permitida por travesía. Esto conllevaría la posible reducción de pasajeros, lo que generaría una bajada de ingresos por parte de la naviera, consiguiéndose el efecto contrario de la instalación fotovoltaica, que es generar el mayor ahorro posible. Además, en la cubierta superior se disponen los equipos de marinería precisos, los cuales suponen, nuevamente, elementos causantes de sombras sobre los paneles fotovoltaicos.

Finalmente, la cubierta con mejores características a bordo del “Benchijigua Express” es la cubierta de observación. Pese a no ser la de mayor superficie, esta dispone de 1.223 m² planos y libres de obstáculos que causen sombras, repartidos a lo largo de la parte exterior de dicha cubierta, que a su vez constituye el techo de la parte cerrada de la denominada cubierta superior. Sin embargo, se ha de tener en cuenta que en esta cubierta hay un espacio reservado como salida de emergencia para la evacuación mediante helicóptero con “winch” de cualquier pasajero o tripulante que lo precise, por lo que esta superficie ha de quedar libre y, por tanto, no se puede instalar ningún panel fotovoltaico. De esta forma, la superficie disponible para albergar un campo fotovoltaico es de 946 m² libres de obstáculos (22). Además, este potencial espacio a ser ocupado por paneles fotovoltaicos no tiene ninguna otra utilidad, por lo que se puede realizar la instalación estos sin necesidad de realizar ninguna alteración en los espacios ya ocupados a bordo.

La siguiente figura visualiza en verde el espacio exterior de la cubierta de observación que se puede dedicar a la instalación de paneles fotovoltaicos, mientras que en rojo se destaca la superficie destinada a la evacuación mediante helicóptero con “winch” de cualquier persona a bordo, estipulada en los planos del “Benchijigua Express”.

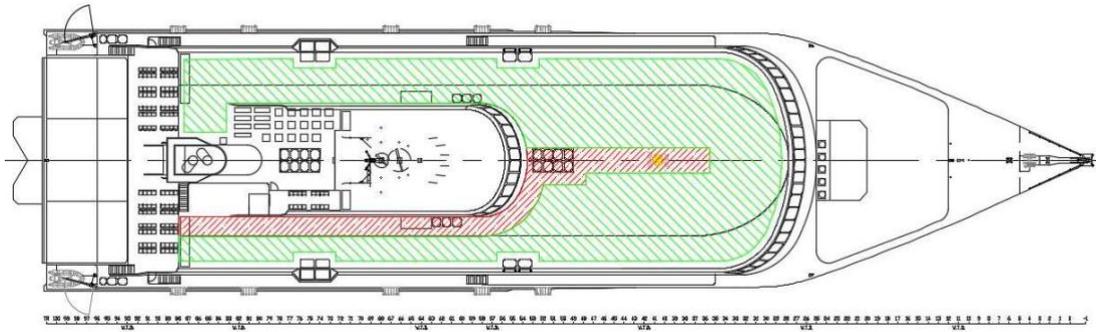


Figura 4.3.2.1. Plano de la superficie libre en la cubierta de observación para una instalación fotovoltaica (22).

5. CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DEL “BENCHIJIGUA EXPRESS”.

En este bloque se procederá a concretar las necesidades materiales para poder llevar a cabo la dotación del “Benchijigua Express” con una instalación fotovoltaica que le ayude a reducir sus emisiones y costes de operación. Esto implica, la selección de marcas, modelos y cantidades de los diferentes equipos que componen la instalación.

Para realizar esta búsqueda y selección de los distintos elementos, se priorizó la relación calidad – precio. Por un lado, la calidad ha de ser alta y con garantías de una durabilidad y rendimiento altos, mientras que, por otro lado, el precio ha de ser aceptable, ya que en caso de ser elevado, la instalación no supondría una reducción de costes de operación del buque significativa, por lo que pese a reducir las emisiones, resultaría un proyecto poco llamativo económicamente dado su alto período de amortización.

La instalación diseñada acorde a las prestaciones y necesidades del “Benchijigua Express” cumple con el esquema de la siguiente figura.

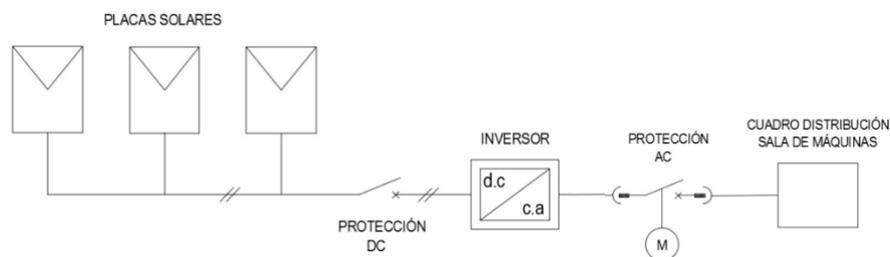


Figura 5.1. Esquema eléctrico de distribución de la instalación fotovoltaica del “Benchijigua Express” (22).

Como se puede observar en la anterior figura, la instalación se compondría inicialmente del campo solar, es decir, el conjunto de paneles fotovoltaicos

conexionados entre sí, los cuales generan una corriente eléctrica continua, por lo que se conectan, tras el elemento de protección de la parte de corriente continua, a un inversor.

Como ya se ha explicado anteriormente, la función del inversor es convertir la corriente continua en corriente alterna. En este caso, se ha optado por un inversor en cadena (o string), es decir, un único inversor para toda la instalación, en lugar de los microinversores. El motivo de esta selección se debe a un criterio de simplificar lo máximo posible la instalación, a la vez que se evitan exposiciones innecesarias de equipos electrónicos a las adversas condiciones meteorológicas y ambientales marítimas. Además, la ventaja de los microinversores se resalta en el caso de necesitar paliar las bajadas de rendimiento del campo solar causadas por sombras parciales sobre los paneles solares, algo que dada la condición de buque en alta mar y de la ubicación de la instalación a bordo se vuelve inútil, ya que el riesgo a eventuales sombras sobre la matriz solar es prácticamente nulo, salvo por breves ocasiones en las que el propio buque pueda hacer una mínima sombra sobre su propia instalación fotovoltaica.

Se ha de destacar la ausencia de baterías en la instalación, pese a ser un elemento contemplado previamente y básico en muchos proyectos fotovoltaicos. Sin embargo, en este caso, tras unos cálculos aproximados previos y, tras la consulta de otros estudios de viabilidad sobre la energía fotovoltaica llevados a cabo sobre diferentes buques, se ha observado la alta dificultad por parte de los paneles fotovoltaicos para poder generar la energía eléctrica a bordo suficiente para poder abastecer al 100% las necesidades energéticas del buque (19.8). Cabe entonces deducir que, si la instalación fotovoltaica no es capaz de generar y entregar toda la energía eléctrica consumida por el barco, es totalmente innecesario dotar dicha instalación de un grupo de almacenamiento de electricidad, ya que nunca se dará la situación en la que haya un excedente de energía y, por tanto, exista la necesidad de almacenar esta para un posterior uso. Por tanto, se ha prescindido de las baterías, ya que suponen más inversión sin estar su necesidad probada.

Al no precisarse un sistema de almacenamiento de energía eléctrica en la instalación fotovoltaica, se prescinde también de un regulador de carga independiente, dispositivo cuya única función es gestionar la corriente continua

proveniente del campo solar para cargar las baterías y entregar el excedente al inversor para su consumo directo. Este hecho permite nuevamente simplificar la instalación, a la vez que se abaratan costes y se aumenta la fiabilidad del proyecto.

A continuación del inversor se dispone del elemento de protección de la parte de corriente alterna, el cual está equipado con un accionamiento automático. Este dispositivo de seguridad sirve además para desconectar la instalación fotovoltaica del cuadro eléctrico de la sala de máquinas, aislando la producción fotovoltaica del cuadro de distribución, ya sea por motivos de seguridad o de mantenimiento.

Finalmente, la electricidad se conecta al cuadro de distribución de la sala de máquinas, lugar al que se entrega la electricidad y donde termina el dimensionamiento de la instalación.

En el anexo II se adjunta el esquema de distribución eléctrica del “Benchijigua Express” con la instalación fotovoltaica dimensionada a continuación. En él se pueden observar los distintos elementos que conforman la instalación en conjunto, así como su disposición y posterior conexión al embarrado existente.

5.1. Paneles fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos suponen el elemento de mayor importancia a la hora de dimensionar una instalación de producción fotovoltaica, ya que conforman el elemento generador. Es por eso, que es de vital importancia asegurar una buena elección de paneles solares, ya que la eficiencia y viabilidad del proyecto dependen en gran medida de estos.

Durante el proceso de búsqueda de módulos fotovoltaicos en el mercado actual, se ha tenido en cuenta por una parte el precio, aspecto del que depende la viabilidad económica y, por otra parte, la potencia pico del panel, según la cual la instalación tendrá más capacidad de producción o no, dependiendo de este ámbito la viabilidad energética. Además, también se valoró la resistencia a los efectos climatológicos adversos que se producen en un ambiente marino.

Tras aplicar este cribado a las opciones que el mercado de paneles fotovoltaicos ofrece, se obtuvieron tres opciones, las cuales se procederán a detallar a continuación.

5.1.1. Panel fotovoltaico “A-335P GS”

Este panel policristalino de 24 V es de la casa “Atersa”, perteneciente al grupo “Elecnor”. Ofrece una gran combinación entre potencia, eficiencia, precio y durabilidad; ya que ofrece una producción de 335 Wp (Wattios pico) con un rendimiento de 17,26%.

Estos parámetros los logra gracias a su estructura de 72 células de silicio policristalino, encapsuladas entre un cristal y una capa posterior de poliéster modificado, lo que le permite aprovechar prácticamente toda la luz solar que recibe, sin pérdidas por reflejos.

Además, está equipado con una caja de conexiones diseñada para facilitar la conexión en serie de los módulos sin herramientas adicionales (42), lo que simplifica la instalación y mantenimiento, al mismo tiempo que permite su manipulación por parte del personal de máquinas del “Benchijigua Express” sin necesidad de formación específica y extensa en la materia.

La casa fabricante ofrece un respaldo de calidad ofreciendo una garantía de 10 años contra defectos de fabricación y, de 25 años en cuanto a rendimiento del panel.

El módulo fotovoltaico “A-335P GS” ofrece buenas prestaciones, pero está construido a base de células de silicio policristalino, lo que provoca que el módulo obtenga un menor rendimiento energético respecto a un panel monocristalino de idénticas características. Por otra parte, ese rendimiento menor provoca que sea accesible a un precio menor que uno monocristalino.

La siguiente tabla recoge las principales características y especificaciones técnicas de este modelo de panel fotovoltaico.

Especificaciones técnicas	A-335P GS
Potencia máxima (P_{max})	335 W
Tensión máxima potencia (V_{mp})	37,7 V
Corriente máxima potencia (I_{mp})	8,89 A
Tensión de circuito abierto (V_{oc})	46,5 V
Corriente en circuito abierto (I_{oc})	9,51 A
Rendimiento del módulo	17,26%
Temperatura de normal funcionamiento de la célula	$45,0 \pm 2$ °C
Dimensiones	1956 x 992 x 40 mm
Peso	21,5 kg

Carga estática frontal máxima (nieve y viento)	5400 Pa
Carga estática posterior máxima (viento)	2400 Pa
Células (cantidad/tipo/dimensiones)	72 (6 x 12) / Policristalina / 156,75 x 156,75 mm
Cable (longitud/sección)	1200 mm / 4 mm ² / Compatible MC4
Caja de conexiones (protección/diodos)	IP67 / 3 diodos
Temperatura de funcionamiento	De -40 °C a +85 °C
Precio	144,05 €/módulo

Tabla 5.1.1.1. Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico “A-335p GS” (43).

En definitiva, este modelo de panel fotovoltaico ofrece una potencia pico razonable, sin ser esta muy elevada (335 Wp), a un precio muy económico. En cambio, al ser de silicio policristalino, presenta un rendimiento menor respecto a los monocristalinos, además de no destacar por su resistencia a las adversidades climáticas marítimas.

5.1.2. Panel fotovoltaico “JST460M”.

Este panel fotovoltaico está compuesto de 156 células de silicio monocristalino y está fabricado por la casa “Just Solar”.

Su estructura se conforma según la tecnología Half – Cell (HC), según la que las células fotovoltaicas son más cortas que una convencional y están conectadas en dos series en cadena (o string). Esta configuración permite subdividir el panel en dos módulos internos, de forma que se reducen las pérdidas por corriente a la vez que se aumenta el rendimiento, incluso cuando el módulo fotovoltaico está afectado por sombras parciales, ya que dichas sombras parciales afectarían a parte del panel, y este al estar subdividido en dos series de strings, mantiene el rendimiento óptimo de la parte que no está sombreada (44).

Por otra parte, las células están también fabricadas acorde a la tecnología PERC (Passivated Emmitter Rear Contact), según la cual las células son equipadas con una capa posterior que ayuda a captar más radiación solar y, con una lámina superior que provoca que la luz solar sobrante (siempre se

refleja al exterior, con su consecuente pérdida, parte de la energía solar que se proyecta sobre el panel) rebote dentro de la célula y se aproveche parte del excedente de radiación solar que los paneles fotovoltaicos convencionales no son capaces de aprovechar (45).

Como consecuencia del alto rendimiento entregado por este modelo de módulo fotovoltaico, este panel permite maximizar el rendimiento por metro cuadrado de instalación, siendo capaz de entregar 460 Wp y convirtiéndolo en un modelo ideal para superficies de tamaño reducido, como es el caso de la cubierta de un buque.

En cuanto a sus propiedades mecánicas, destaca por su gran resistencia a agentes externos, resaltando su aguante a la sal marina, el amoníaco, el polvo o la arena. Para ello, el panel solar está dotado con un cristal revestido con un material que permite que no se le adhieran a este ningún tipo de suciedad o incrustaciones (46). Este aspecto es de gran valor e importancia a la hora de valorar este módulo, ya que la instalación fotovoltaica va a estar situada en la cubierta de un buque expuesta a los agentes ambientales marinos, por lo que ha de ser capaz de resistir inequívocamente los efectos adversos de la sal marina y la arena principalmente.

La siguiente tabla resume las especificaciones técnicas de este panel fotovoltaico en concreto.

Especificaciones técnicas	JST460M
Potencia máxima (P_{max})	460 W
Tensión máxima potencia (V_{mp})	44,20 V
Corriente máxima potencia (I_{mp})	10,41 A
Tensión de circuito abierto (V_{oc})	53,02 V
Corriente en circuito abierto (I_{oc})	11,07 A
Rendimiento del módulo	21,20%
Temperatura de normal funcionamiento de la célula	$44,0 \pm 2$ °C
Dimensiones	2178 x 996 x 35 mm
Peso	25 kg
Carga estática frontal máxima (nieve y viento)	5400 Pa
Carga estática posterior máxima (viento)	2400 Pa

Células (cantidad/tipo/dimensiones)	156 (2 x (6 x 13)) / Monocristalina / 156,75 x 156,75 mm
Cable	Cable fotovoltaico compatible MC4
Caja de conexiones (protección)	IP 68
Precio	162,86 €/módulo

Tabla 5.1.2.1. Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico “JST460M” (46).

En definitiva, este panel de 156 células de silicio monocristalino ofrece por una parte las características de alto rendimiento (incluso en situaciones de sombreados parciales) gracias a la tecnología PERC y Half – Cell, a la vez que muestra una gran resistencia ante la salitre y arena, entre otros agentes externos, gracias a su cristal revestido auto limpiante que impide las incrustaciones en su superficie. Además, el fabricante ofrece una garantía de 10 años sobre el producto y, de 25 años sobre la potencia, acorde a una pérdida lineal marcada por la propia casa “Just Solar”, lo que permite contar con la fiabilidad del panel a largo plazo, algo clave para su amortización.

Por otra parte, está su precio, mayor que sus competidores y que, al estar más equipado tecnológicamente, los paneles se vuelven más delicados a cualquier factor externo.

5.1.3. Panel fotovoltaico “JKM405M-72H”.

Este panel fotovoltaico está compuesto por 144 células fotovoltaicas de silicio monocristalino, siendo capaz de ofrecer una potencia máxima de 405 Wp. Pertenece al fabricante mundial “JinKo Solar”, quien ofrece una garantía de 10 años sobre el producto y, de 25 años sobre una disminución de potencia lineal estipulada por ellos mismos.

Al igual que el panel anterior, sus células fotovoltaicas están constituidas acorde a la tecnología PERC (Passivated Emmitter Rear Contact), explicada en el apartado anterior. Por otra parte, sus células son del tipo 5 Bus Bar, las cuales entregan nuevamente mayor eficiencia.

Los dos aspectos a destacar de este módulo fotovoltaico son su gran sistema anti – degradación de potencial inducido (PID) y su resistencia a agentes externos.

El primero es clave a la hora de mantener el rendimiento del panel con el paso de los años, ya que la degradación de potencial inducido es un problema que

sufren los paneles a partir de unos pocos años de uso, teniendo un crecimiento exponencial y afectando directamente sobre el potencial que entregan los paneles y, por tanto, la producción energética de la instalación en conjunto, disminuyendo su rendimiento y ocasionando que se retrase la amortización de la instalación, ya que se generaría menos energía a través de la instalación fotovoltaica, de forma que ante una misma demanda eléctrica, se precisaría de cada vez una mayor aportación por parte de los grupos electrógenos diésel para garantizar el suministro, provocando mayor gasto y, por tanto, una menor tasa anual de amortización.

El segundo aspecto es clave, como se ha explicado anteriormente, dado el entorno al que va a estar expuesto el campo fotovoltaico. Este panel garantiza una alta resistencia a la brisa marina y al amoníaco a través de un certificado de la casa “TUV NORD”. Sin embargo, no se aseguran las mismas prestaciones si se refiere a arena o polvo, dos elementos muy presentes en el archipiélago canario, región en la que opera el “Benchijigua Express” y al que estarían expuestos los paneles durante las estancias en puerto y, probablemente, durante las travesías.

En cuanto a su capacidad de trabajo y rendimiento durante exposiciones temporales a sombreados parciales, el panel está dotado con la estructura Half – Cell, explicada en el apartado anterior y, que permite un óptimo trabajo y rendimiento durante estas condiciones de operación.

En el caso de que las exposiciones sean en condiciones de una baja irradiación lumínica, como es el caso de los días nublados, el cristal y la textura de la superficie de la célula fotovoltaica le permiten al módulo fotovoltaico seguir entregando una potencia aceptable, sin verse especialmente agravado su rendimiento a causa de estas condiciones ambientales (45).

La siguiente tabla recoge las especificaciones técnicas de este modelo de panel fotovoltaico.

Especificaciones técnicas	JKM405M-72H
Potencia máxima (P_{max})	405 W
Tensión máxima potencia (V_{mp})	40,42 V
Corriente máxima potencia (I_{mp})	10,02 A
Tensión de circuito abierto (V_{oc})	49,40 V
Corriente en circuito abierto (I_{oc})	10,69 A

Rendimiento del módulo	20,13%
Temperatura de normal funcionamiento de la célula	45,0 ± 2 °C
Dimensiones	2008 x 1002 x 30 mm
Peso	22 kg
Carga estática frontal máxima (nieve y viento)	5400 Pa
Carga estática posterior máxima (viento)	2400 Pa
Células (cantidad/tipo/dimensiones)	144 (6 x 24) / Monocrystalina / 158,75 x 158,75 mm
Cable (sección)	4 mm ² / Compatible TÜV
Caja de conexiones (protección/diodos)	IP67
Temperatura de funcionamiento	De -40 °C a +85 °C
Precio	153,00 €/módulo

Tabla 5.1.3.1. Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico “JKM405M-72H” (47).

En definitiva, este modelo de panel fotovoltaico ofrece una buena relación calidad/precio. Incorpora tanto la tecnología PERC (Passivated Emmitter Rear Contact), como la Half – Cell. Así mismo, presenta unas buenas prestaciones en situaciones de baja irradiación solar e incluye un sistema de anti – degradación del potencial inducido. Sin embargo, destaca por su resistencia a la brisa marina y el amoníaco, pero no ofrece garantías frente a la incidencia de la arena y el polvo.

5.1.4. Comparativa y selección final del panel fotovoltaico.

Entre los tres paneles propuestos hay una gran diferencia que deja en la última posición a uno de ellos: el tipo de célula fotovoltaica. Mientras que el de “Jinko Solar” y “Just Solar” son de silicio monocristalino con tecnología Half – Cell, el de “Artesa” es de silicio policristalino, lo que pese a hacerlo más barato, hace que tenga un rendimiento menor y unas especificaciones menos atractivas, sobre todo si se tiene en cuenta la necesidad de maximizar la producción energética. Precisamente en ese aspecto, destaca el panel “JST460M”, ya que, con su potencia máxima de 460 W, es valedor de ser el módulo que mejor rendimiento entrega en cuanto a relación W/m² se refiere.

Entre los otros dos paneles fotovoltaicos, el “JKM405M-72H” y el “JST460M”, existen apenas diferencias, ya que ambos están dotados con las tecnologías PERC y Half – Cell para aumentar su rendimiento. Sin embargo, se muestran dispares en tres aspectos: la resistencia a agentes externos, la degradación de potencial inducido y el precio.

Ambos módulos presumen de una buena resistencia al amoniaco, pero solo el de la casa “Just Solar” ofrece un alto nivel de resistencia al salitre, el polvo y la arena, mientras que el de “Jinko Solar” también ofrece resistencia a la brisa marina (que no es lo mismo que el salitre).

Sin embargo, solo el panel “JKM405M-72H” cuenta con un sistema de anti-degradación PID (Potential Induced Degradation), aspecto destacable puesto que intenta paliar los efectos negativos de crecimiento exponencial que el paso de los años produce sobre la potencia máxima entregada por el módulo y, por ende, de toda la instalación.

En cuanto al precio, el “JST460M” es el más caro, con un precio de 162,86 €/módulo, frente a los 153 €/módulo del panel “JKM405M-72H”. En cambio, la diferencia de precio no es elevada, aunque se ha de tener en cuenta que esta se magnifica si se comparan los precios del conjunto de paneles fotovoltaicos necesarios para conformar la instalación, siendo mayor cuantos más módulos sean necesarios para formar el campo fotovoltaico.

Sobre los estándares de protección exigidos por la sociedad de clasificación del “Benchijigua Express” para los paneles fotovoltaicos, “DNV GL” estipula que estos han de tener un grado de protección superior a IP 44, acorde con el apartado 712.510.3 de la norma “IEC 62262” (48), aspecto que cumplen los tres módulos, teniendo protecciones IP 67 el primero y el último e IP 68 el “JST460M”. Además, los tres también cumplen con la norma “IEC 61215” (48), exigida igualmente por la sociedad de clasificación (43,46,47).

El peso de los paneles también es un aspecto destacable, ya que en función de este y del número de módulos necesarios para conformar el campo fotovoltaico la instalación puede tener una afectación sobre las condiciones de estabilidad del buque. Los tres están en pesos similares, con más de 21 kg todos ellos, habiendo una diferencia de 3,5 kg entre el menos pesado (“A-335P GS”) y el más pesado (“JST460M”). Nuevamente la diferencia se magnifica en el peso del conjunto de paneles, pero este último es el de mayor superficie, por lo que se

precisarían menos unidades para completar la matriz fotovoltaica, compensando su diferencia de masa con los demás.

La siguiente tabla compara los tres paneles fotovoltaicos sobre los diferentes aspectos a tener en cuenta a la hora de seleccionar uno para conformar la parte generadora de la instalación fotovoltaica.

Especificaciones	A-335P GS	JST460M	JKM405M-72H
Tipo de célula fotovoltaica	Policristalina	Monocristalina	Monocristalina
Potencia máxima	335 W	460 W	405 W
Superficie	1,94 m ²	2,17 m ²	2,01 m ²
PERC	No	Sí	No
Half – Cell	No	Sí	Sí
Anti – PID	No	No	Sí
Rendimiento con baja irradiancia	Malo	Medio	Alto
Resistencia a agentes externos	Baja	Salitre, amoníaco, polvo y arena	Brisa marina y amoníaco
Garantía (producto / potencia)	10 / 25 años	10 / 25 años	10 / 25 años
Peso	21,5 kg	25 kg	22 kg
Rendimiento	17,26 %	21,20 %	20,13 %
Precio por módulo	144,05 €	162,86 €	153 €
Calidad/precio	Mala	Buena	Buena

Tabla 5.1.4.1. Comparativa entre los tres paneles fotovoltaicos (43,46,47).

Finalmente, tras comparar las ventajas y desventajas de cada una de las tres opciones, el panel seleccionado para la instalación fotovoltaica a bordo del “Benchijigua Express” es el “JST460M”. Su elección se debe a que es el panel con mejores especificaciones en cuanto de resistencia a los efectos adversos ocasionados por los agentes externos marinos, de rendimiento del módulo y de relación entre potencia máxima y superficie, maximizando el rendimiento de producción energética por metro cuadrado de panel. En cuanto a su precio y peso, pese a ser los más altos en cada caso, estos se ven compensados en el

conjunto del campo solar ya que, al ser módulos de una mayor superficie, se precisa de un menor número de estos, por lo que el montante total no tiene una diferencia resaltable con el del panel “JKM405M-72H”.

5.1.5. Número de paneles que conforman el campo fotovoltaico.

Una instalación fotovoltaica debe su capacidad de producción en gran medida al número de paneles solares que la componen. En este caso, se sabe que la ubicación idónea a bordo del “Benchijigua Express” está en la parte exterior de la cubierta de observación. En este emplazamiento se disponen de 946 m², una vez descontada la superficie necesaria para habilitar una salida de evacuación aérea, tal y como se ha explicado anteriormente. Esta superficie libre puede ser ocupada por los paneles fotovoltaicos seleccionados, pero en aras de facilitar el mantenimiento de los módulos solares, se han de tener en cuenta unos pequeños corredores a través de los cuales alcanzar los paneles por parte de los operarios de mantenimiento.

Dicho mantenimiento, en el caso de un campo fotovoltaico, es mínimo y prácticamente inexistente salvo avería, ya que los módulos suponen unos dispositivos fijos, sin partes móviles y sin ningún tipo de elemento mecánico, únicamente formado por diferentes componentes eléctricos y electrónicos, por lo que no son habituales las averías dada la alta fiabilidad de estos equipos. El principal mantenimiento corresponde a la limpieza de la capa superior de los paneles fotovoltaicos, ya que afectan de forma negativa sobre el rendimiento de estos, sin embargo, el módulo solar seleccionado ofrece altas garantías en cuanto a resistencia a incrustaciones, salitre, arena, polvo o amoníaco se refiere, por lo que tampoco es preciso realizar limpiezas habituales durante cortos intervalos de tiempo sobre los mismos.

Como consecuencia de lo anterior, los paneles fotovoltaicos han de ser accesibles, principalmente para su limpieza, pero minimizando el espacio utilizado en proporcionar dicho acceso, ya que implica un menor número de módulos fotovoltaicos y, por ende, una menor producción energética.

Por tanto, tomando como referencia el plano mostrado en la figura 4.3.2.1. se estipula que el acceso a los paneles ubicados a lo largo del costado de babor es realizable tanto desde la cubierta inferior haciendo uso de algún elemento de ascensión, como desde el interior de la cubierta de observación a través del

ventanal dispuesto longitudinalmente a lo largo del cierre de esta. En el caso de los localizados en el costado de estribor, estos son menos que sus homólogos simétricos, ya que por ese costado transcurre el corredor correspondiente a la salida para una eventual evacuación aérea de emergencia, por lo que los paneles son accesibles desde el propio espacio dedicado a dicha salida de emergencia.

En cuanto a los módulos situados en la parte frontal delantera de la cubierta de observación, nuevamente los que están situados en el borde de esta son accesibles desde la cubierta inferior a través de equipos que permitan salvar la diferencia de nivel entre ambas cubiertas, mientras que las centrales pueden ser alcanzadas haciendo uso, al igual que el caso anterior, del corredor respetado para la salida de emergencia. Para el caso de los paneles fotovoltaicos ubicados en el medio de este espacio frontal delantero, se han dispuesto cuatro pasillos de 0,3 metros de ancho y 4,98 metros de largo hacia el costado de babor, y por el de estribor, un único pasillo de 25,24 metros de largo y 0,3 metros de ancho. Los cuatro primeros nacen del corredor ya formado por la mencionada salida de emergencia, optimizando el espacio disponible en la cubierta, mientras que el segundo, en otra disposición, nace de la curva en el costado de estribor del espacio de la salida de emergencia y transcurre hacia la proa. Para este diseño se ha tenido en cuenta la disposición de los paneles y sus medidas, en aras de optimizar el espacio lo máximo posible. Se ha estipulado formar grupos de 3 paneles longitudinalmente desde el inicio de la parte amplia de la cubierta hasta la proa con los pasillos de 0,3 metros de anchos intercalados, mientras que los 4,98 metros proporcionan una profundidad hacia los costados, en los cuales hay 5 paneles fotovoltaicos desde el fin lateral de la cubierta hasta el final del pasillo. Por la banda de estribor, el corredor transcurre longitudinalmente entre dos grupos de 5 módulos fotovoltaicos a cada lado.

El siguiente esquema, superpuesto a la figura 4.3.2.1, permite observar en amarillo la disposición de los nuevos corredores de acceso a los paneles fotovoltaicos para su eventual mantenimiento.

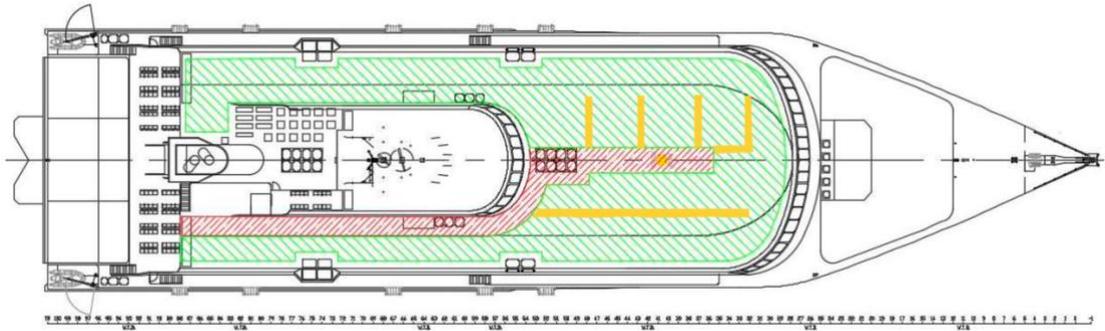


Figura 5.1.5.1. Esquema sobre los corredores de acceso a los paneles fotovoltaicos dispuestos (22) (modificada).

Previamente se había anotado que el espacio de la cubierta de observación disponible para albergar una instalación fotovoltaica, una vez descontada la superficie de la salida emergencia para una eventual evacuación aérea, es de 946 m^2 . En cambio, dicha cifra ha de ser actualizada, quitándole la superficie ocupada por los corredores dispuestos para el acceso a los paneles. Entonces, simplemente se ha de calcular el área que ocupan dichos pasillos (ecuación 5.1.5.2) y restárselos al espacio total disponible (ecuación 5.1.5.1), por lo que,

$$A_{disp} = A_{prev} - A_{corredores} \quad (5.1.5.1)$$

Donde,

A_{disp} = área final disponible

A_{prev} = área previa disponible

$A_{corredores}$ = área de los corredores dispuestos

A su vez,

$$A_{corredores} = (0,3 \cdot 4,98 \cdot 4) + (2,97 \cdot 0,3) + (0,3 \cdot 25,24) = 14,44 \text{ m}^2 \quad (5.1.5.2)$$

Por tanto, sustituyendo los valores en la ecuación 5.1.5.1,

$$A_{disp} = 946 - 14,44 = 931,56 \text{ m}^2 \quad (5.1.5.3)$$

Sobre este valor final, se aplicará un coeficiente reductor del 5%, para paliar posibles desviaciones ocasionadas a la hora de realizar los cálculos y sus aproximaciones, así como para compensar aquellos espacios disponibles, pero no prácticos ni útiles, como son aquellos con curvas o ángulos cerrados, en los cuales no es posible instalar un panel fotovoltaico dada su naturaleza rectangular. Por tanto, el área final útil para albergar la instalación es,

$$A_{útil} = A_{disp} \cdot 95\% = 931,56 \cdot 95\% = 884,98 \text{ m}^2 \quad (5.1.5.4)$$

Finalmente, para conocer el número máximo de paneles fotovoltaicos que podrán conformar la instalación, se ha de dividir el área final útil entre la

superficie ocupada por cada módulo solar, la cual se conoce a través de las especificaciones técnicas de este, por lo que,

$$N_{módulos} = \frac{A_{\text{útil}}}{A_{\text{módulo}}} \quad (5.1.5.5)$$

Donde,

$N_{módulos}$ = número de módulos instalables en la superficie útil

$A_{\text{útil}}$ = área final útil para albergar paneles fotovoltaicos

$A_{\text{módulo}}$ = área que ocupa cada uno de los módulos

Entonces, sustituyendo los valores ya conocidos en la ecuación 5.1.5.5,

$$N_{módulos} = \frac{884,98}{2,17} = 407,82 \text{ módulos} \quad (5.1.5.6)$$

Como los módulos suponen unidades indivisibles, se tomará el número exacto justamente inferior como número de módulos instalables en la superficie útil, por lo que,

$$N_{módulos} = 407 \text{ módulos instalables en la superficie útil} \quad (5.1.5.7)$$

La potencia máxima de la instalación fotovoltaica está directamente relacionada con el número de módulos fotovoltaicos que componen la instalación, siendo esta el producto entre la potencia pico que proporciona cada módulo y la cantidad de estos que conforma el campo solar, por lo que,

$$P_{inst} = P_{panel} \cdot N_{módulos} = 460 \cdot 407 = 187220 \text{ W} = 187,22 \text{ kW} \quad (5.1.5.8)$$

5.1.6. Disposición de los paneles fotovoltaicos

La disposición de los paneles fotovoltaicos es de suma importancia en términos de orientación e inclinación ya que, según estas, la producción de los módulos solares será mayor o menor. La situación ideal de estos sería que la superficie de los paneles estuviese siempre en posición perpendicular a la dirección en la que a esta le incide la radiación solar. En el caso de una instalación en tierra firme, lo correcto sería, en función de la ubicación del campo fotovoltaico, comprobar el registro histórico de la radiación solar y su ángulo de incidencia sobre esta, para adecuar la inclinación y orientación de los módulos para obtener el máximo rendimiento posible.

Sin embargo, en esta situación, este procedimiento resulta inútil puesto que, dada la naturaleza móvil de la ubicación de la instalación, es imposible realizar unos cálculos de valor permanente acorde a los cuales conocer y disponer los paneles con una orientación y ángulo de inclinación idóneos. El "Benchijigua

Express”, si bien actualmente únicamente opera en parte del archipiélago canario, es un buque sujeto a diferentes localizaciones a lo largo del año y, más importante, dependiente de las oscilaciones impresas por las olas del mar, generando los consecuentes vaivenes del barco y, por ende, del campo fotovoltaico. Así, es inútil tratar de realizar las pertinentes pesquisas en busca de la orientación e inclinación de los paneles, ya que esta variaría de la idónea así que el buque partiese de su primer atraque con la instalación a bordo.

Por tanto, el conjunto de módulos fotovoltaicos a bordo se ha dispuesto de forma uniforme, apoyado horizontalmente sobre la cubierta y sin ninguna inclinación. De esta forma se busca obtener la posición de mayor rendimiento posible a lo largo de las diferentes posiciones del buque respecto a la radiación solar ya que, con los paneles orientados hacia el cielo, nunca se da la situación de que estos reciban la energía solar por su parte posterior, sino lo opuesto, que siempre, por mínima que sea, le incida sobre la superficie generadora. Esto no sucedería si se dispusiesen los módulos fotovoltaicos con algún grado de inclinación, ya que, pese a poder darse una situación en la que el ángulo de incidencia fuese más próximo, o incluso exacto, al perpendicular, también existirían localizaciones y orientaciones en las que eventualmente se daría la ocasión en la que la incidencia solar se efectuase por la parte posterior de los paneles, con la consecuente pérdida de rendimiento y producción durante ese periodo de tiempo, el cual, por ejemplo, podría durar durante toda una travesía en la que el rumbo se mantiene fijo y los rayos solares inciden en la misma dirección de forma permanente, como en el ocaso. Además, no ha lugar realizar planteamientos sobre orientaciones al sur, norte, este u oeste; ya que la única referencia posible se tiene que tomar respecto al buque, puesto que una orientación sur, que en tierra es la ideal, dejaría de serlo según el buque se moviese y tomase un rumbo en el cual los paneles pierden dicha orientación. Lo mismo sucedería con el ángulo de inclinación, ya que se diese el que se diese, con las oscilaciones del buque fruto de la navegación y/o oleaje, esté ángulo variaría constantemente, perdiéndose el rendimiento ideal pretendido al calcular dicha inclinación.

Realizar la instalación con estas condiciones de orientación e inclinación precisa de menos elementos estructurales de anclaje y fijación, lo que repercute positivamente al simplificar el montaje, a la vez que se abaratan costes y se

reduce el peso del campo fotovoltaico, lo que disminuye el impacto de esta sobre el buque, tanto sobre el desplazamiento y consecuente energía para hacer navegar el barco, como en cuanto al efecto que el conjunto de los módulos solar pueda tener sobre la estabilidad del “Benchijigua Express”.

5.1.7. Soporte de los paneles fotovoltaicos y anclaje a la cubierta.

Las placas fotovoltaicas son elementos inmóviles en la instalación, por lo que hay que hacer uso de sistemas de fijación para poder asegurarlos en una posición y garantizar su correcto funcionamiento. En función de la condición de la superficie en la que se vaya a proceder a la montar el campo fotovoltaico, existen diferentes tipos y configuraciones estructurales. Es un muy importante dotar a la instalación de un sistema de fijación adecuado a las particularidades de cada caso, ya que, aplicado a la naturaleza de un buque, los elementos estructurales han de estar lo suficientemente dimensionados para soportar las fuerzas originadas por el peso de los módulos y de las derivadas de este fruto de los movimientos y oscilaciones propias de un barco en el mar. Además, han de estar fabricados en materiales resistentes a las adversidades marinas, de forma que no pierdan propiedades físicas en un corto y medio plazo de tiempo para poder garantizar la seguridad y la correcta y total operatividad de la instalación fotovoltaica.

En este caso, al ser una instalación en una superficie plana y sin ningún tipo de inclinación, ni por parte de la cubierta ni de los paneles, el soporte de los módulos fotovoltaicos será el más simple de todos. Tras una revisión de las oportunidades que ofrece el mercado, la solución elegida para el soporte de la instalación fotovoltaica es el perfil “C40” de la casa “Aplitech”.

Esta estructura se conforma de dos vigas de metal con perfil con diseño de raíl, sobre el cual se fijan directamente los paneles fotovoltaicos por su parte posterior. A su vez, estos perfiles son sujetados a la cubierta mediante unos tornillos, los cuales varían en función del material a perforar. Finalmente, se precisan de unos accesorios, mínimos pero imprescindibles, ya que, pese a su escaso tamaño, conforman una serie de piezas en Z y pletinas necesarias para intercalar los paneles, así como para delimitar el final de una hilera y que no se salgan los paneles de soporte (49). La siguiente figura muestra el esquema de la configuración obtenida mediante el uso de este tipo de soporte.

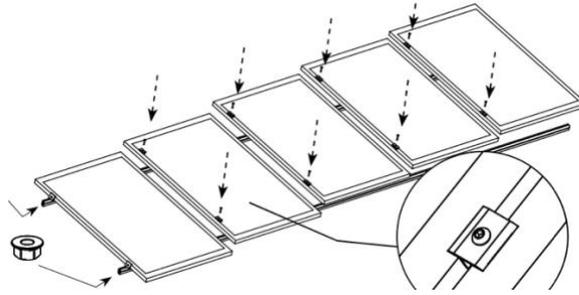


Figura 5.1.7.1. Configuración de los paneles fotovoltaicos según el soporte con perfil C40 (50).

Este tipo de estructura destaca por su sencillez, ya que con dos perfiles y unos mínimos accesorios se puede conformar una fila de la matriz fotovoltaica. Gracias a este aspecto, se reducen altamente los elementos necesarios en comparación con otras estructuras, por lo que se reducen costes de instalación y peso, factor muy importante al tener en cuenta que el campo fotovoltaico está situado en un buque. Además, supone una fijación mínimamente invasiva, únicamente precisando perforar en ocho puntos por cada dos perfiles “C40”.

Los perfiles “C40” están constituidos en aluminio anodizado, material de buenas prestaciones mecánicas y físicas, entre las que destacan su aislamiento eléctrico, propiedad positiva para evitar posibles derivaciones a tierra de la corriente generada por los paneles fotovoltaicos, su resistencia contra la corrosión y los factores climáticos, aspecto importante al valorar el entorno adverso en el que opera un buque, y su protección mecánica contra el desgaste del tiempo (51), factor menos común pero de gran valor, ya que, una buena conservación de sus propiedades físicas y mecánicas durante un largo período de tiempo genera una reducción de trabajos de mantenimiento y un aumento de la fiabilidad de la estructura incluso a largo plazo, lo que redundará en una mayor tasa de amortización.

Los perfiles “C40” tienen una longitud de 3 metros y, por tanto, una capacidad de 3 paneles por cada grupo de un par de perfiles paralelos. Por tanto, el número de perfiles a necesitar es,

$$N_{grup} = \frac{N_{módulos}}{3} \quad (5.1.7.1)$$

Donde,

N_{grup} = número de grupos de módulos fotovoltaicos a necesitar

$N_{módulos}$ = número de módulos instalables en la superficie útil

Por lo que, sustituyendo el valor conocido en la ecuación 5.1.7.1,

$$N_{grup} = \frac{407}{3} = 135,66 \Rightarrow 136 \quad (5.1.7.2)$$

A su vez, cada grupo compuesto de tres módulos fotovoltaicos precisa de dos perfiles “C40” para realizar la sujeción de los paneles por 4 puntos, por lo que,

$$N_{C40} = N_{grup} \cdot 2 \quad (5.1.7.3)$$

Donde,

N_{C40} = número de perfiles “C40” a necesitar

N_{grup} = número de grupos de módulos fotovoltaicos a necesitar

Entonces,

$$N_{C40} = 136 \cdot 2 = 272 \quad (5.1.7.4)$$

Además de los perfiles “C40”, para completar el soporte, se precisan de elementos auxiliares menores de fijación, como tornillos, pletinas en “Z” o accesorios de unión de guías, los cuales, según datos tomados por el proveedor, son necesarios acorde a las cantidades y precios mostrados en la siguiente tabla (50).

Elemento	Cantidad	Precio (€/unidad)
Perfil C40	272	42,60
Tornillos	448	8,80
Fijación “Z” C40 módulos de 38 mm	200	1,20
Fijación “T” módulos de 38 mm	812	1,65
Accesorio unión guías 38 mm	180	6,30

Tabla 5.1.7.1. Cantidades y precios de los distintos elementos de sujeción, (elaboración propia).

5.2. Inversor.

El inversor supone un dispositivo clave en cualquier instalación fotovoltaica, ya que permite transformar la corriente continua generada por los paneles en corriente alterna con las condiciones necesarias de frecuencia y tensión.

Acorde a la instalación eléctrica ya existente en el “Benchiigua Express”, en la que el embarrado principal del cuadro de distribución en el que se vierte la corriente generada por los generadores eléctricos está a 690V, el inversor ha de ser trifásico, esto es, con una salida por parte de la corriente alterna de forma

trifásica, de forma que pueda ser conectada a dicho cuadro de distribución principal. Este aspecto reduce en cierta medida las opciones de mercado, al ser lo habitual de tipo monofásico para instalaciones domésticas de autoconsumo. Al no disponerse de un sistema acumulador de energía, el inversor, además de ser trifásico, ha de ser de conexión a red, esto es, preparado para recibir la energía del embarrado durante los periodos de no producción de los paneles, de forma que puede seguir funcionando de forma automática.

Otro criterio que debe cumplir el inversor seleccionado es garantizar su seguridad acorde a la norma "IEC 61439-2", tal y como nuevamente exige la norma "IEC 60364-7-712" a la que se remite la sociedad de clasificación "DNV GL" para instalaciones fotovoltaicas (52).

Finalmente, el inversor de corriente seleccionado entre las opciones del mercado fue el "Sirio K200" de la casa "Aros Solar". Esta elección se debe a su gran versatilidad, al proporcionar un correcto funcionamiento en un amplio rango de tensiones tanto de entrada como de salida, facilitando el posterior cálculo para la configuración del conexionado entre los módulos fotovoltaicos. Además, dispone de un regulador MPPT (Maximum Power Point Tracking), el cual regula los parámetros de trabajo del inversor en función del punto óptimo de mayor rendimiento del campo fotovoltaico, permitiendo así obtener un mayor rendimiento de la instalación (53). La siguiente tabla recoge sus especificaciones técnicas.

Especificaciones técnicas		Sirio K200
Entrada		
Tensión continua máxima en circuito abierto		800 Vcc
Rango completo de MPPT		330 – 700 Vcc
Corriente de entrada máxima		650 Acc
Tensión de umbral para el suministro a la red		390 Vcc
Número de entradas		1
Número de MPPT		1
Salida		
Tensión de ejercicio		400 Vac
Intervalo operativo		340 – 460 Vac
Intervalo de frecuencia		47,5 – 51,5

Corriente nominal	289 Aca
Corriente máxima	364 Aca
Distorsión armónica	<3 %
Conjunto	
Tipo	Trifásico de conexión a red
Rendimiento máximo	96,2 %
Rendimiento europeo	95,2 %
Consumo stand-by	<32 W
Precio	31.978,57 €

Tabla 5.2.1. Especificaciones técnicas del inversor de corriente “Sirio K200”
(54).

Pese a las ventajas de este inversor, su uso obliga a disponer de un transformador trifásico estrella triángulo a su salida, ya que la tensión de línea que este entrega es de 400 V, mientras que el embarrado está a 690 V, por lo que se precisa modificar esta para poder verterla a la instalación eléctrica del “Benchijigua Express”. Aunque en el mercado se disponen de inversores trifásicos de conexión a red con tensiones de salida que permiten los 690 V, estos son de elevado coste y presentarían una baja producción eléctrica según el campo fotovoltaico disponible en este caso, ya que estos necesitan de una alta tensión de arranque en la parte continua para funcionar correctamente y poder suministrar electricidad de corriente alterna. Teniendo en cuenta que los paneles fotovoltaicos, por motivos de su emplazamiento móvil, no disponen ni de orientación ni ángulo de inclinación, lo que les repercute negativamente en su producción, instalar un inversor con una alta tensión de arranque provocaría que gran parte de la producción eléctrica del campo fotovoltaico se desperdiciase al no tener un inversor correctamente dimensionado capaz de aprovechar la electricidad generada en situaciones de baja radiación solar o adversas, provocando una disminución del rendimiento de la instalación.

5.2.1. Conexión entre los paneles fotovoltaicos.

A través de la disposición obtenida mediante el conexionado entre los paneles se pueden obtener los parámetros de tensión e intensidad necesarios para el

correcto funcionamiento del inversor de corriente, tal y como se ha explicado anteriormente.

En este caso, la solución más adecuada es la de realizar una conexión mixta, es decir, en serie-paralelo, ya que esta es la más indicada para instalaciones de media y alta potencia, pudiendo combinar en un único inversor el alto número de paneles que conforman el campo fotovoltaico.

Los valores obtenidos de la disposición del conexionado entre los paneles deben estar dentro de los rangos de trabajo marcados por el fabricante del inversor solar. Por tanto, según las ecuaciones 5.2.1.1 y 5.2.1.2 se calculan el número máximo de paneles en serie (N_{mps}) y en paralelo (N_{mpp}), respectivamente, posibles según los parámetros de tensión máxima de trabajo (V_{ccmax}) e intensidad de corriente de entrada máxima (I_{cc}) del inversor y la tensión de cortocircuito (V_{oc}) e intensidad de cortocircuito (I_{oc}) de los paneles fotovoltaicos (55). Entonces,

$$N_{mps} = \frac{V_{ccmax}}{V_{oc}} = \frac{700}{53,02} = 13,20 \text{ paneles en serie} \quad (5.2.1.1)$$

$$N_{mpp} = \frac{I_{cc}}{I_{oc}} = \frac{650}{11,07} = 58,72 \text{ paneles en paralelo} \quad (5.2.1.2)$$

En ambos casos se toma el número entero inferior como referencia del número máximo de paneles en serie y paralelo que pueden conformar la matriz del campo fotovoltaico al mismo tiempo que se cumplen con los rangos de trabajo del inversor de corriente. Siguiendo el mismo proceso de cálculo, pero con el voltaje de entrada mínimo en lugar del máximo, se calcula el número mínimo de paneles que se pueden conectar en serie (N_{nps}),

$$N_{nps} = \frac{V_{ccmin}}{V_{oc}} = \frac{330}{53,02} = 6,22 \text{ paneles en serie} \quad (5.2.1.3)$$

En este caso se toma el entero superior, siendo por tanto 7 el número mínimo de paneles en serie a conectar para cumplir con los requisitos de trabajo del inversor de corriente. Por tanto, la matriz del campo fotovoltaico ha de tener entre 7 y 13 paneles en serie (filas) y un máximo de 58 series en paralelo (columnas). Entonces, siendo 407 el número de paneles fotovoltaicos que se pueden instalar en el "Benchijigua Express", se calculan los divisores de esta cifra, para conocer las combinaciones posibles en las que se cumplen los requisitos de filas y columnas, a la vez que se asegura que todas las series se conforman por el mismo número de paneles fotovoltaicos. Los divisores de 407

son: 1, 11, 37 y 407. Se observa que es posible realizar la combinación de 11 paneles en serie y 37 series en paralelo, cumpliendo por tanto con las restricciones de los parámetros de entrada del inversor seleccionado y obteniendo una combinación con todas las series formadas por el mismo número de paneles. Por tanto, la tensión e intensidad entregada por el campo fotovoltaico al inversor de corriente será (55),

$$V_{cf} = V_{mp} \cdot NP_{serie} = 44,20 \cdot 11 = 486,2 \text{ V} \quad (5.2.1.4)$$

$$I_{cf} = I_{mp} \cdot NP_{paralelo} = 10,41 \cdot 37 = 385,17 \text{ A} \quad (5.2.1.5)$$

Donde,

V_{cf} = tensión generada por el campo fotovoltaico

I_{cf} = intensidad generada por el campo fotovoltaico

V_{mp} = tensión máxima del panel

I_{mp} = intensidad máxima del panel

NP_{serie} = número de paneles en serie

$NP_{paralelo}$ = número de paneles en paralelo

Los resultados de las ecuaciones 5.2.1.4 y 5.2.1.5 muestran los parámetros de tensión e intensidad máximos generados por el campo fotovoltaico. Dichos valores entran dentro de los rangos de trabajo del inversor elegido. Por tanto, la composición de la matriz resultaría como muestra el siguiente esquema.

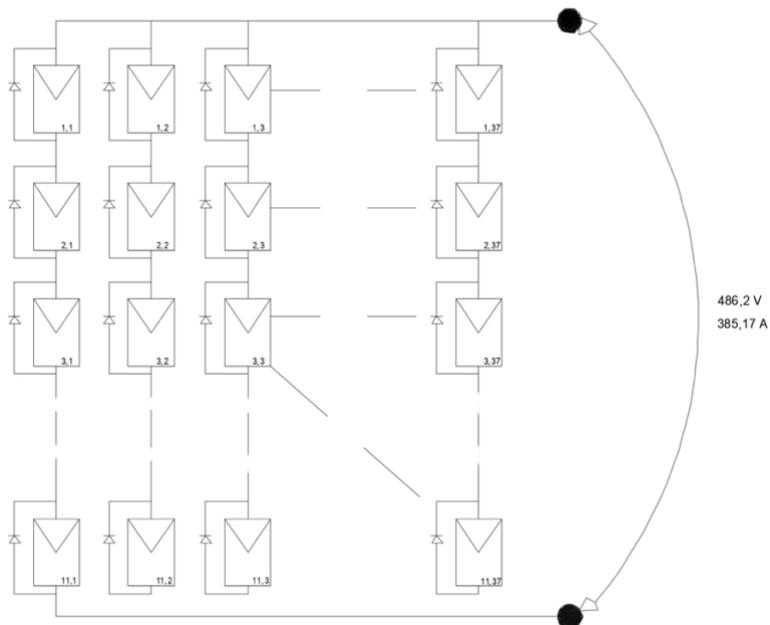


Figura 5.2.1.1. Matriz del conexionado en serie-paralelo del campo fotovoltaico, (elaboración propia).

5.2.2. Transformador trifásico.

Como consecuencia del inversor de corriente seleccionado, el cual tiene una salida de tensión de línea a 400V, es necesario disponer de un transformador trifásico de estrella – triángulo que modifique el valor esta hasta 690V, de forma que se pueda realizar la conexión de la producción fotovoltaica al embarrado del cuadro de distribución del “Benchijigua Express”. Esto se consigue mediante la eliminación del neutro a través de la conexión en triángulo, quedando solo las tres fases como salida del transformador.

Para conocer la potencia necesaria del transformador, se utilizará la definición de potencia eléctrica trifásica (5.2.2.1),

$$P_t = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos\varphi \quad (5.2.2.1)$$

Donde,

P_t = potencia del transformador (VA)

V_l = tensión de línea a la salida del inversor (400 V)

I_l = Intensidad de línea a la salida del inversor (289 A)

$\cos\varphi$ = factor de potencia a la salida del inversor (0,9)

Por tanto, sustituyendo los valores proporcionados por la ficha técnica del inversor en la ecuación 5.2.2.1, se obtiene una potencia del transformador necesario de 180,20 kVA.

El transformador seleccionado es entonces un autotransformador trifásico de la casa “Manumag”, modelo “XMN02420963”, de 200 kVA de potencia. Está diseñado para modificar la tensión de línea de 400V a 690V en corriente alterna a una frecuencia de 50 Hz y está equipado con aislamiento clase F (56).

5.3. Cableado de la instalación.

El cableado de la instalación supone un elemento vital, tanto operativamente como en el ámbito de protección. En función de las intensidades y tensiones que por él circulen se utilizarán unas u otras secciones. Los cables seleccionados han de cumplir con diferentes normativas estipuladas por la sociedad de clasificación del buque, que en el caso del “Benchijigua Express” es “DNV GL” (30). Esta compañía regula las instalaciones eléctricas de los buques, y por ende sus cableados, a través de su propia norma “DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch5”. Sin embargo, en lo relativo a las instalaciones fotovoltaicas a bordo, la norma de dicha sociedad de clasificación se remite en el apartado 1.6.1

al cumplimiento de lo estipulado en la normativa “IEC 60364-7-712” (52). Será por tanto esta última el reglamento a cumplir al seleccionar las diferentes secciones, cableados y elementos de protección de la instalación en la parte de corriente continua. Todos los apartados mencionados a continuación serán de la norma “IEC 60363-7-712”, salvo que se indique lo contrario.

Por tanto, tras la revisión de la norma mencionada, el cable seleccionado para la parte eléctrica por la que circula corriente continua es el “ZZ-F/H1Z2Z2-K” en color negro para el polo negativo y en rojo para el positivo (57). La elección de este cable se debe a su gran fiabilidad al cumplir con todos los requisitos marcados por la sociedad de clasificación “DNV GL”, entre ellos, la resistencia clase 5 acorde al estándar “IEC 60228”, su alta resistencia a las condiciones meteorológicas, destacando contra los rayos UV, haciéndolo válido para su instalación a la intemperie, estar libre de halógenos y su vida útil certificada de 30 años, asegurando la amortización de este modelo de cable. Cumple también con el requisito de permitir un rango de voltaje de trabajo igual o superior a la tensión de cortocircuito máxima del campo fotovoltaico, cumpliendo junto con lo anterior con el apartado 712.521.101.1 de la normativa IEC a aplicar. Ha sido especialmente diseñado para ser utilizado en la parte de corriente continua en instalaciones fotovoltaicas de baja tensión, siendo por tanto idónea para la instalación en el “Benchijigua Express”.

Para la parte de corriente alterna se ha elegido el “RZ1-K(AS) 0,6/1 kV” (58), que igualmente cumple con la resistencia clase 5 acorde a la “UNE 60228”, además de disponer de un rango de trabajo igual o superior a la tensión máxima que vaya a circular por él. Sin embargo, al estar dispuesto por el interior del buque, no precisa de cumplir con las resistencias a rayos UV o cualquier otra inclemencia climatológica (48), pero sí proteger frente a los incendios al estar libre de halógenos y no ser propagador de llama (58).

A continuación, se realizarán los cálculos para conocer las secciones de los cables a utilizar según estipulan diferentes puntos de la normativa. El apartado 712.31.101.1.6 establece en un máximo del 3% de la tensión de circuito abierto máxima del campo fotovoltaico la caída de voltaje permitida en cada tramo de cableado en el conjunto de la instalación. Por su parte, el anexo B.1 marca el método de cálculo de dicha tensión de circuito abierto máxima, mostrado en la ecuación 5.3.1.

$$U_{oMAX} = K_u \cdot U_{oSTC} \quad (5.3.1)$$

Donde,

U_{oMAX} = tensión de circuito abierto máxima (V)

K_u = coeficiente de corrección calculado acorde al cálculo 5.3.2

U_{oSTC} = tensión de cortocircuito del panel fotovoltaico (V)

$$K_u = 1 + (\alpha U_{oc}/100)(T_{min} - 25) \quad (5.3.2)$$

Donde,

αU_{oc} = coeficiente de variación de temperatura de la tensión de circuito abierto del módulo fotovoltaico (%/°C)

T_{min} = temperatura mínima de la ubicación de la instalación fotovoltaica (°C)

Así mismo, el B.2 estipula un coeficiente de seguridad de 1,25 a aplicar sobre la intensidad de cortocircuito de cada tramo de cableado, excepto en el tramo que une los paneles en serie, que el coeficiente de seguridad equivale a 1,35 según el apartado 712.430.3.102. La temperatura mínima de suposición de trabajo del cable será de 70 °C, acorde al apartado 712.523. Finalmente, los criterios generales a tener en cuenta al seleccionar la sección del cableado se marcan en el 712.524.1.

5.3.1. Parte de corriente continua

5.3.1.1. Tramo paneles – cajas de conexiones

En este tramo de cableado los paneles son conectados formando las cadenas que permiten elevar la tensión del campo fotovoltaico. Los paneles están equipados con cables estandarizados para conectarlos entre sí y por tanto a sus cajas de conexiones. El "JST460M" está dotado con un cable de cobre de 4 mm² y 0,2 m tanto para el positivo como para el negativo. En cambio, se ha de comprobar que no se produce una caída de tensión superior al 3% en el tramo de cable. La intensidad máxima es la de cortocircuito ($I_{cc} = 11,07$ A) y ha de sobredimensionarse un 35% acorde al apartado 712.430.3.102.

$$I_{ccmax} = 1,35 \cdot I_{cc} = 14,94 \text{ A} \quad (5.3.1.1.1)$$

Sabiendo que la caída de tensión se define según la siguiente ecuación,

$$\Delta V = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot I_{ccmax}}{S} \quad (5.3.1.1.2)$$

Donde,

ΔV = Caída de tensión (V)

$\rho = \text{Resistividad del cobre a } 70^{\circ}\text{C} = 0,0217 (\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m})$

$L = \text{Longitud del cable (m)}$. Se toman 3 metros de cable por cada serie de paneles, teniendo en cuenta los 0,2 m más un margen de maniobra en función de la distancia variable entre cada panel.

$I_{ccmax} = \text{Intensidad de cortocircuito máxima que soportará el cable} = 14,94 \text{ (A)}$.

$S = \text{Sección del cable} = 4 \text{ (mm}^2\text{)}$.

Entonces, sustituyendo los valores en la ecuación anterior, se obtiene la caída de tensión en cada serie de módulos fotovoltaicos,

$$\Delta V = 0,49 \text{ V} \quad (5.3.1.1.3)$$

El 3% de caída de tensión se calcula a partir de la suma de la tensión de circuito abierto máxima de los 11 paneles que conforman una serie. Por tanto, tomando el coeficiente de variación de temperatura de la ficha técnica del panel fotovoltaico ($\propto U_{oc} = -0,270 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$) y la temperatura mínima del emplazamiento de la instalación (se tomará la isla de Tenerife como referencia) del registro de temperaturas del INE ($T_{\min} = 17,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$) (59), y sustituyéndolos en la ecuación 5.3.2,

$$K_u = 1 + \left(-\frac{0,270}{100}\right)(17,7 - 25) = 1,019 \quad (5.3.1.1.4)$$

Por tanto, conociendo la tensión de circuito abierto de cada panel ($U_{oSTC} = 53,02 \text{ V}$) y sustituyendo el valor de K_u en la ecuación 5.3.1,

$$U_{oMAX} = 1,019 \cdot 53,02 = 54,03 \text{ V} \quad (5.3.1.1.5)$$

Entonces, la caída de tensión del 3% se referencia a la suma de las tensiones de circuito abierto de los 11 paneles (NP_{serie}), por lo que la caída máxima de tensión permitida en cada serie de paneles fotovoltaicos es,

$$3\% \cdot U_{oMAX} \cdot NP_{serie} = 3\% \cdot 54,03 \cdot 11 = 17,83 \text{ V} \quad (5.3.1.1.6)$$

Se observa que la caída de tensión calculada en la ecuación 5.3.1.1.3 es menor que el límite estipulado en la 5.3.1.1.6, por lo que la sección con la que están equipados los paneles es válida y cumple con la normativa.

5.3.1.2. Tramo caja de conexiones – combiner box

Este tramo de cableado ha de soportar la misma tensión máxima que en el tramo anterior, por lo que el valor límite calculado en la ecuación 5.3.1.1.6 es aplicable a esta parte. La intensidad de cortocircuito máxima es distinta, pese a

que en este tramo el cableado es independiente entre las distintas series de paneles, ya que el coeficiente de seguridad es 1,25. Entonces,

$$I_{ccmax} = 1,25 \cdot I_{cc} = 13,84 \text{ A} \quad (5.3.1.2.1)$$

Sin embargo, la longitud del cable puede variar, ya que se ha de conectar cada serie con su respectivo fusible en la combiner box, por lo que la sección ha de ser diferente.

Entonces, haciendo uso de la ecuación 5.3.1.1.2, pero despejando la incógnita de la sección y tomando ΔV como el valor obtenido en el cálculo 5.3.1.1.6, se obtiene la sección mínima del cable que cumple con los requisitos normativos en este tramo. Así, sustituyendo los valores ya conocidos y estimando la longitud de cable necesaria en el caso de la serie más lejana a la combiner box en 80 metros,

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot I_{ccmax}}{\Delta V} = \frac{2 \cdot 0,0217 \cdot 80 \cdot 13,84}{17,83} = 2,69 \text{ mm}^2 \quad (5.3.1.2.2)$$

Se toma por tanto el siguiente valor superior que se comercializa por parte del fabricante del cable, siendo por tanto la sección de 4 mm². Además, esta sección coincide con la del cableado propio de los módulos, de forma que se evitan cambios de secciones en las cajas de conexiones y por tanto dotar a estas con elementos de protección.

5.3.1.3. Tramo combiner box – inversor

En esta parte del cableado ya se han conectado en paralelo las 37 series que conforman la matriz fotovoltaica. Entonces, la tensión es igual, siendo aplicable la caída de tensión calculada en 5.3.1.1.6. En cambio, la intensidad máxima del campo fotovoltaico ($I_{ccmaxcf}$) es la suma de la intensidad máxima de cortocircuito (I_{ccmax}), calculada en la mención 5.3.1.2.1, de las 37 series ($NP_{paralelo}$) que componen el campo fotovoltaico, por lo que,

$$I_{ccmaxcf} = NP_{paralelo} \cdot I_{ccmax} = 37 \cdot 13,84 = 512,08 \text{ A} \quad (5.3.1.3.1)$$

Entonces, estimando una longitud de cable entre la combiner box y el inversor de 300 metros, asumiendo la intensidad máxima de cortocircuito como la calculada en 5.3.1.3.1 y, sustituyendo los valores ya conocidos en la ecuación 5.3.1.2.2 nuevamente,

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot I_{ccmax}}{\Delta V} = \frac{2 \cdot 0,0217 \cdot 300 \cdot 512,08}{17,83} = 373,94 \text{ mm}^2 \quad (5.3.1.3.2)$$

Por tanto, la sección elegida es la siguiente superior, es decir, 400 mm². Esta es una dimensión grande en comparación con la mayoría de los cables utilizados en las instalaciones fotovoltaicas domésticas y de tamaño reducido, por lo que solo se tiene acceso a su precio a través de encargos por parte de una empresa o compañía y realizando un estudio a medida. Así, el precio mostrado posteriormente será una estimación realizada en base a otros cables de similares prestaciones cuyos precios sí están disponibles al público general.

5.3.2. Parte de corriente alterna

A partir de la salida del inversor, la corriente es de tipo alterna. Debido a esto, la norma "IEC 60363-7-712" ya no es de aplicación a partir de este punto, ya que esta solo regula la parte de corriente continua que concierne a una instalación fotovoltaica. Por tanto, es de aplicación en los tramos siguientes correspondientes a corriente alterna la norma "DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch5", propia de la sociedad de clasificación del buque. Los apartados citados a continuación pertenecen a dicha normativa.

La caída de tensión permitida sigue siendo el 3% en cada tramo, al igual que en la parte de corriente continua. A su vez, la intensidad máxima de cortocircuito se ha de sobredimensionar un 25% por motivos de seguridad. En cambio, la sección del cableado se calcula a través de la tabla 6 dispuesta en la sección 10.7.1 (52). Dicha tabla se muestra a continuación y en ella se disponen una serie de intensidades, las cuales, en función del número de conductores, se enfrentan a los pertinentes valores de seguridad de las secciones del cableado. Por tanto, se ha de realizar el cálculo 5.3.1.2.2 de la misma forma, pero con los valores de caída de tensión e intensidad acorde a los valores de salida del inversor. La siguiente tabla muestra los valores de intensidad permitidos según diferentes secciones y número de conductores.

Nominal cross-section [mm ²]	Current rating [A] (Based on ambient temperature 45°C)		
	Single-core	2-core	3 or 4-core
1	18	15	13
1.5	23	20	16
2.5	30	26	21
4	40	34	28
6	52	44	36
10	72	61	50
16	96	82	67
25	127	108	89
35	157	133	110
50	196	167	137
70	242	206	169
95	293	249	205
120	339	288	237
150	389	331	272
185	444	377	311
240	522	444	365
300	601	511	421

Tabla 5.3.2.1. Clasificación de cables con conductores de cobre y clase de temperatura 90 °C (52).

5.3.2.1. Tramo inversor – transformador

En esta parte del cableado, las intensidades y tensiones que circulan por el cableado son distintas a las anteriores, pues se aplican los valores de salida estipulados en la ficha técnica del inversor. Acorde esta, la tensión de salida son 400 V ($U_{si} = 400$ V) y la intensidad 289 A ($I_{si} = 289$ A). Primero se aplica el factor de corrección a la intensidad, por lo que,

$$I_{siMAX} = I_{si} \cdot 1,25 = 289 \cdot 1,25 = 361,25 \text{ A} \quad (5.3.2.1.1)$$

Suponiendo una longitud de cable entre el inversor y el transformador de 10 metros, y conociendo la resistividad del cobre a 90 °C ($\rho = 1/45,49 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$), se sustituyen los valores en la ecuación 5.3.1.2.2,

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot I_{siMAX}}{\Delta V} = \frac{2 \cdot 0,0219 \cdot 10 \cdot 361,25}{3\% \cdot 400} = 13,24 \text{ mm}^2 \quad (5.3.2.1.2)$$

El siguiente valor superior referenciado en la tabla es el de 16 mm², sin embargo, el cable es de un solo conductor y por tanto solo soporta 96 A como corriente máxima. Entonces, el cable seleccionado debe ser de 150 mm² para cumplir con el criterio de intensidad máxima permitida en cables de cobre de un solo conductor.

5.3.2.2. Tramo transformador – cuadro de distribución

En este tramo se ha de realizar el mismo cálculo anterior, pero con la tensión e intensidad de salida del transformador. Conocemos la tensión de salida ($U_{str} =$

0,690 kV), pero se ha de calcular la intensidad. Para ello se utilizará la ecuación 5.2.2.1, pero despejando la incógnita de la intensidad y cambiando el valor de la tensión por el de la salida del transformador. La potencia del transformador es conocida ($P_t = 200$ kVA) y el factor de potencia es constante ($\cos\varphi = 0,9$). Entonces,

$$I_l = \frac{P_t}{\sqrt{3} \cdot V_l \cdot \cos\varphi} = \frac{200}{\sqrt{3} \cdot 0,690 \cdot 0,9} = 185,94 \text{ A} \quad (5.3.2.2.1)$$

Ahora se le ha de aplicar el factor de sobredimensionamiento a la intensidad obtenida,

$$I_{strMAX} = I_l \cdot 1,25 = 185,94 \cdot 1,25 = 232,43 \text{ A} \quad (5.3.2.2.2)$$

Finalmente, se realiza el mismo cálculo que en la ecuación 5.3.2.1.2, pero con los nuevos valores de tensión ($U_{str} = 690$ V), intensidad ($I_{strMAX} = 185,94$), longitud de cable supuesta en 50 metros y misma resistividad del cobre a 90°C.

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot I_{strMAX}}{\Delta V} = \frac{2 \cdot 0,0219 \cdot 50 \cdot 185,94}{3\% \cdot 690} = 19,67 \text{ mm}^2 \quad (5.3.2.2.3)$$

Por tanto, el valor de sección superior es el de 25 mm². Sin embargo, para cumplir con el criterio de intensidad máxima admisible en cables de cobre de un solo conductor, se busca el siguiente valor superior de sección que permita un valor de corriente superior al calculado en 5.3.2.2.2. Por tanto, el valor de sección finalmente seleccionado es de 70 mm².

5.3.3. Resumen del cableado seleccionado en cada tramo

En la siguiente figura se muestra un esquema de la instalación fotovoltaica con sus diferentes componentes y los modelos y sus respectivas secciones de cable seleccionados en cada tramo.

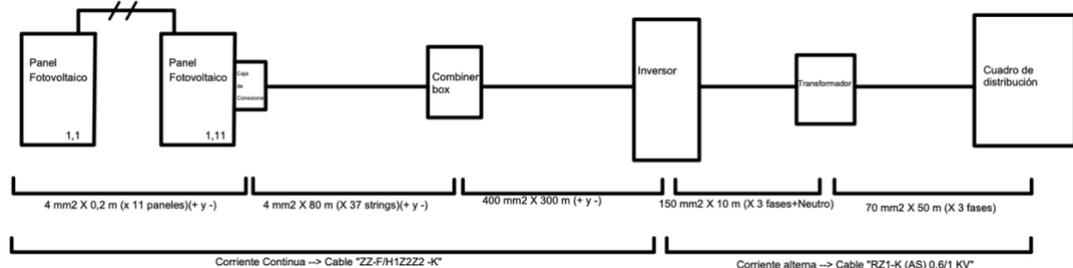


Figura 5.3.3.1. Esquema del cableado en la instalación fotovoltaica, (elaboración propia).

5.4. Elementos de protección de la instalación eléctrica.

La norma "IEC 60363-7-712" a la que se remite la normativa de DNV GL estipula en los apartados 712.433 y 712.434 que se debe disponer de elementos de protección contra las sobrecorrientes y los cortocircuitos. En cuanto a la toma

a tierra de los paneles y sus estructuras, establece una serie de recomendaciones, pero no de obligado cumplimiento. Por una parte, están los elementos de protección correspondientes a la parte de corriente continua y por otra, los correspondiente a la de corriente alterna. Los apartados mencionados a continuación corresponden nuevamente con la norma "IEC 60363-7-712", salvo que se indique lo contrario.

5.4.1. Elementos de protección en la parte de corriente continua

En el cableado de corriente continua, es decir, desde la salida a los paneles hasta la entrada del inversor, es preciso contar con elementos de protección contra las sobreintensidades, acorde al apartado 712.430.3.102, y un seccionador de corriente, según el punto 712.536.2.103. Por tanto, se exigen fusibles con una capacidad superior a 1,25 del valor la corriente de cortocircuito máxima y menor a 2,4 veces esta (apartado 712.433.1.101.4) y el mencionado seccionador de corriente del campo fotovoltaico.

Ambos elementos pueden ser equipados en la combiner box (712.433.2.101), elemento al cual llega el cableado de cada serie de paneles de forma independiente. Dicho cableado es conectado a un fusible por cada serie de módulos, proporcionado así la protección contra sobreintensidades requerida en la normativa de forma que cada serie de paneles está independientemente protegida del resto. En la parte de salida de la combiner box, una vez la conexión en paralelo ha sido realizada, la corriente de salida pasa a través de un seccionador de corriente, cumpliendo así con el otro requisito.

La combiner box ha de estar fabricada acorde al estándar "IEC 61439-2" y disponer de una protección a exposición exterior grado IP 44 o superior, mientras que los fusibles de su interior deben cumplir con la normativa "IEC 60269-6". Así mismo, este dispositivo se debe disponer en una ubicación no lejana al campo fotovoltaico y de fácil acceso para posibles labores de mantenimiento, según el apartado 712.513.101. Por este motivo, su ubicación será en la cubierta de observación, fijada a la pared de la parte central delantera del cerramiento de dicha cubierta. Esta ubicación está dentro del espacio dispuesto para la evacuación de emergencia, por lo que es de fácil acceso y cercana a la matriz fotovoltaica.

La combiner box seleccionada es la "SCCB-52" de la casa "SMA". Las combiner box habituales son hasta 32 inputs como máximo, por lo que solo aceptan la gestión de 32 series de paneles. En cambio, se pueden fabricar de hasta 72 entradas, pero bajo previa solicitud por parte de una compañía profesional para realizar un estudio técnico y económico del dispositivo y su posterior encargo a medida. Por tanto, la selección es la mencionada anteriormente con 52 entradas, pero no se disponen de las especificaciones técnicas por lo previamente mencionado. En caso de solicitar dicho elemento, se haría teniendo en cuenta los baremos de protección del fusible y el seccionado de corriente previamente especificados. El precio dispuesto de 1284,22€ es una estimación realizada en función a varios modelos disponibles en el mercado. El motivo de seleccionar una combiner box con más entradas que series tiene el campo fotovoltaico se debe a que se recomienda dejar un 30% de espacio libre dentro de esta para facilitar el cableado, mantenimiento y garantizar seguridad.

5.4.2. Elementos de protección en la parte de corriente alterna

En esta parte de la instalación se deben disponer igualmente protecciones contra las sobreintensidades y el cortocircuito, así como contra las derivaciones, en aras de proteger principalmente a los trabajadores. Para tal fin se dispondrán interruptores diferenciales y disyuntores magnetotérmicos en la conexión al cuadro principal de distribución (712.434.101). En la entrada del transformador se dispondrá de un controlador de temperatura contra la sobreintensidad y un interruptor magnetotérmico contra el cortocircuito, según el apartado 7.2.5 de la normativa propia de "DNV GL" (52).

El inversor dispone de sus propios elementos de seguridad tanto a la entrada como a la salida.

Por tanto, hay que dotar a la instalación de dos magnetotérmicos, un diferencial y un controlador de la temperatura, todos estos en función de las diferentes intensidades y tensiones que por ellos circulan, así como del tiempo de reacción del que disponen.

En el caso particular del embarrado del "Benchijigua Express", este está dividido en dos a través de un interruptor, por lo que se ha de realizar una conexión al cuadro de distribución principal por ambas partes del embarrado, de forma que pese a estar abierto dicho interruptor, los diferentes consumidores pueden

obtener energía de la instalación fotovoltaica. Para esto se duplicará la conexión, precisando de otro disyuntor magnetotérmico y otro interruptor diferencial.

Los cálculos para determinar las necesidades exactas de cada elemento de protección no son el objeto principal de este trabajo, por lo que simplemente se menciona su requerimiento acorde a la normativa y se realizará una estimación del precio a la hora de valorar el aspecto económico de la instalación.

5.5. Impacto del peso de la instalación en la estabilidad del “Benchijigua Express”.

La instalación fotovoltaica dimensionada en los apartados anteriores cumple con diversos requisitos técnicos y energéticos. Sin embargo, la naturaleza de su ubicación exige tener en cuenta el sumatorio de los pesos de los elementos que la conforman y precisar como este afecta sobre la estabilidad del “Benchijigua Express”, ya que, de no cumplir con los criterios sobre estabilidad establecidos por la OMI (60), el buque quedaría inhabilitado, ocasionando la inviabilidad del proyecto.

Dicha regulación sobre la estabilidad marcada por la OMI atiende a diferentes criterios en función de la altura metacéntrica, estabilidad estática, estabilidad estática y dinámica, estabilidad estática y de la acción del viento y periodo y amplitud del balance. En cada uno de estos criterios se establecen una serie de condiciones mínimas que todo buque ha de cumplir para ser seguro en cuanto a estabilidad. Para poder realizar los pertinentes cálculos se necesita de una serie de datos específicos y propios de cada buque proporcionados por el astillero al entregar la embarcación, haciendo imposible en este caso conocer exactamente la afectación del peso añadido por la instalación a las condiciones de estabilidad del “Benchijigua Express”, ya que dichos datos no son públicos. Pese a estas limitaciones, se calculará de manera aproximada como afecta el peso añadido sobre la estabilidad estática transversal, precisando la nueva posición vertical del centro de gravedad (CG), ya que la diferencia de altura entre el metacentro y este (denominada altura metacéntrica) supone el principal criterio OMI a cumplir y la referencia para estipular si la estabilidad de un buque es positiva, nula o negativa. Dicha normativa estipula que esta ha de ser mayor de 0,15 metros (60), esto es, que el centro de gravedad no debe estar a menos

de 0,15 metros en sentido descendente sobre la vertical del metacentro, garantizando una estabilidad positiva. El centro de gravedad se moverá en la dirección y sentido del centro de gravedad de la masa añadida, esto es, en sentido ascendente, ya que la instalación se ubica en la cubierta de observación. Primeramente, se ha de estipular la masa añadida que supone la instalación. Teniendo en cuenta donde se sitúa el grueso de esta (cubierta de observación) y que, únicamente parte del cableado, el inversor y el transformador están situados en la sala de máquinas, zona inferior del buque, que en vez de elevar reducirían la altura del centro de gravedad, se calculará el peso de la instalación realizando el sumatorio de masas de los elementos dispuestos en la cubierta, excluyendo aquellos localizados en la sala de máquinas. En la siguiente tabla se recogen las diferentes masas y su suma. Los datos han sido obtenidos de las correspondientes fichas técnicas (46,57,61,62).

Elemento	Masa [kg]	Cantidad	Masa final [kg]
Panel fotovoltaico	25	407	10.175
Soporte "C40"	2,01	272	546,72
Cableado 4 mm ²	57 /km	2,960 km	168,72
Combiner box	31,75	1	31,75
Total			10.922,19

Tabla 5.5.1. Masas de los elementos de la instalación fotovoltaica situados en la cubierta, (elaboración propia).

La masa añadida por tanto al buque corresponde a 10,992 toneladas, las cuales tienen referenciado un centro de gravedad que se puede estimar, en función de la localización de la cubierta de observación con respecto a la quilla, la popa y la línea de crujía respectivamente, en 18,1 m (VCG'), 79,8 m (LCG') y 0 (TCG'). El VCG hace referencia a la coordenada en el eje vertical del centro de gravedad de la instalación, el LCG a la coordenada en el eje longitudinal y el TCG en el eje transversal. Este último se toma 0 al asumir como simétrica la distribución de los paneles fotovoltaicos respecto a la línea de crujía.

Por otra parte, los datos del centro de gravedad y el metacentro del "Benchijigua Express" en su estado previo a la instalación son obtenidos y asumidos como válidos de un apartado sobre estabilidad contenido en un trabajo académico dedicado al "Benchijigua Express" (22), siendo estos, en sus coordenadas verticales: VM = 13,06 metros y VCG = 7,04 metros.

El metacentro permanece invariable pese al incremento de desplazamiento del buque. Sin embargo, el centro de gravedad sí que se desplaza como se ha anotado antes. Por tanto, para calcular la nueva altura metacéntrica (GM) se tiene que conocer la nueva coordenada vertical del buque y restársela a la del metacentro. El desplazamiento realizado por dicha coordenada vertical se rige por la siguiente fórmula (63),

$$GG'' = m * \frac{VCG' - VCG}{\Delta'} \quad (5.5.1)$$

Donde,

GG' = el desplazamiento vertical del centro de gravedad del buque [m]

m = la masa añadida al buque [t]

VCG = la altura inicial del centro de gravedad del buque [m]

VCG' = la altura del centro de gravedad de la masa añadida [m]

Δ' e= el desplazamiento con la masa de la instalación añadida [t]

Conociendo que el desplazamiento máximo del “Benchijigua Express” es de 2.509 toneladas máximas (41), se sustituyen los datos en la fórmula 5.5.1,

$$GG'' = 10,992 * \frac{18,1 - 7,04}{2509 + 10,992} = 0,048 \text{ m} \quad (5.5.2)$$

Por tanto, al añadir este incremento de altura a la coordenada vertical inicial del centro de gravedad del buque (VCG) se obtiene su posición final en el eje (VCG''),

$$VCG'' = VCG + GG'' = 7,04 + 0,048 = 7,088 \text{ m} \quad (5.5.3)$$

Finalmente, solo queda comprobar que se cumple el criterio OMI de altura metacéntrica, que estipulaba que esta no puede ser inferior a 0,15 metros.

$$GM = VM - VCG'' = 13,06 - 7,088 = 5,972 \text{ m} > 0,15 \text{ m} \quad (5.5.4)$$

Se observa como la altura metacéntrica es ampliamente superior al límite establecido por la OMI. Este parámetro está estrechamente relacionado con la forma de actuación del brazo adrizante ante diferentes grados de escoras y, por tanto, la reacción del buque ante fuerzas externas como olas o viento transversal. Pese a precisarse del cálculo de muchos otros parámetros y el cumplimiento de más criterios de estabilidad, el hecho de cumplir este de forma amplia hace vislumbrar que a priori, a expensas de un estudio más profundo y preciso, la masa añadida con la instalación fotovoltaica no compromete la estabilidad del buque.

Así mismo, se asume que la cubierta de observación es capaz de soportar el peso del campo fotovoltaico sobre su estructura sin amenazar su integridad.

6. CÁLCULO DE LA ENERGÍA PRODUCIDA POR LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

En este apartado se procederá a cuantificar la energía eléctrica producida mediante la instalación fotovoltaica a bordo del “Benchijigua Express”. Para tal fin, se tendrá en cuenta la ubicación de la instalación, la potencia que puede entregar el campo fotovoltaico, las posibles pérdidas ocasionadas y el tipo de paneles fotovoltaicos e instalación.

Para poder realizar dichos cálculos, se hará uso de la herramienta “PVGIS” (Photovoltaic Geographical Information System), proporcionada por el “EU Science Hub” de la Comisión Europea. Esta herramienta de uso público y gratuito permite calcular la radiación que incide en una ubicación concreta y, por tanto, la energía eléctrica producida por los paneles fotovoltaicos, mostrando dichos resultados en una serie de gráficas interactivas. Primeramente, se han de introducir una serie de datos, como el tipo de panel e instalación, la ubicación concreta, la potencia en Watios pico de la instalación, la orientación e inclinación de los paneles y las pérdidas de la instalación. En función de estos parámetros y haciendo uso de su base de datos proporcionada por los diferentes satélites comunitarios, muestra de forma numérica y gráfica los valores de energía producida en el cómputo anual y su desglose mensual. Del mismo modo muestra los datos referentes a la incidencia de radiación, de los cuales dependen los resultados de producción energética de forma directa (64).

En cuanto a la ubicación sobre la cual calcular la radiación y la consecuente producción, esta debía ser acotada a la zona en la que el “Benchijigua Express” realiza sus rutas. En cambio, el programa “PVGIS” no permite acotar zonas, sino que solo posibilita introducir la ubicación de un punto exacto y concreto. Dada la condición móvil del buque y sabiendo que la radiación varía en cierta medida entre las diferentes zonas en las que opera el buque, el cálculo de dicha energía se intentó realizar tomando como referencia un punto intermedio entre las tres islas en las que opera. Sin embargo, el programa no dispone de bases de datos sobre la radiación en puntos situados en medio del mar. Por tanto, se calculará la radiación y producción energética en los tres puertos que une el

“Benchijigua Express” con sus travesías: el puerto de Los Cristianos (Sta. Cruz de Tenerife), el de Santa Cruz de la Palma y el de San Sebastián de la Gomera. Posteriormente se realizará una media aritmética entre dichas tres ubicaciones, tomando como valor final el resultado del cálculo estadístico.

Sobre los parámetros de entrada del “PVGIS”, la instalación, pese a parecer aislada, se toma como conexión a red al verter la energía a un sistema previo de distribución eléctrica y respaldado por otros métodos productivos. La ubicación será la de cada uno de los tres puertos, mientras que los paneles (tecnología FV) son de silicio cristalino, como se explicó en su respectivo apartado. La potencia de la instalación se corresponde al cálculo 5.1.5.8, equivalente a 187,22 kW. El ángulo de inclinación y orientación, por los motivos previamente explicados, es de 0° sobre la horizontal y 0° azimutales.

En el apartado de pérdidas del sistema, facilitado en porcentaje, el programa estima de forma general un 14% de pérdidas en el conjunto de la instalación. Para valorar las pérdidas se tienen en cuenta distintos aspectos como son las eficiencias de los diferentes componentes de la instalación, la desviación de la inclinación y orientación respecto del punto óptimo de incidencia, los sombreados, la disminución de rendimiento de los paneles bajo los efectos de la suciedad en su superficie y/o la variación de temperatura de las células fotovoltaicas, etc. En este caso, a diferencia de la situación ideal en la cual se estima el 14% de pérdidas, estas se elevarán hasta una estimación del 17%, es decir, un 3% más derivado de los sombreados parciales y de la posible suciedad y salitre acumulada sobre los paneles fotovoltaicos. Las pérdidas por influencia de temperatura, baja irradiancia y desviación de los ángulos óptimos son calculadas y añadidas por el programa al valor previamente introducido.

6.1. Cálculo de producción energética en el puerto de Los Cristianos (Sta. Cruz de Tenerife)

En esta ubicación se han obtenido los siguientes datos por parte de la aplicación “PVGIS”.



Figura 6.1.1. Ubicación sobre la que se realiza el cálculo en el puerto de Los Cristianos, Sta. Cruz de Tenerife (64).



Figura 6.1.2. Datos introducidos en el programa de cálculo PVGIS (izquierda), y resultados obtenidos de este (derecha) (64).

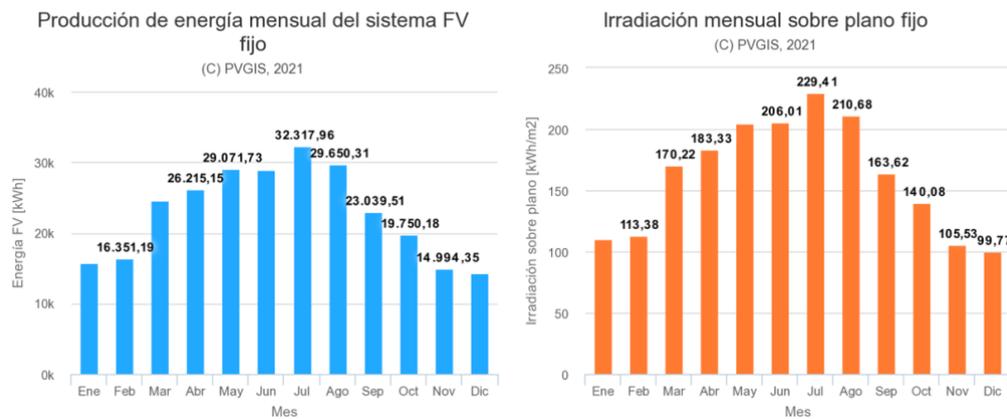


Figura 6.1.3. Gráfica con la producción energética mensual (izquierda), y con la irradiación mensual sobre plano fijo (derecha) (64).

6.2. Cálculo de producción energética en el puerto de San Sebastián de la Gomera.

En esta ubicación se han obtenido los siguientes datos por parte de la aplicación “PVGIS”.

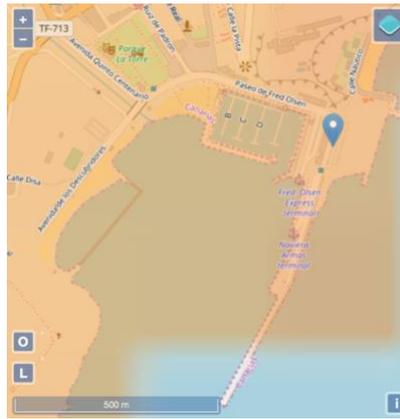


Figura 6.2.1. Ubicación sobre la que se realiza el cálculo en el puerto de San Sebastián de la Gomera (64).

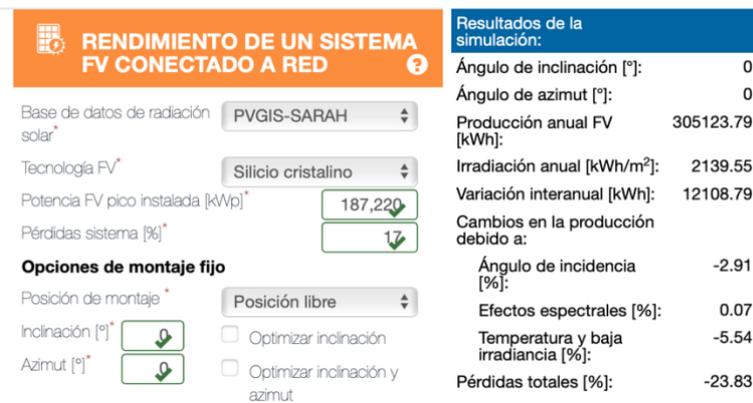


Figura 6.2.2. Datos introducidos en el programa de cálculo PVGIS (izquierda), y resultados obtenidos de este (derecha) (64).

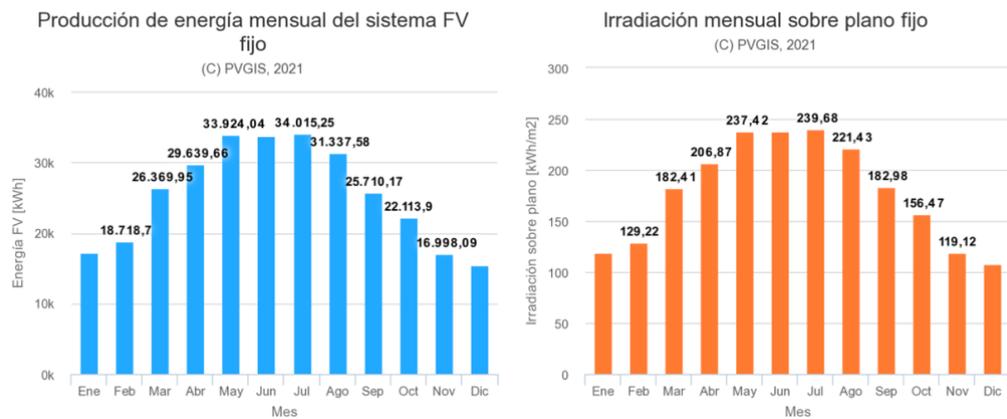


Figura 6.2.3. Gráfica con la producción energética mensual (izquierda), y con la irradiación mensual sobre plano fijo (derecha) (64).

6.3. Cálculo de producción energética en el puerto de Santa Cruz de la Palma.

En esta ubicación se han obtenido los siguientes datos por parte de la aplicación “PVGIS”.



Figura 6.3.1. Ubicación sobre la que se realiza el cálculo en el puerto de Sta. Cruz de la Palma (64).



Figura 6.3.2. Datos introducidos en el programa de cálculo PVGIS (izquierda), y resultados obtenidos de este (derecha) (64).

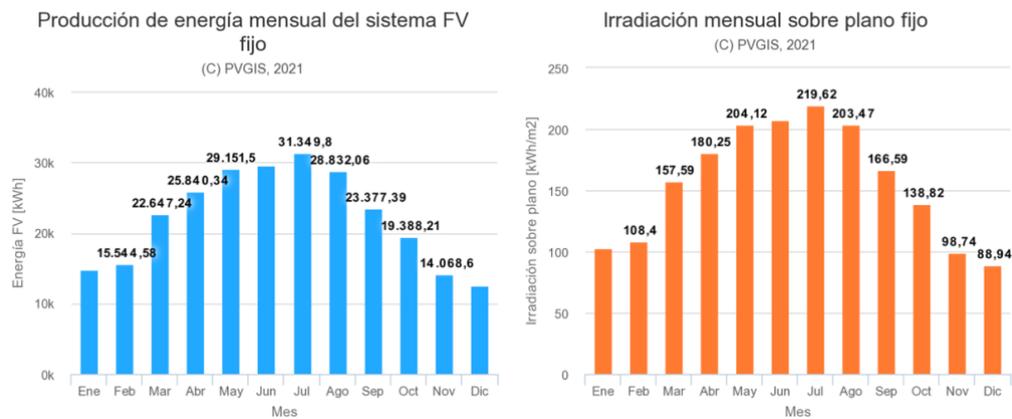


Figura 6.3.3. Gráfica con la producción energética mensual (izquierda), y con la irradiación mensual sobre plano fijo (derecha) (64).

6.4. Cálculo total de la energía producida por la instalación fotovoltaica.

Para realizar el cálculo total de la energía producida durante el año y de forma mensual por parte de la instalación fotovoltaica, se recogieron los datos anteriores relativos a las producciones, pérdidas e irradiancias en una hoja de

Excel, realizándose medias aritméticas con los diferentes parámetros. A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

Parámetros		Los Cristianos	San Sebastián de la Gomera	Sta. Cruz de la Palma	Valor Medio
	Producción anual FV [kWh]	274944,45	305123,79	266995,87	282354,70
	Irradiación anual [kWh/m ²]	1936,37	2139,55	1876,96	1984,29
	Variación interanual [kWh]	3880,21	12108,79	7558,96	7849,32
Tipos de pérdidas	Ángulo de incidencia [%]	-3,14	-2,91	-2,95	-3,00
	Efectos espectrales [%]	0,14	0,07	0,15	0,12
	Temperatura y baja irradiancia [%]	-5,79	-5,54	-5,81	-5,71
	Pérdidas totales [%]	-24,16	-23,83	-24,02	-24,00

Tabla 6.4.1. Resultados energéticos obtenidos de la media aritmética de los tres puertos de referencia, (elaboración propia).

La irradiación media anual es de 1984,29 kWh/m², la cual es transformada mediante las placas fotovoltaicas en 282,354 MWh. Este es el valor de producción total anual que se prevé que entregue la instalación fotovoltaica y que, por tanto, no tengan que ser generados a través de grupos electrógenos que consumen diésel. En cuanto a las pérdidas, se calcula que el conjunto de la instalación verá reducida su producción por un 24% de pérdidas, debidas a las diversas causas mencionadas en los apartados anteriores. Destaca que se produzcan más pérdidas (casi el doble) a causa de la influencia de la temperatura, ya que la irradiancia tiene valores altos en esta región, que por culpa de la desviación de los paneles respecto de los ángulos de incidencia y orientación según los cuales los rayos solares inciden de forma perpendicular a la superficie del módulo fotovoltaico. Resaltar que el valor de la producción energética anual mostrado ya está calculado con las pérdidas aplicadas, por lo que se puede tomar como resultado final.

El rendimiento de la instalación fotovoltaica en conjunto (η_{inst}) se corresponde con la división entre la producción energética ($E_{fvaño}$) que entrega la instalación y el producto entre el rendimiento del panel fotovoltaico (η_{panel}), la superficie del campo solar (S_{cfv}) y la radiación anual que este recibe (Rad_{anual}), por lo que,

$$\eta_{inst} = \frac{E_{fvaño}}{\eta_{panel} \cdot S_{cfv} \cdot Rad_{anual}} = \frac{282354,7 [kWh]}{0,212 \cdot 884,98 [m^2] \cdot 1984,29 [\frac{kWh}{m^2}]} \cdot 100 = 75,84\% \quad (6.4.1)$$

El rendimiento obtenido se considera un valor óptimo y resaltable dadas las condiciones no idóneas en las que trabaja la instalación, relatadas previamente

y las cuales, en caso de ser modificadas a su valor óptimo, aumentarían aún más el rendimiento total.

Las siguientes gráficas muestran el desglose medio mensual de la producción energética y de la radiación solar que incide sobre la instalación fotovoltaica.

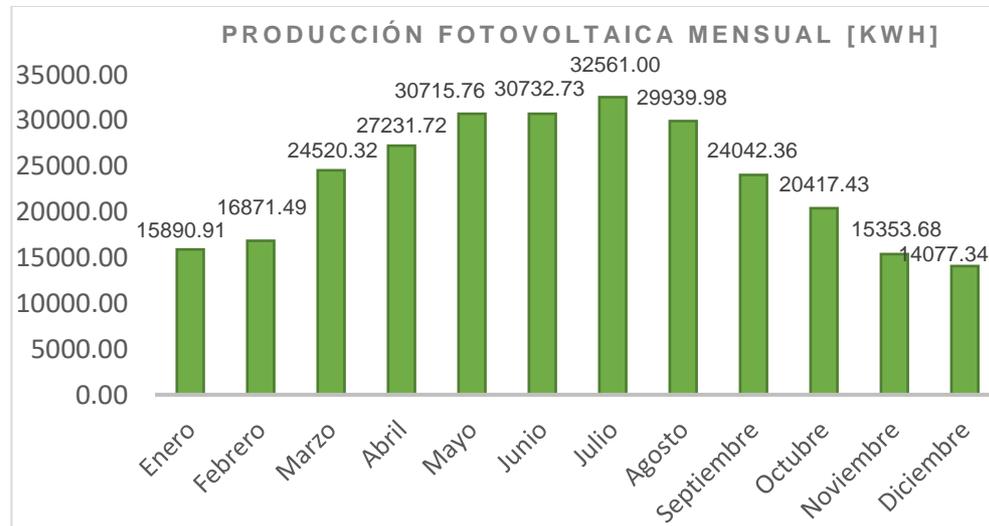


Figura 6.4.1. Gráfica de la producción fotovoltaica mensual, (elaboración propia).

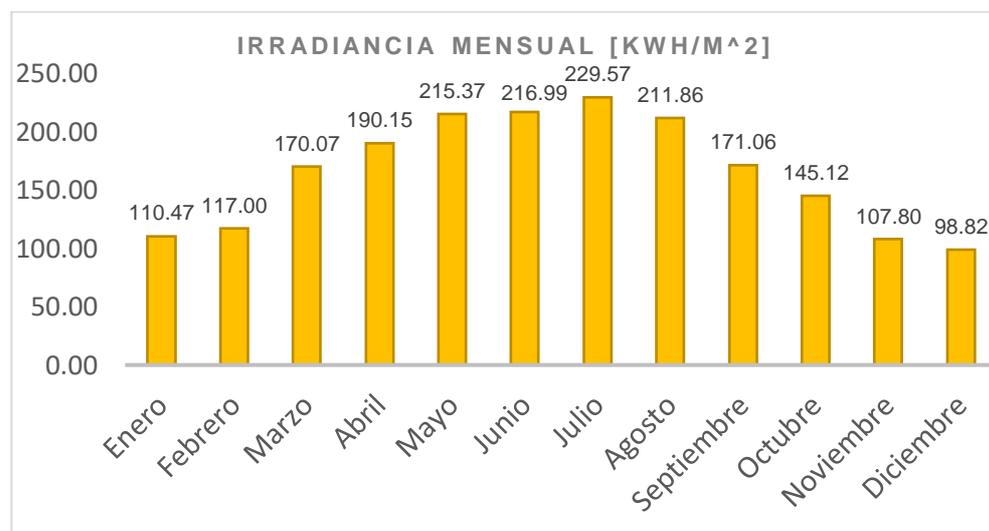


Figura 6.4.2. Gráfica de la irradiación mensual, (elaboración propia).

Se observa como la radiación solar está directamente relacionada con la producción fotovoltaica, siendo los meses de mayor producción aquellos en los que la irradiación alcanza sus valores más altos. Entre ellos destaca julio, como el mes en el que se obtiene una mayor producción fotovoltaica (325,61 MWh) y una mayor incidencia solar (229,57 kWh/m²). También destaca como las temporadas de mayor producción son la primavera y el verano, produciéndose valores ascendentes progresivamente desde enero, alcanzando el zenit en julio,

y que decaen, de forma más abrupta de la que aumentaron, desde agosto hasta septiembre. En contrapartida, el mes de menor producción es diciembre (14,077 MWh), ya que es en este mes en el que se produce el solsticio de invierno, siendo el día de menor duración de luz solar y por tanto, de menor radiación (98,82 kWh/m²).

6.5. Impacto de la energía fotovoltaica en la generación eléctrica del “Benchijigua Express”.

Una vez se conoce la energía eléctrica que es capaz de producir la instalación fotovoltaica dimensionada para el “Benchijigua Express”, se debe enfrentar este valor con el de la energía normalmente generada por los medios habituales a bordo, es decir, los cuatro grupos electrógenos a base de diésel.

Al tratarse de un buque de pasaje que realiza las mismas rutas y maniobras de forma rutinaria y periódica, los consumos son por tanto regulares con margen a ciertas desviaciones ocasionadas por diferentes motivos, y por consiguiente, lo es la energía entregada por los diésel generadores. Además, la demanda de electricidad varía en función de si el buque está atracado en el puerto, donde la mayor parte de equipos están parados o apagados, o de si este se encuentra en navegación, donde los consumos son mayores.

Su producción eléctrica media durante una hora de navegación es de 330 kW. En cambio, durante las estancias en puerto, la potencia media generada a la hora es de 180 kW, algo más de la mitad (22).

Según los horarios proporcionados por la compañía, el buque realiza a la semana 24 conexiones entre San Sebastián de la Gomera y el puerto de Los Cristianos (50 min) (65), y 16 travesías entre este último puerto y el de Santa Cruz de la Palma (170 min) (66). Por tanto, las horas diarias medias en las que el buque navega son,

$$H_{navdia} = \frac{24 \cdot 50 + 16 \cdot 170}{60 \cdot 7} = 9,33 \text{ horas al día} \quad (6.5.1)$$

Se ha de tener en cuenta que la planta de la sala de máquinas es puesta en marcha con antelación a la salida del buque y se para con demora respecto al atraque de este, aunque con un consumo menor que en la propia navegación, por lo que al resultado obtenido en el cálculo 6.5.1 se le aplica un factor de corrección del 10%. Entonces,

$$H_{navdia} = H_{navdia} \cdot 1,1 = 9,33 \cdot 1,1 = 10,27 \text{ horas al día} \quad (6.5.2)$$

Por tanto, si el resultado anterior supone el tiempo que el buque está en navegación, el restante lo está en puerto con la planta parada. Entonces,

$$H_{puertodia} = 24 - H_{navdia} = 24 - 10,27 = 13,73 \text{ horas al día} \quad (6.5.3)$$

Conociendo las horas bajo navegación y en estancia en puerto, se puede calcular la energía generada al día.

$$E_{gendiesel} = (H_{navdia} \cdot 330) + (H_{puertodia} \cdot 180) = (10,27 \cdot 330) + (13,73 \cdot 180) = 4320,6 \text{ kWh al día} \quad (6.5.4)$$

Entonces, en el cómputo anual y cambiando de unidades a megawatios,

$$E_{gendieaño} = \frac{E_{gendiesel}}{1000} \cdot 365 = \frac{4320,6}{1000} \cdot 365 = 1577,019 \text{ MWh al año} \quad (6.5.5)$$

El valor obtenido en el cálculo anterior se supone como la generación eléctrica total anual en el “Benchijigua Express” antes de ser dotado con la instalación fotovoltaica, es decir, la cantidad de electricidad que precisa el “fast ferry” para su correcta operación. Por tanto, este valor se toma como la referencia sobre la cual la instalación fotovoltaica aporta 282,354 MWh ($E_{fvaño}$) de energía eléctrica a descontar de la generación de corriente que aportan los grupos electrógenos. Por tanto, según la nueva configuración de generación eléctrica a bordo, la aportación de los diésel generadores ($E_{dieselaño}$) es,

$$E_{dieselaño} = E_{gendieaño} - E_{fvaño} = 1577,019 - 282,354 = 1294,665 \text{ MWh al año} \quad (6.5.6)$$

La siguiente gráfica muestra el porcentaje que suponen ambos métodos de generación eléctrica sobre el total calculado en la ecuación 6.5.5.

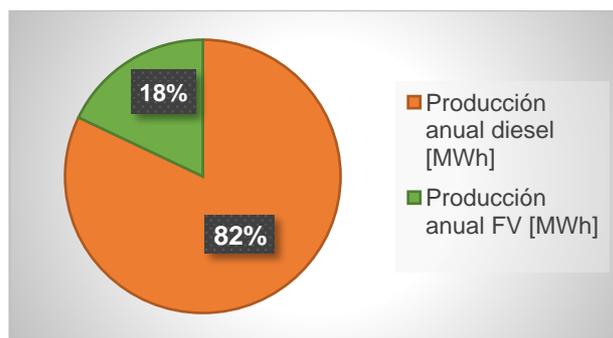


Figura 6.5.1. Aportación anual de cada medio de generación eléctrica a bordo, (elaboración propia).

Se observa que la energía fotovoltaica supone un 18% del cómputo total generado a bordo. Esto supone un 18% de la producción eléctrica libre de emisiones, mientras que el 82% restante sigue recayendo sobre los medios tradicionales. Por tanto, la instalación fotovoltaica supone un método para

reducir emisiones y abaratar el precio de producción de parte de la energía eléctrica generada a bordo, sin embargo, los grupos electrógenos siguen siendo necesarios, ya que la mayor parte, el 82% de la generación, sigue dependiendo de este método, sin olvidar que la energía entregada por la instalación fotovoltaica no es constante, como en períodos nocturnos o invernales, durante los cuales el porcentaje de aportación momentáneo puede variar hasta depender al 100% de los diésel generadores.

Una reducción del 18% de la carga de trabajo de los grupos electrógenos equivale a una reducción del mismo 18% en el consumo de estos y por tanto, de las emisiones que estos generan. Tomando los datos de la ficha técnica de los motores que alimentan a los alternadores (figura 4.2.2.1), se obtiene que el consumo a un 100% de carga de trabajo por parte del motor (1500 rpm) es de 190 g/kWh ($C_{dg} = 190 \text{ g/kWh} = 0,190 \text{ t/MWh}$). Conociendo la producción eléctrica total anual de los generadores sin la instalación fotovoltaica, calculada en la ecuación 6.5.5, se puede conocer el ahorro de combustible que supone la instalación fotovoltaica. Entonces,

$$Ahorro_{diesel} = C_{dg} \cdot E_{gendieaño} \cdot 18\% = 0,190 \cdot 1577,019 \cdot 18\% = 53,93 \text{ t al año} \quad (6.5.7.)$$

Se obtiene que el uso de energía fotovoltaica equivale a un ahorro de 53,93 toneladas de diésel al año. Por tanto, haciendo uso del factor de conversión C_f obtenido del punto 2.2.1 del Anexo 5 de la resolución “MEPC.308(73)” de la OMI (67) que relaciona el consumo de combustible con las emisiones de CO_2 de este, se puede cuantificar la reducción de emisiones de este gas de efecto invernadero a la atmósfera. En la siguiente tabla se muestran los diferentes valores del coeficiente C_f en función del combustible, tomándose para este caso el correspondiente al diésel.

Type of fuel	Reference	Lower calorific value (kJ/kg)	Carbon content	C_f (t-CO ₂ /t-Fuel)
1 Diesel/Gas Oil	ISO 8217 Grades DMX through DMB	42,700	0.8744	3.206
2 Light Fuel Oil (LFO)	ISO 8217 Grades RMA through RMD	41,200	0.8594	3.151
3 Heavy Fuel Oil (HFO)	ISO 8217 Grades RME through RMK	40,200	0.8493	3.114
4 Liquefied Petroleum Gas (LPG)	Propane	46,300	0.8182	3.000
	Butane	45,700	0.8264	3.030

Tabla 6.5.1. Valores del coeficiente conversor C_f según el combustible (67).

Por tanto, la reducción de emisiones de CO_2 equivale a las toneladas de combustible ahorrado multiplicado por dicho coeficiente conversor. Entonces,

$$RE_{CO_2} = C_f \cdot Ahorro_{diesel} = 3,206 \cdot 53,93 = 172,9 \text{ t } CO_2 \text{ al año} \quad (6.5.8)$$

Según el cálculo anterior, equipar el “Benchijigua Express” con una instalación fotovoltaica supone una reducción de 172,9 toneladas de dióxido de carbono emitidas por la planta de generación eléctrica en el cómputo de un año.

7. BALANCE ECONÓMICO

En este apartado se desarrollará el coste de la instalación fotovoltaica y el ahorro que esta conlleva, calculando la tasa de amortización correspondiente para poder situar el uso de la energía fotovoltaica a bordo del “Benchijigua Express” en un marco temporal además del técnico, energético y económico.

7.1. Coste de la instalación

Según se han ido especificando los componentes o equipos seleccionados para la instalación fotovoltaica, se ha ido, salvo alguna excepción, recogiendo en los respectivos apartados los precios de estos para poder realizar una posterior evaluación de los costes de la instalación. A continuación, se muestra una tabla en la que se resumen los precios y las cantidades necesarias de cada elemento para poder estimar el coste total final de la instalación.

Resaltar que ciertos precios marcados con un asterisco son estimados. Este método de cálculo se debe a la dificultad para acceder a los precios unitarios, principalmente por solo estar disponibles a proveedores certificados, empresas instaladoras o bien precisar de solicitar un estudio para un proyecto concreto para que posteriormente comunicasen un presupuesto de los equipos que distribuyen. Para la estimación se han consultado precios de equipos similares en distintos proveedores, de forma que se toma un valor medio aproximado.

Referencia	Producto	Unidades	Precio (€/ud)	Coste (€)
JST460M	Módulo fotovoltaico monocristalino	407	162,86	66.284,02
	Tornillos de fijación a cubierta	448	8,80	3.942,40
	Perfil de soporte de módulos C40	272	42,60	11.587,20
	Fijación entre módulos de 38 mm “Z” C40	200	1,20	240,00
	Fijación entre módulos de 38 mm “T”	812	1,65	1.339,80
	Accesorio unión guías 38 mm	180	6,30	1.134,00

Sirio K200	Inversor trifásico centralizado de 200 kVA	1	31.978,57	31.978,57
XMN02420963	Transformador trifásico 400/690V de 200 kVA	1	1.800,00*	1.800,00
	Cable unipolar 4 mm ² ZZ-F/H1Z2Z2-K Rojo	2960	0,58*	1.716,80
	Cable unipolar 4 mm ² ZZ-F/H1Z2Z2-K Negro	2960	0,58*	1.716,80
	Cable unipolar 400 mm ² ZZ-F/H1Z2Z2-K Rojo	300	40,24*	12.072,00
	Cable unipolar 400 mm ² ZZ-F/H1Z2Z2-K Negro	300	40,24*	12.072,00
	Cable unipolar flexible 150 mm ² RZ1-K (AS) 0,6/1 kV Rojo	10	12,01*	120,10
	Cable unipolar flexible 150 mm ² RZ1-K (AS) 0,6/1 kV Azul	10	12,01*	120,10
	Cable unipolar flexible 150 mm ² RZ1-K (AS) 0,6/1 kV Amarillo	10	12,01*	120,10
	Cable unipolar flexible 150 mm ² RZ1-K (AS) 0,6/1 kV Negro	10	12,01*	120,10
	Cable unipolar flexible 70 mm ² RZ1-K (AS) 0,6/1 kV Rojo	50	9,28*	464,00
	Cable unipolar flexible 70 mm ² RZ1-K (AS) 0,6/1 kV Azul	50	9,28*	464,00
	Cable unipolar flexible 70 mm ² RZ1-K (AS) 0,6/1 kV Amarillo	50	9,28*	464,00
SCCB-52	Combiner box con elementos de protección	1	1.162,82*	1.162,82
	Controlador de temperatura para transformador trifásico	1	100,00*	100,00
	Interruptor diferencial 4 polos	2	120,00*	240,00
	Disyuntor magnetotérmico 4 polos	3	60,00*	180,00
	Mano de obra de los instaladores	1	15.000,00*	15.000,00
Total				164.438,81

Tabla 7.1.1. Desglose de los costes de la instalación fotovoltaica, (elaboración propia).

El coste total de la instalación fotovoltaica, incluyendo todos los materiales, elementos, dispositivos y medios humanos; es de 164.438,81 €, como se refleja

en la tabla superior. Este precio se tomará como referencia de ejecución del proyecto a la hora de calcular el ahorro económico derivado de dicha instalación fotovoltaica. En la tabla anterior no se recogen los costes derivados de labores de mantenimiento rutinario, ya que, al ser mínimas y simples, estas pueden ser realizados por el personal de máquinas del buque.

En el siguiente gráfico se muestran los costes individuales de forma visual para poder apreciar mejor que partidas suponen un coste mayor y compararlas entre ellas.

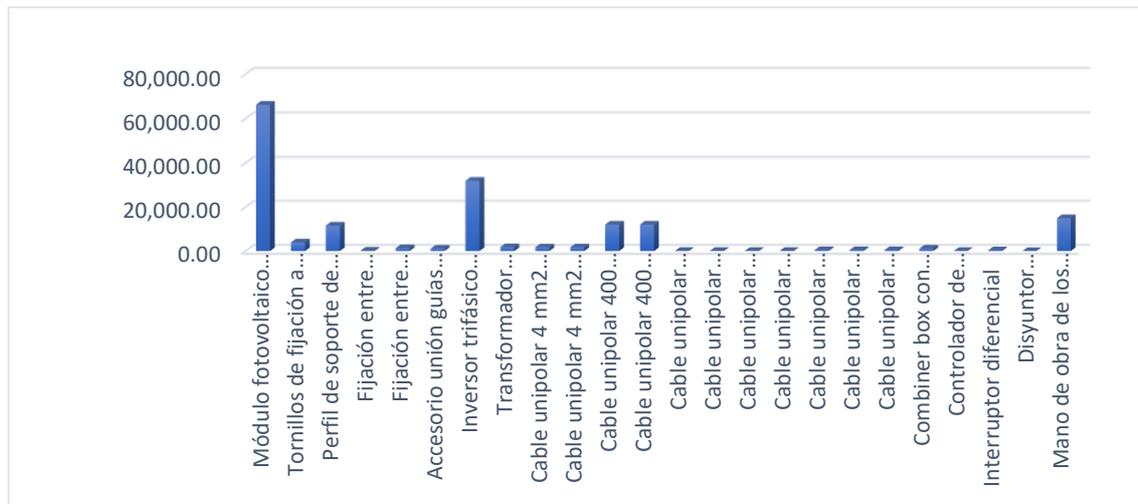


Figura 7.1.1. Gráfica comparativa con los costes totales de cada elemento [€], (elaboración propia).

La partida de mayor coste es la dedicada a los módulos fotovoltaicos ya que, pese a tener un precio moderado, se precisa de un alto número de unidades. Sin embargo, el mayor precio unitario es el del inversor de corriente trifásico, suponiendo el segundo coste total más alto tras los módulos fotovoltaicos, pero con la diferencia de ser una sola unidad. En cambio, no es de extrañar su precio dada su importancia en la instalación, siendo un elemento vital por el que pasa toda la corriente generada por los paneles, dependiendo de la calidad de este en gran medida la viabilidad del conjunto de la instalación. También es de relevancia la dedicación al cableado, siendo el que conecta la combiner box con el inversor el tramo de mayor longitud y sección, haciéndolo el tramo de mayor coste.

En cuanto a los medios humanos, el montaje y puesta en marcha de la instalación supone un alto coste. Pese a no ser capaz de estimar las horas ni trabajadores que esto supondría, el montante a pagar a la empresa instaladora

supone un coste de alta relevancia a la hora de presupuestar la generación fotovoltaica. Cabe resaltar que este apartado depende de la empresa instaladora seleccionada y que se pueden obtener rebajas durante el proceso de búsqueda y negociación ya que el montaje se ve influido por diversos factores que le dan un mayor margen de maniobra sobre los precios.

7.2. Amortización de la instalación fotovoltaica

La instalación fotovoltaica a bordo del “Benchijigua Express” permite reducir la carga de trabajo de los motores auxiliares y por tanto reducir su consumo de combustible, como se ha explicado en los apartados anteriores. En esta reducción de consumo de diésel es donde se produce el principal ahorro de dinero derivado del uso de la energía renovable en el buque. Otro aspecto derivado del uso de la energía fotovoltaica que reduce el gasto por parte del armador es la reducción de las horas de mantenimiento de los motores auxiliares necesarias. Al ver reducida su carga, sus horas de trabajo son menores anualmente, por lo que tardan más tiempo en llegar a las horas de trabajo estipuladas para mantenimientos rutinarios y/o preventivos como el cambio de aceite lubricante, filtros de aire y combustible, cambio de correas de distribución, etc. Esto repercute directamente en un menor gasto en materiales además de la reducción de las horas dedicadas a tal fin por parte de la tripulación. Por contrapartida, aunque la instalación fotovoltaica supone nuevos elementos que también necesitan labores de mantenimiento, estas son menores y de mayor facilidad que las propias de cuatro motores, por lo que pese a sumar nuevas tareas, se siguen reduciendo las horas de mantenimiento anuales, ya que el tiempo de trabajo evitado es aún mayor que esta nueva adición de labores al personal de máquinas.

Este último aspecto de ahorro generado con la instalación fotovoltaica es difícilmente tangible, sin embargo, con la cuantía a la que equivale el combustible dejado de consumir por la reducción de carga de los motores auxiliares, se puede conocer el tiempo de amortización de la instalación, parámetro muy importante al valorar la viabilidad económica de un proyecto.

Para obtener el valor de dicho parámetro, primeramente, se ha de conocer el precio de la tonelada de diésel marino (MGO), para conocer con el producto entre este valor y el de las toneladas de combustible ahorrado (6.5.7) la cuantía

anual que supone el carburante que se deja de consumir. Luego, dividiendo el coste total de la instalación entre el ahorro económico derivado del combustible, se obtiene el tiempo de amortización. Haciendo la división inversa, se obtiene la tasa de amortización.

El precio medio de la tonelada de MGO en 2020 fue de 379,05 € ($MGO_{20} = 379,05 \text{ €/t}$) (68). Entonces el dinero ahorrado (D_{ahorro}) es,

$$D_{\text{ahorro}} = MGO_{20} \cdot \text{Ahorro}_{\text{diesel}} = 379,05 \cdot 53,93 = 20.442,17 \text{ €/año} \quad (7.2.1)$$

El uso de la energía fotovoltaica en el “Benchijigua Express” equivale por tanto a un ahorro de 20.442,17 € anuales, derivados de la reducción del consumo de diésel por parte de los motores auxiliares, al ver estos su carga de trabajo disminuida con la aportación de energía de los módulos fotovoltaicos.

Con este rendimiento anual, el tiempo de amortización ($t_{\text{amortización}}$) será,

$$t_{\text{amortización}} = \frac{\text{Coste}_{\text{inst}}}{D_{\text{ahorro}}} = \frac{164.438,81}{24.442,17} = 6,73 \text{ años} \quad (7.2.2)$$

La instalación fotovoltaica tarda entonces 6,73 años en amortizarse. Esto significa que el ahorro derivado de esta equivale el coste total de la instalación al cabo de 6,73 años. Mientras, la instalación está generando un dinero que no se traduce en beneficios, ya que se está dedicando a sufragar la inversión inicial necesaria para llevar a cabo el proyecto de energía fotovoltaica en el “Benchijigua Express”. A partir de ese tiempo, la cuantía anual de ahorro sí se puede interpretar como beneficio, aunque no sea como tal técnicamente en el ámbito económico. Dicho margen anual de “beneficio”, alcanzado a partir de los 6,73 años, puede suponer una reducción de los costes de operación del buque por parte del armador, ayudando en los balances económicos del buque y/o naviera a alcanzar o maximizar los beneficios, o bien puede ser reinvertido en diversas mejoras del buque, como para por ejemplo su eficiencia energética, los servicios del pasaje o sufragar cursos de formación para la tripulación en diversos ámbitos.

La tasa de amortización ($T_{\text{amortización}}$) correspondiente a este ahorro anual es, por tanto,

$$T_{\text{amortización}} = \frac{D_{\text{ahorro}}}{\text{Coste}_{\text{inst}}} \cdot 100 = \frac{24.442,17}{164.438,81} \cdot 100 = 14,86\% \text{ anual} \quad (7.2.3)$$

Este valor representa el ritmo de amortización anual al que rinde la instalación fotovoltaica. Cada año con la instalación, esta se amortiza un 14,86% de su coste total inicial. Esto sirve para ver el rendimiento económico anual de la

inversión realizada, permitiendo analizar la rentabilidad de la inversión en el cómputo anual y no solo en el tiempo total que tarda esta en amortizarse. Cuanto mayor es la tasa, mayor ritmo y por tanto menor tiempo de amortización, por lo que mejor será la inversión. El valor obtenido representa un ritmo bueno y aceptable que permite alcanzar la amortización a los 6,73 años, ligeramente por debajo de la media general de tiempo de amortización de instalaciones fotovoltaicas de 7 años (87). En ambos parámetros de amortización influyen, en este caso negativamente, aspectos como la orientación e inclinación de los paneles, los cuales, al no estar en posición perpendicular a la dirección de los rayos solares, reducen su producción energética y por tanto disminuyen el ahorro generado, que a su vez ralentiza el ritmo anual de amortización. Pese a estos inconvenientes, el tiempo de amortización sigue estando ligeramente por debajo del período medio, lo cual refleja un buen dimensionamiento de la instalación fotovoltaica acorde a las necesidades previstas en el buque.

Por otra parte, la vida útil de los paneles fotovoltaicos es de al menos 25 años, ya que este tiempo está cubierto bajo garantía del fabricante. Sabiendo que los módulos solares corresponden a la parte más débil o vulnerable de la instalación y, tomando esos 25 años como el límite de su vida útil ($t_{\text{vida útil}}$) (aunque podría ser aún mayor), se puede establecer que los paneles marcan la duración en funcionamiento de la instalación. La siguiente gráfica muestra el ritmo marcado por la tasa de amortización durante los 25 años de vida útil de la instalación enfrentado con el coste de esta, observándose como se alcanza a los 6,73 años el ahorro equivalente a la inversión inicial y, desde ese momento, el porcentaje acumulado supone un remanente positivo.

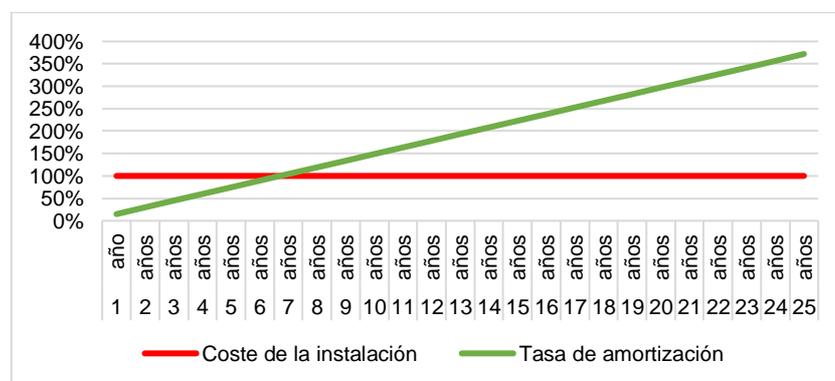


Figura 7.2.1. Representación gráfica de la tasa de amortización respecto al coste de la instalación, (elaboración propia).

Sabiendo que el tiempo de amortización es de 6,73 años, el restante hasta el fin de actividad de la instalación será el tiempo en el que esta reporte un ahorro al armador (t_{ahorro}). Por tanto,

$$t_{\text{ahorro}} = t_{\text{vidaútil}} - t_{\text{amortización}} = 25 - 6,73 = 18,27 \text{ años} \quad (7.2.4)$$

El tiempo que puede dedicar la instalación a lo largo de su vida útil a generar un ahorro económico es de 18,27 años. Este periodo, conociendo el dinero anual que permite eliminar de la partida de gastos el uso de la energía fotovoltaica, equivale al ahorro total generado por la instalación fotovoltaica desde su puesta en marcha hasta su desmantelamiento ($D_{\text{ahorrototal}}$).

$$D_{\text{ahorrototal}} = t_{\text{ahorro}} \cdot D_{\text{ahorro}} = 18,27 \cdot 24.442,17 = 446.558,45 \text{ €} \quad (7.2.5)$$

La reducción de gasto total a lo largo de la vida útil de la instalación fotovoltaica es de 446.558,45€, cantidad que como se explicó anteriormente, puede ser dedicada al remanente de la naviera o reinvertido en diversas mejoras del buque y/o su tripulación. Ha de mencionarse que dicho montante final de dinero ha sido calculado sin tener en cuenta los gastos necesarios para el mantenimiento de la propia instalación fotovoltaica, los cuales al ser mínimos y simples (como se ha mencionado anteriormente), se toman como despreciables, pero que en la aplicación real supondrían una leve disminución de la cantidad mostrada en el cálculo 7.2.5, siendo más resaltante en el caso de tener que sustituir algún elemento material de la instalación, dependiendo del cual la disminución puede ser mínima o considerable.

El siguiente gráfico muestra la repartición entre amortización y ahorro del dinero total derivado de la reducción de consumo de combustible causado por la instalación fotovoltaica en el cómputo de los 25 años de su vida útil.

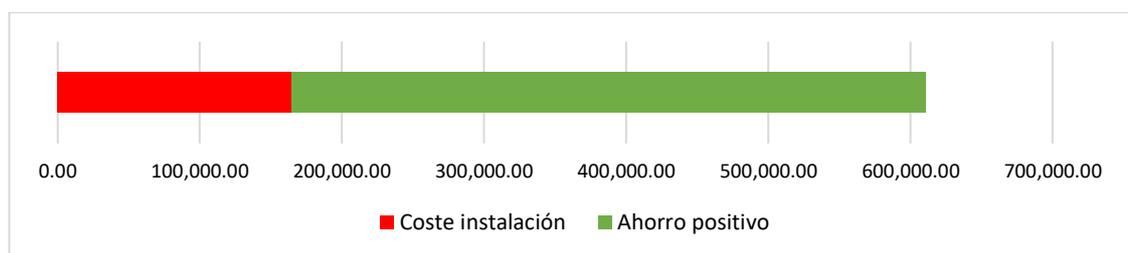


Figura 7.2.2. Representación gráfica del reparto económico del ahorro generado por la instalación fotovoltaica, (elaboración propia).

Se observa como el ahorro positivo es claramente superior al doble del coste de la instalación, evidenciando las ventajas económicas de equipar al “Benchijigua Express” con un sistema de producción eléctrica basado en energía fotovoltaica.

La cifra total de dinero generado por la instalación fotovoltaica corresponde a la suma del coste de la instalación con el ahorro positivo referenciado en la gráfica superior y calculado en la fórmula 7.2.5, ascendiendo a un total de 610.997,26 €.

8. CONCLUSIONES

En este apartado se reflejan las conclusiones extraídas del contenido previamente explicado, detallado y calculado sobre la implementación de un sistema generador fotovoltaico en el “Benchijigua Express”.

Inicialmente, se ha de destacar el cumplimiento del objetivo marcado para la realización de este trabajo, considerándose como comprobada la viabilidad técnica, energética y económica de una instalación fotovoltaica a bordo del fast ferry “Benchijigua Express”. Así, pese a la falta de información exacta en algunos ámbitos y términos, los resultados obtenidos se consideran como admisibles y aceptables, dado que las estimaciones estimadas son en base a otros datos relacionados.

La disponibilidad de superficie libre en las cubiertas para poder albergar un campo fotovoltaico es determinante para la posterior energía entregada por la instalación, ya que a mayor extensión mayor número de paneles y por tanto mayor energía. Además, que esta esté libre de elementos que no generen sombras en la matriz solar supone un aspecto importante en la posterior generación obtenida.

Por otra parte, los paneles fotovoltaicos son un elemento vital, cuyas especificaciones técnicas, entre ellas el rendimiento y la potencia pico, establecen, junto con el número de paneles, la energía entregada. Una mala selección de los paneles, pese a un buen dimensionamiento de la instalación, equivale a una pérdida de capacidad productiva que puede ocasionar la inviabilidad del proyecto.

Así mismo, la radiación solar en la zona en la que opera el buque establece en función de los paneles la producción eléctrica. Es crucial disponer de datos fiables sobre la radiación de la que se dispone en el área de operación del buque. El mismo buque con la misma instalación no ofrecerá los mismos beneficios respecto a su homólogo si sus rutas son en zonas considerablemente alejadas. Por tanto, definir claramente las ubicaciones frecuentadas por el buque es crucial para conocer la radiación y su posterior producción. Una embarcación sin ruta fija (como por ejemplo los buques bajo régimen TRAMP) no es idónea para albergar una instalación fotovoltaica ya que es altamente complicado estimar la radiación solar que le incidirá y, por tanto, la energía

entregada por esta, siendo posible que en el peor de los casos no se llegue ni a amortizar el proyecto por la falta de datos precisos sobre la ubicación y radiación solar.

La estabilidad del buque se considera inalterada ante el peso añadido por la instalación y la consecuente elevación del centro de gravedad del buque, dado su diseño de casco característico de fast ferry trimarán, el cual destaca por sus grandes condiciones de estabilidad para poder navegar a altas velocidades de forma segura. El peso de los paneles equivale el principal añadido al desplazamiento del buque, por lo que resulta importante tenerlo en cuenta a la hora de seleccionar los módulos fotovoltaicos.

Pese a las altas cifras de generación eléctrica mediante la instalación fotovoltaica obtenidas, estas son pequeñas en comparación con las necesidades eléctricas del “Benchijigua Express”, quedando comprobado que el rol de la energía fotovoltaica a bordo es el de aportador energético complementario y no el de alternativa a los medios basados en combustibles fósiles, como se preveía en un primer momento.

El ahorro de combustible y emisiones obtenido es igualmente mínimo en comparación con los consumos totales del buque, ya que con la aportación fotovoltaica se consigue evitar una parte del consumo y emisiones derivados de los motores auxiliares, pero no del conjunto del buque, siendo los motores principales los mayores consumidores de combustible, los cuales no ven afectada su carga de trabajo con la incorporación de la energía fotovoltaica a bordo. La energía fotovoltaica en el “Benchijigua Express” se muestra por tanto insuficiente como medida de lucha anticontaminación atmosférica respecto a las emisiones previas del fast ferry, ya que la reducción obtenida para el conjunto del buque no supone una disminución sustancial ni reseñable.

En el ámbito económico, el tiempo de amortización es bueno, ligeramente por debajo de la media, y el ahorro generado en total es considerable. Sin embargo, teniendo en cuenta que el buque tiene en la actualidad 16 años y que la vida útil de un buque suele ser de 30 años, la instalación reportará menos beneficios de los que es capaz de generar al armador ya que cuando se inactive el buque, la instalación aún dispondrá de bastantes años más de vida útil no aprovechados, durante los cuales no reportará ningún ahorro a su promotor. Pese a no poder

ofrecer todas sus ventajas económicas, la instalación se considera económicamente viable.

En definitiva, de la instalación fotovoltaica dimensionada queda probada la viabilidad económica, al poseer un tiempo de amortización moderado y reportar un ahorro al armador durante su funcionamiento, la viabilidad técnica, al comprobarse que no afecta a la estabilidad del buque y la correcta y segura disposición de los elementos añadidos a lo largo del buque sin necesidad de alterar ninguna condición previa en este, y la viabilidad energética, al generar una cantidad de energía que se equivale en una cierta reducción de carga de trabajo de los motores auxiliares, el consumo de estos y por ende sus consecuente emisiones de GEI. Sin embargo, las ventajas y beneficios obtenidos no se consideran suficientes como para estimar a la instalación fotovoltaica dimensionada para el “Benchijigua Express” actual un método atractivo para reducir sus emisiones atmosféricas a la vez que se reducen los costes de operación del buque. En cambio, en el caso de un buque diseñado y construido teniendo en cuenta el uso de la energía fotovoltaica, los beneficios de esta energía renovables serían maximizados, haciéndola una alternativa real a los medios convencionales basados en combustibles fósiles.

9. BIBLIOGRAFÍA

El estilo de referencias aplicado es el Vancouver.

1. Nations U. Cambio climático | Naciones Unidas [Internet]. United Nations. United Nations; [citado 28 de noviembre de 2020]. Disponible en: <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>
2. El primer panel solar de la historia [Internet]. Blog de Fundeen. 2020 [citado 28 de noviembre de 2020]. Disponible en: <https://ochocontres.com/energias-renovables/el-primer-panel-solar-de-la-historia/>
3. Cerrillo A. El transporte marítimo, a punto de dar luz verde a un aumento de emisiones [Internet]. La Vanguardia. 2020 [citado 28 de noviembre de 2020]. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/natural/cambio-climatico/20201113/49425015994/el-transporte-maritimo-a-punto-de-dar-luz-verde-a-un-aumento-de-emisiones.html>
4. OMI. APROBACIÓN DE LA ESTRATEGIA INICIAL DE LA OMI SOBRE LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE GEI DE LOS BUQUES Y LA ACTIVIDAD EXISTENTE DE LA OMI RELACIONADA CON LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE GEI EN EL SECTOR NAVAL [Internet]. [citado 28 de noviembre de 2020]. Disponible en: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/250_IMO%20submission_Talanoa%20Dialogue_April%202018.pdf
5. OMI. Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL) [Internet]. [citado 28 de noviembre de 2020]. Disponible en: [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)
6. Ambiental AP. Reducir las emisiones del transporte marítimo - Ambientum [Internet]. Ambientum Portal Lider Medioambiente. 2020 [citado 28 de noviembre de 2020]. Disponible en: <https://www.ambientum.com/ambientum/contaminacion/reducir-las-emisiones-del-transporte-maritimo.asp>
7. Eco Marine Power. Aquarius Eco Ship [Internet]. Eco Marine Power. [citado 10 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://www.ecomarinepower.com/en/aquarius-eco-ship>
8. Atkinson GM. Analysis of marine solar power trials on Blue Star Delos. J

Mar Eng Technol. 1 de septiembre de 2016;15(3):115-23.

9. El efecto fotoeléctrico, ¿en qué consiste? [Internet]. Blog de Fundeen. 2020 [citado 10 de diciembre de 2020]. Disponible en:

<https://ochocontres.com/energias-renovables/el-efecto-fotoelectrico-en-que-consiste/>

10. Tomé López C. La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico [Internet]. Cuaderno de Cultura Científica. 2019 [citado 10 de diciembre de 2020].

Disponible en: <https://culturacientifica.com/2019/07/02/la-explicacion-de-einstein-del-efecto-fotoelectrico/>

11. El efecto fotoeléctrico [Internet]. Xataka Ciencia. 2008 [citado 10 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://www.xatakaciencia.com/fisica/el-efecto-fotoelectrico>

12. Energía Solar Fotovoltaica ORG. TIPOS DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS [Internet]. Energia Solar Fotovoltaica.org. 2018 [citado 11 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://energiasolarfotovoltaica.org/tipos-de-paneles-solares-fotovoltaicos>

13. Jorge Cogollo. ¿CÓMO FUNCIONA UN PANEL SOLAR? Energía Solar FOTOVOLTAICA [Internet]. 2019 [citado 12 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=q5bMAz4NK0c&list=LL&index=6>

14. Lesics Española. ¿Cómo funcionan las celdas solares? [Internet]. 2019 [citado 13 de diciembre de 2020]. Disponible en:

<https://www.youtube.com/watch?v=MgLGKMrsBX8&list=LL&index=4>

15. Alonso Lorenzo JA. Efecto de la temperatura en los paneles solares SunFields [Internet]. [citado 14 de diciembre de 2020]. Disponible en:

<https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/efecto-de-la-temperatura-en-los-paneles-solares/>

16. Llonch T. Tipos de Estructuras para Paneles Fotovoltaicos por Toni Llonch – Atecyr [Internet]. [citado 15 de diciembre de 2020]. Disponible en:

<https://www.atecyr.org/blog/2020/09/01/tipos-de-estructuras-para-paneles-fotovoltaicos-por-toni-llonch/>

17. Energy GE. Claves para el desarrollo de la fotovoltaica flotante [Internet]. Grupo Eletton Energy. 2021 [citado 16 de diciembre de 2020]. Disponible en:

<https://eletton.com/sin-categoria/fotovoltaica-flotante/>

18. Planas O. ¿Cuáles son los tipos de paneles fotovoltaicos? [Internet].

- [citado 17 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/tipos-de-paneles-fotovoltaicos>
19. Damia Solar. Ventajas y inconvenientes de las placas solares flexibles [Internet]. [citado 18 de diciembre de 2020]. Disponible en: https://www.damiasolar.com/actualidad/blog/articulos-sobre-la-energia-solar-y-sus-componentes/ventajas-inconvenientes-paneles-solares-flexibles_1
20. Solar D. Conoce los 3 tipos de paneles solares fotovoltaicos [Internet]. [citado 12 de enero de 2021]. Disponible en: https://www.damiasolar.com/actualidad/blog/articulos-sobre-la-energia-solar-y-sus-componentes/tipos-de-placas-solares-fotovoltaicas_1
21. AutoSolar. Tipos de conexión de los paneles solares y qué tener en cuenta [Internet]. [citado 13 de enero de 2021]. Disponible en: <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/conexion-de-las-placas-solares-tipos-y-puntos-a-tener-en-cuenta>
22. Franco Galán JA. CALCULATION AND IMPROVEMENT OF THE ENERGY EFFICIENCY INDEX OF THE BENCHIJIGNA EXPRESS SHIP.
23. AutoSolar. ¿Conexión en serie o en paralelo de los paneles solares? [Internet]. [citado 13 de enero de 2021]. Disponible en: <https://autosolar.pe/blog/aspectos-tecnicos/conexion-en-serie-y-en-paralelo-de-paneles-solares>
24. Ojeda G. Baterías para placas solares: Funcionamiento y Mejores marcas [Internet]. Selectra. [citado 16 de enero de 2021]. Disponible en: <https://selectra.es/autoconsumo/info/componentes/baterias-solares>
25. Couce Rodríguez C. Apuntes de la asignatura «Química» del grado en Tecnologías Marinas impartido en la ETS Náutica y Máquinas de A Coruña. 2016.
26. Sánchez Ferradal E. INSTALACION FOTOVOLTAICA PARA VIVIENDA RURAL.
27. AutoSolar. ¿Qué es un regulador de carga? [Internet]. [citado 25 de enero de 2021]. Disponible en: <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/que-es-un-regulador-de-carga>
28. Bortignon S. Cómo Funciona un Inversor: Esquema y Funcionamiento [Internet]. MPPTSOLAR. [citado 7 de junio de 2021]. Disponible en:

- <https://www.mpptsolar.com/es/esquema-funcionamiento-inversor.html>
29. Avisos D de. Fred. Olsen Express amplía sus rutas con 53 nuevas frecuencias y cubre ya 171 trayectos a la semana [Internet]. Diario de Avisos. 2020 [citado 30 de enero de 2021]. Disponible en: <https://diariodeavisos.lespanol.com/2020/06/fred-olsen-express-amplia-sus-rutas-con-53-nuevas-frecuencias-y-cubre-ya-171-trayectos-a-la-semana/>
30. S.A FO. Benchijigua Express - Fast Ferry Canarias | Fred Olsen Express [Internet]. Fred Olsen. [citado 30 de enero de 2021]. Disponible en: <https://www.fredolsen.es/es/planificar-viaje/flota/benchijigua-express>
31. Díaz Lorenzo JC. De la mar y los barcos [Internet]. De la mar y los barcos. [citado 30 de enero de 2021]. Disponible en: <https://delamarylosbarcos.wordpress.com/>
32. S.A FO. Fred Olsen Sa - Consulte Teléfono, CIF y Dirección | elInforma [Internet]. EINFORMA. Información de empresas | Informes de empresas | Datos de empresas y registros empresas. [citado 10 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://www.einforma.com/informacion-empresa/fred-olsen>
33. S.A FO. Acerca de Fred. Olsen | Fred. Olsen [Internet]. Fred Olsen. [citado 10 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://www.fredolsen.es/es/acerca-de-fred-olsen>
34. García Soutullo R. Sistema de Propulsión Waterjet [Internet]. Ingeniero Marino. 2018 [citado 15 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://ingenieromarinero.com/sistema-de-propulsion-waterjet/>
35. Hidrojet. En: Wikipedia, la enciclopedia libre [Internet]. 2019 [citado 15 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Hidrojet&oldid=119030991>
36. Suárez JPO, Fernández RP. CUADERNO 0: MEMORIA EXPLICATIVA DEL TIPO DE BUQUE Y SERVICIO AL QUE SE DESTINA. :638.
37. MTU Solutions. Ficha técnica MOTORES DIESEL 20V 8000 M71 / 71L MTU [Internet]. [citado 18 de febrero de 2021]. Disponible en: https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/products/defense/marine-and-offshore-service-and-supply/main-propulsion/mtu-series-8000/3231631_Marine_Navy_spec_20V8000M71-L_1B_1.pdf/_jcr_content/renditions/original./3231631_Marine_Navy_spec_20V8000M71-L_1B_1.pdf

38. García Soutullo R. Normativa, Tecnologías y Modificaciones para Reducir las Emisiones [Internet]. Ingeniero Marino. 2014 [citado 18 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://ingenieromarino.com/normativa-tecnologias-y-modificaciones-para-reducir-las-emisiones-de-sox-y-nox-a-la-atmosfera/>
39. MTU Solutions. Ficha Técnica MTU 12V2000 [Internet]. [citado 7 de junio de 2021]. Disponible en: https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/products/power-generation/diesel/50-hz/mtu-2000-ds_750-1400-kva/3239591_PG_spec_12V2000DS1000_1010kVA_3D_50Hz.pdf/_jcr_content/renditions/original./3239591_PG_spec_12V2000DS1000_1010kVA_3D_50Hz.pdf
40. Stamford. HCM634H - Hoja de datos técnicos de bobinado 311 y 312.
41. Padilla Álvarez JD, Cáceres Méndez I. SISTEMA DE GOBIERNO, ESTABILIZACIÓN Y WATERJET EN EMBARCACIONES RÁPIDAS “BENCHIJIGUA Y BONANZA EXPRESS” [Internet]. [citado 10 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/3584/SISTEMA%20DE%20GOBIERNO,%20ESTABILIZACION%20Y%20WATERJET%20EN%20EMBARCACIONES%20RAPIDAS.%20%BFBENCHIJIGUA%20Y%20BONANZA%20EXPRESS%BF.pdf;jsessionid=BCF974834A615A8355BD73F5477927A6?sequence=1>
42. Atersa. Placa Solar policristalina 335W y 24V ATERSA GS [Internet]. [citado 20 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://atersa.shop/panel-solar-a-335p-gs/>
43. Atersa. Módulos fotovoltaicos para el futuro [Internet]. [citado 20 de marzo de 2021]. Disponible en: [https://atersa.shop/app/uploads/2019/06/MU-6P%206x12-GS%20\(WW\)%20\(2\)-A.pdf](https://atersa.shop/app/uploads/2019/06/MU-6P%206x12-GS%20(WW)%20(2)-A.pdf)
44. Solar J. JUST solar 460W Mono PERC - Panel Solar de alta eficiencia 9 bus bar [Internet]. [citado 21 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://suministrodelsol.com/es/paneles-72-cel-144-cel/917-just-solar-460w-mono-perc-144-hc-modulo-alta-eficiencia.html>
45. Solar jinko. Panel Solar Jinko 405W Cheetah Mono Perc HC 144M | Jinko Monocristalino [Internet]. [citado 21 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://suministrodelsol.com/es/paneles-solares-especiales/827-panel-solar->

jinko-405w-cheetah-hc-144m.html

46. Solar J. FICHA TÉCNICA JST460M (1).pdf [Internet]. Google Docs. [citado 22 de marzo de 2021]. Disponible en:

https://drive.google.com/file/d/1HQFzFMzPyFUZddhIGL0t9EIBidGAsy-/view?usp=sharing&usp=embed_facebook

47. Solar jinko. ficha-tecnica-Cheetah JKM390-410M-72H-(V) (1).pdf

[Internet]. Google Docs. [citado 22 de marzo de 2021]. Disponible en:

https://drive.google.com/file/d/1pPRt8u_ZoAAH8vfZ0fFsfuX4F0QbipL_/view?usp=embed_facebook

48. International Electrotechnical Commission, Technical Committee 64. Low-voltage electrical installations. Part 7-712, Partie 7-712, Part 7-712, Partie 7-712,. 2017.

49. Tuvain S.A. Tarifa Energías Renovables 2021 [Internet]. [citado 10 de abril de 2021]. Disponible en: https://www.tuvain.es/wp-content/uploads/2021/01/tarifa-renovables-2021_marca-de-agua_logo.pdf

50. Aplisun Develop. Sistema de estructura C40 [Internet]. [citado 10 de abril de 2021]. Disponible en:

https://www.aunadistribucion.com/uploads/renovables/manuales/125328_aps01000070-m.pdf

51. Blog Metrar. Los beneficios del anodizado de aluminio [Internet]. Metrar.

2019 [citado 10 de abril de 2021]. Disponible en: <https://metrar.com.ar/blog/los-beneficios-del-anodizado-de-aluminio/>

52. DNV GL. Part 4 Systems and components: Chapter 8 Electrical installations [Internet]. [citado 13 de abril de 2021]. Disponible en:

<https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2020-07/DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch8.pdf>

53. AutoSolar. Inversor 200Kva Riello Sirio K200 | al Mejor Precio [Internet].

[citado 21 de abril de 2021]. Disponible en: <https://autosolar.es/inversores-de-red-trifasicos/inversor-200kva-riello-sirio-k200>

54. Aros Solar. Ficha técnica inversores centralizados 12-250 kW [Internet].

[citado 21 de abril de 2021]. Disponible en: https://autosolar.pe/pdf/FICHA-TECNICA-2015_SIRIO-CENTRALES-IMD-Y-HV.pdf

55. Alonso Lorenzo JA. Cálculo Placas Solares, Conexiones y Producción Fotovoltaica [Internet]. [citado 22 de abril de 2021]. Disponible en:

<https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/calcular-paneles-solares-necesarios/>

56. Manumag. Catalogo Transformadores Manumag [Internet]. [citado 23 de abril de 2021]. Disponible en: http://www.manumag.com/wp-content/uploads/2018/07/Catalogo_Manumag.pdf

57. TOPCABLE. Catálogo cable solar TOPCABLE [Internet]. [citado 25 de abril de 2021]. Disponible en: <http://www.cabletelandalucia.com/assets/zzf-top-cable.pdf>

58. Afirenas X RZ1-K(AS) 0,6/1 kV | Miguélez - Cables Eléctricos [Internet]. [citado 25 de abril de 2021]. Disponible en:

<https://www.miguellez.com/es/afirenas-x-rz1-kas-061-kv>

59. INE. Anuario estadístico de España [Internet]. [citado 26 de abril de 2021]. Disponible en:

https://www.ine.es/prodyser/pubweb/anuario20/anu20_completo.pdf

60. Mayor HG. Estabilidad del Buque I: Criterios Generales de Estabilidad OMI [Internet]. Estabilidad del Buque I. 2011 [citado 1 de mayo de 2021]. Disponible en: <http://estabilidadbuque.blogspot.com/2012/04/criterios-generales-de-estabilidad-omi.html>

61. Aplitech. Especificaciones técnicas perfil C40 [Internet]. [citado 3 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.aplitech-energy.com/wp-content/uploads/2020/09/S1C700000017-PE.-C40-A-3100-AN.-CON..pdf>

62. SMA SCCB-52-3R - 52 Input Combiner Box - NEMA 3R Enclosure [Internet]. [citado 3 de mayo de 2021]. Disponible en:

<https://www.ecodirect.com/product-p/sma-combiner-box-sccb-52.htm>

63. Mayor HG. Estabilidad del Buque I: Centroides y el Centro de Gravedad. [Internet]. Estabilidad del Buque I. 2011 [citado 4 de mayo de 2021]. Disponible en: <http://estabilidadbuque.blogspot.com/2011/07/centroides-y-el-centro-de-gravedad.html>

64. Europea C. JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission [Internet]. [citado 16 de mayo de 2021]. Disponible en: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#

65. S.A FO. Horarios | Fred. Olsen [Internet]. Fred Olsen. [citado 17 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.fredolsen.es/es/comprar/horarios>

66. S.A FO. Horarios | Fred. Olsen [Internet]. Fred Olsen. [citado 17 de mayo

de 2021]. Disponible en: <https://www.fredolsen.es/es/comprar/horarios>

67. OMI. Resolución MEPC.308(73): 2018 GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ATTAINED ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX (EEDI) FOR NEW SHIPS [Internet]. [citado 23 de mayo de 2021].

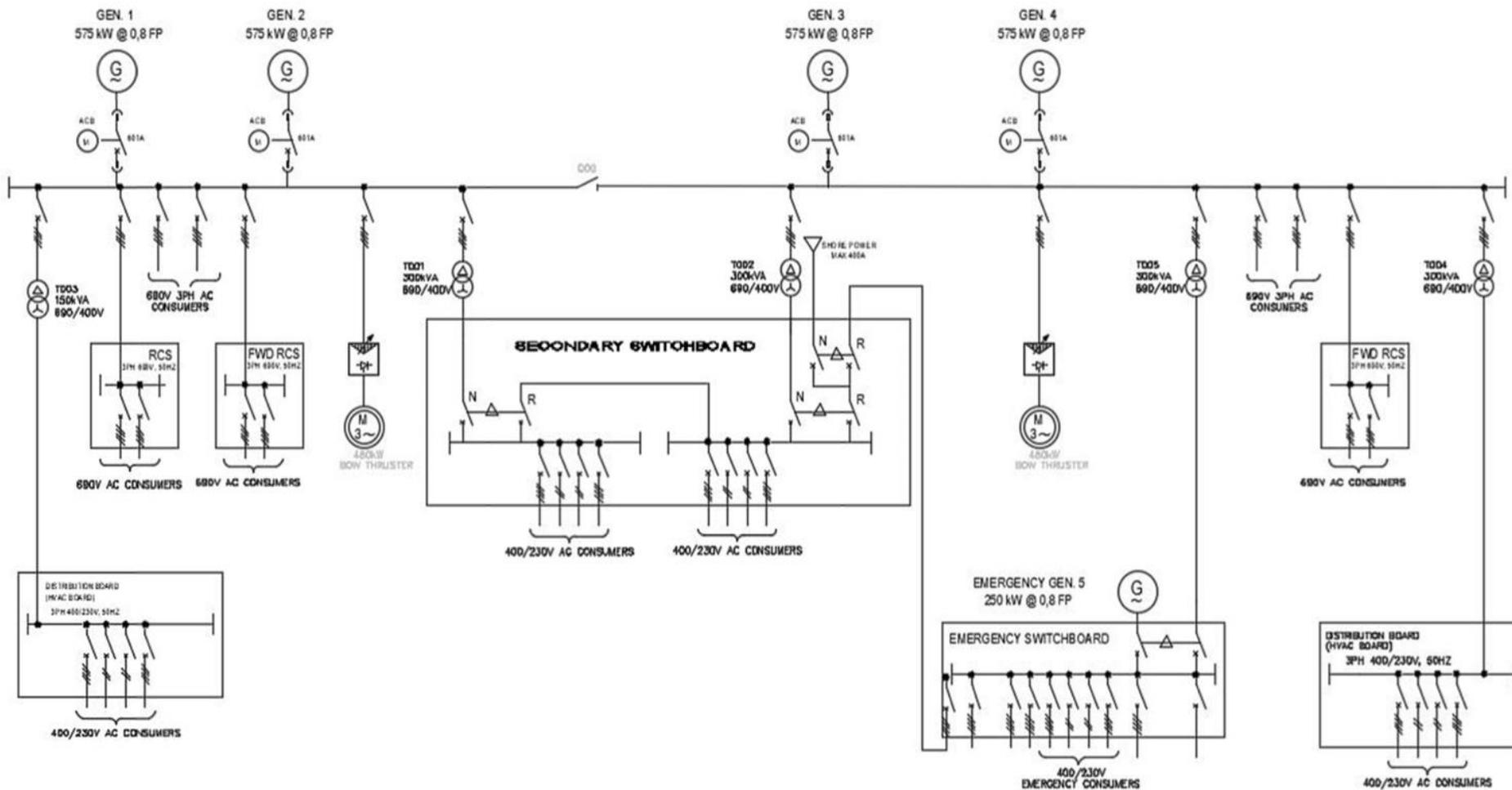
Disponible en:

[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.308\(73\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.308(73).pdf)

68. EMEA Average Bunker Prices [Internet]. Ship & Bunker. [citado 27 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://shipandbunker.com/prices/av/region/av-eme-emea-average>

ANEXO I

Esquema de distribución eléctrica del “Benchijigua Express” previo a la instalación fotovoltaica (22).



ANEXO II

Esquema de distribución eléctrica del “Benchijigua Express” con la instalación fotovoltaica dimensionada (22, modificado).

