

...
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



TESIS

**“DISEÑO PRELIMINAR DE UN CATAMARÁN HIBRIDO
SOLAR DE 130 KW DE POTENCIA INSTALADA, PARA EL
TRANSPORTE DE PASAJEROS EN EL RIO AMAZONAS”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO NAVAL**

**ELABORADO POR:
MIGUEL ALCIDES CUEVA HUAMALIES**

**ASESOR
MSc. VICTOR NILO ACOSTA PASTOR
LIMA – PERÚ
2019**

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres, porque han sabido brindarme su apoyo y confianza para llegar a ser un ciudadano, un valioso hijo y profesional dedicado.

A mi tío Javier que tuvo un rol protagónico en mi formación.

A mi hermana Dámaris, quien dejó de lado sus sueños para poder brindarme los míos.

A mis amigos, los pocos y muy valiosos.

Al Ing. Oscar Bernabé quien dirigió en primera instancia este trabajo.

A mis compañeros de clase con quienes puede compartir valiosas experiencias, ideas de proyectos y sueños prometedores.

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento especial a mis padres, mis hermanos y mis amigos. Todos y cada uno de ellos representan piezas fundamentales y tesoros invaluableles.

Si un hombre no está agradecido por lo que tiene, es probable que no sea agradecido por lo que tendrá. Por ello, no deje de dar las gracias a todos y cada uno de mis cercanos, y con mayor consideración a Dios, por este y todos los futuros logros que tendré.

A todos ellos, mi agradecimiento eterno.

RESUMEN

El transporte fluvial, representa el principal medio natural para transporte de mercaderías y pasajeros en la cuenca de los ríos navegables del Amazonía; que permiten el intercambio comercial entre los pueblos y ciudades ribereñas. Las embarcaciones y buques que realizan estas actividades de navegación y comercio presentan limitaciones tecnológicas y una lamentable improvisación que pone en riesgo la operación y la seguridad de la carga, los pasajeros y de su tripulación.

Por otro lado, el empleo de combustibles fósiles para el uso de motores de combustión interna constituye un factor directo y agravante de la contaminación atmosférica y sonora, afectando al medio, la tranquilidad de la vida silvestre de la zona y la propia naturaleza donde se desarrolla esta actividad.

La OMI, en su calidad de organismo especializado de las Naciones Unidas, tiene como misión fomentar, a través de la cooperación, un transporte marítimo seguro, protegido, ecológicamente racional, eficiente y sostenible, viene desarrollando diversas recomendaciones mundiales para la seguridad de la vida humana en el mar y cuidado del medio ambiente marítimo. Asimismo, en el año 2015, los países miembros de la OMI, mediante la adopción de la “Agenda 2030 para el desarrollo sostenible” y sus 17 objetivos, seguido de la entrada en vigor del Acuerdo de París (2016) sobre “Cambio Climático”, que obedece a la limitación de emisiones y la puesta en marcha de acciones tangibles para disminuir el aumento de la temperatura global, en tal sentido, el Perú deben generar propuestas tecnológicas que pongan en práctica las recomendaciones y acuerdos pactados, en donde nuestro país es miembro y firmante de dichos acuerdos.

Por ello, considerando los objetivos al 2030 como la lucha contra el cambio climático, la innovación en las infraestructuras, la protección de la vida submarina, el uso de energías renovables, el consumo y desarrollo sostenible, la preservación de flora y fauna en todo nivel y, el desarrollo de ciudades y comunidades sostenibles hemos propuesto una embarcación que contribuya al cumplimiento de estos objetivos en la cuenca navegable del Amazonas.

El presente trabajo es una propuesta sobre la aplicación de la energía solar, como fuente de energía empleado para la propulsión de una embarcación para el transporte de pasajeros, cuyas principales ventajas e impacto, están referidas a la reducción de ruido y la disminución de la contaminación atmosférica. En la actualidad, alrededor del 100 % de la flota fluvial peruana, emplea combustibles fósiles como medio de energía principal para su propulsión, cuyas emisiones de gases producto de la combustión, contienen óxido de azufre (SO_x), óxido de nitrógeno (NO_x), CO₂ y sustancias agotadoras del ozono.

Este trabajo se centra en la investigación y elaboración del proyecto preliminar de una embarcación fluvial para el transporte de pasajeros, cuya principal fuente energética es la energía solar fotovoltaica, mediante paneles solares y baterías se alimenta dos (02) motores eléctricos, además de contar con dos (02) generadores auxiliares de emergencia, se logra cubrir la demanda energética total de la embarcación para una velocidad de crucero de 8 nudos y con un rango de operación entre 6.0 - 9.5 nudos, considerando una velocidad en contracorriente de hasta 3.5 nudos, para una autonomía diaria de 5 horas de navegación continua.

Nuestra propuesta cumple con las recomendaciones y requerimientos técnicos del diseño naval tales como los expuestos en la norma NR 217 Rules for the Classification of Inland Navigation Vessels (Edition 2017), regulaciones de la MARPOL – OMI (Anexo VI y V), disposiciones del Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar (SOLAS - Capítulo II, III y IV) y regulaciones de la autoridad nacional, según corresponda. Cabe señalar que las recomendaciones del MARPOL y SOLAS emitidos por la OMI, son de aplicación exclusiva marítima. Sin embargo, tomaremos sus recomendaciones como exigencias para nuestro diseño preliminar.

El diseño preliminar cubre con las exigencias básicas y principales de la ingeniería naval como es el desarrollo de la disposición general, desarrollo de las líneas de forma, el escantillado de los elementos estructurales, análisis torsional y estructural de la embarcación bajo el modelo de viga-buque, la predicción de potencia en aguas rasas, planta de máquinas y la selección del equipamiento para los sistemas de propulsión, gobierno, achique, lastre y contraincendios, el análisis de estabilidad intacta, el análisis

de viabilidad económico y el cálculo de reducción de emisiones y huella de carbono de acuerdo a la guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Se ha tenido en especial consideración el balance energético (la factibilidad operativa del sistema fotovoltaico, garantizando la demanda energética en cualquier condición de trabajo) y el enfoque de energías renovables.

Palabras clave: Sistemas fotovoltaicos, catamaranes ecológicos, embarcaciones híbridas, energías renovables.

ABSTRACT

River transport represents, one of the main natural means of transporting cargo and passengers in the watershed of the navigable rivers of the Peruvian Amazon; that allow the commercial exchange between towns and riverside cities. The boats and vessels that perform these navigation and trade activities have technological limitations and one would be lamentable improvisation that puts the safety of the cargo, the passengers and the crew itself at risk. On the other hand, the use of fossil fuels for the use of internal combustion engines is a direct and ingravescient factor in atmospheric and noise pollution, affecting the environment, the tranquility of wildlife in the area and the very nature where this activity takes place.

IMO, as a specialized agency of the United Nations, has as its mission to promote, through cooperation, safe, protected, ecologically sound, efficient and sustainable maritime transport, it has developed various global recommendations for the safety of human life at sea and maritime environmental protection. Likewise, in 2015 member countries IMO assuming the objectives to "2030 Agenda for sustainable development", and his 17 goals, followed by the entry into force of the Paris Agreement (2016) on "Climate Change", which is due to the limitation of emissions and the implementation of tangible actions to reduce the increase in global temperature in such Accordingly, Peru must generate technological proposals to implement the recommendations and agreements made, where our country is a member and signatory of these agreements.

Therefore considering the 2030 goals as the fight against climate change, innovation in infrastructure, the protection of underwater life, the use of renewable energy, consumption and sustainable development, the preservation of flora and fauna at all levels and, the development of sustainable cities and communities, we have proposed a vessel that contributes to the fulfillment of these objectives in the Amazon's navigable watershed.

The present work is a proposal on the application and use of clean and renewable solar energy, as an energy medium used for the propulsion of passenger transport vessels, mainly achieving the reduction of noise and a reduction in atmospheric pollution; that currently 100% of the Peruvian fluvial fleet generates with the use of conventional vessels whose emissions of sulfur oxide (SO_x), nitrogen oxide (NO_x), CO₂ and ozone-depleting substances are from the use of fossil fuels; allowing transport to achieve sustainable development in three dimensions: the economy, the environment and social.

We have focused on the research and development of the preliminary draft of a inland passengers vessel, powered by two electric motors powered by a photovoltaic generation system by solar panels and batteries are powered by two (02) electric motors, in addition to two (02) auxiliary emergency generators, covering the total energy demand of the boat for a speed of cruise of 8 knots and with an operating range between 6.0 - 9.5 knots, in calm waters, countercurrent considering a speed up to 3.5 knots, for an autonomy of 5 hours of continuous navigation.

The proposed vessel complies with the technical design requirements of the NR 217 Rules for the Classification of Inland Navigation Vessels (Edition 2017), MARPOL - IMO regulations (Annex VI and V) and provisions of the International Convention for the Safety of human life at sea (SOLAS - Chapter II, III and IV) and regulations of the national authority, as appropriate. It should be noted that the MARPOL and SOLAS recommendations issued by the IMO are of exclusive maritime application. However, we will take your recommendations as requirements for our preliminary design.

The preliminary design covers the basic and main requirements of naval engineering such as the development of the general layout, development of the lines of shape, the scantling of the structural elements, torsional and structural analysis of the vessel under the beam-ship model, the prediction of power in water races, plant of machines and the selection of equipment for propulsion, government, bailing, ballasting and fire-fighting systems, intact stability analysis, economic feasibility, analysis and calculation of emissions reduction and carbon footprint according to the practical guide for the calculation of greenhouse gas (GEI) emissions. The energy balance has

been taken into special consideration (the operational feasibility of the photovoltaic system, guaranteeing energy demand in any working condition) and the renewable energy approach.

Keywords: Photovoltaic systems, ecological catamarans, hybrid vessels, renewable energies.

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	
1.1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.2. ANTECEDENTES	4
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
1.4. OBJETIVO	17
1.5. HIPÓTESIS	17
1.6. JUSTIFICACIÓN.....	17
1.7. ALCANCE	18
1.8. METODOLOGÍA	19
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	
2.1. MARCO CONCEPTUAL.....	22
2.2. FUNDAMENTOS DEL DISEÑO DE EMBARCACIONES.....	61
CAPÍTULO III CÁLCULOS Y/O APLICACIONES Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS	
3.1. CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO.....	126
3.2. PERFIL DE MISIÓN Y ENFOQUE CONCEPTUAL.....	130
3.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	134
3.4. CONSIDERACIONES ESPECIALES	139
3.5. DIMENSIONES PRINCIPALES.....	140
3.6. LINEAS DE FORMAS	161
3.7. DISPOSICIÓN GENERAL	166
3.8. CÁLCULOS DE ARQUITECTURA NAVAL	173
3.9. CÁLCULO DE RESISTENCIA AL AVANCE	180
3.10. PLANTA PROPULSORA Y CÁMARA DE MAQUINAS.....	192
3.11. EQUIPOS Y SERVICIOS	217
3.12. PLANTA ELÉCTRICA	241
3.13. RESISTENCIA ESTRUCTURAL.....	282
3.14. PESOS Y CENTRO DE GRAVEDAD	303

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Demanda nacional de combustibles líquidos por regiones	13
Figura 1.2.- Dimensiones del desarrollo sostenible	15
Figura 1.3.- Espiral de diseño dentro del desarrollo de un proyecto naval	20
Figura 2.1.- Barco solar Marine Parka	22
Figura 2.2.- Buques de tipo monocasco	23
Figura 2.3.- Planet Solar: buque trasatlántico tipo catamarán	24
Figura 2.4.- Buque de alta velocidad tipo trimarán	25
Figura 2.5.- Sunrider 2009	26
Figura 2.6.- DSe Island Pilot Hybrid	27
Figura 2.7.- Humber Foton	27
Figura 2.8.- Embarcación Transatlántica Sun 21	28
Figura 2.9.- Embarcación Solemar 3.0	29
Figura 2.10.- Estructura de un panel solar	31
Figura 2.11.- Comportamiento al unir semiconductores tipo P y N de Silicio	31
Figura 2.12.- Estructura de un panel y celda solares.	32
Figura 2.13.- Esquema de componentes de la embarcación solar	36
Figura 2.14.- Partes básicas de una placa solar fotovoltaica	38
Figura 2.15.- Tipos de paneles fotovoltaicos	40
Figura 2.16.- Curva de máxima potencia del panel solar BP585	42
Figura 2.17.- Ciclos de vida - Profundidad de descarga en baterías de Pb-Ad	44
Figura 2.18.- Ciclos de vida - Profundidad de descarga en baterías de Ni-Cd	48
Figura 2.19.- Densidad energética media de diferentes tipos de baterías	51
Figura 2.20.- Esquema de un motor de imanes permanentes	54
Figura 2.21.- Motor de imanes permanentes	55
Figura 2.22.- Diagrama de flujo - Variador de frecuencia	57
Figura 2.23.- Esquema de un variador de frecuencia	57
Figura 2.24.- Variador de Frecuencia con Modulación (PWM)	58
Figura 2.25.- Esquema general de un variador de frecuencia trifásico	60
Figura 2.26.- Regresión Lineal - B: f (L)	63
Figura 2.27.- Características de los modelos de la serie Southampton	64

Figura 2.28.- Esquema de proporciones para Series Sistemáticas	65
Figura 2.29.- Áreas de Pasaje – Buque tipo catamarán	67
Figura 2.30.- Disposición general – SEACAT 20	68
Figura 2.31.- Formas de secciones de catamaranes	70
Figura 2.32.- Líneas de Forma – Plano de secciones transversales	73
Figura 2.33.- Curvas Hidrostáticas de un buque	76
Figura 2.34.- Inclinaciones Transversales - Curvas Cruzadas	77
Figura 2.35.- Esquema de Esloras inundables	78
Figura 2.36.- Modelos de cuadernas de varios modelos	87
Figura 2.37.- Estructura de cuaderna típica de un Catamarán	99
Figura 2.38.- Esquema del modelamiento Viga – Buque	101
Figura 2.39.- Esquema de Quebranto y Arrufo	102
Figura 2.40.- Condición del buque en Quebranto	103
Figura 2.41.- Condición del buque en Arrufo	104
Figura 2.42.- Distribución de Presión Hidrostática	105
Figura 2.43.- Deformación Transversal	106
Figura 2.44.- Modelamiento de cargas en la Viga – buque	107
Figura 2.45.- Vientos y balance intenso	122
Figura 2.46.- Angulo de inundación	123
Figura 3.1.- Mapa de la reserva Pacaya-Samiria en la región de Loreto	131
Figura 3.2.- Panel solar fotovoltaico - SUNPOWER X21-345	145
Figura 3.3.- Regresión Lineal	149
Figura 3.4.- Coeficiente Prismático	159
Figura 3.5.- Cuadernas C2, C5 y C7	163
Figura 3.6.- Curva Resistencia Total Vs. Velocidad	192
Figura 3.7.- Curva de potencia estimada para el motor – BHP vs V	194
Figura 3.8.- Esquema de propulsión DC	195
Figura 3.9.- Esquema de propulsión AC	196
Figura 3.10.- Distancias de protección para la hélice	201
Figura 3.11.- Gráfico de paso, método de Gerr	203
Figura 3.12.- Diámetro de hélice, según Gerr	203
Figura 3.13.- Curva K_t vs J^2	210

Figura 3.14.- Timón soportado por talón de codaste	211
Figura 3.15.- Paneles fotovoltaicos con estructura despegable	254
Figura 3.16.- Características técnicas del panel SUNPOWER X22-360	258
Figura 3.17.- Distribución de paneles solares	260
Figura 3.18.- Esquema de conexión de paneles	261
Figura 3.19.- Esquema de proceso de carga	268
Figura 3.20.- Características del generador	274
Figura 3.21.- Consumo de combustible	275
Figura 3.22.- Dimensiones finales del generador	276
Figura 3.23.- Esquema general de conexión eléctrica	279
Figura 3.24.- Perfiles comerciales típicos	288
Figura 3.25.- Esquema para el cálculo torsional	291
Figura 3.26.- Sección compuesta del puente de conexión	293
Figura 3.27.- Diagrama de fuerzas cortantes en condición liviano	298
Figura 3.28.- Diagrama de momento flector en condición liviano	298
Figura 3.29.- Diagrama de fuerza cortante - Máxima carga	299
Figura 3.30.- Diagrama de momento flector - Máxima carga	299
Figura 3.31.- Factor de distribución	301

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.- Características de las Embarcaciones actuales destinadas al servicio de cruceros turísticos en la selva	6
Tabla 1.2.- Embarcaciones solares más representativas en el mundo	8
Tabla 2.1.- Aplicaciones de los sistemas aislados	34
Tabla 2.2.- Características de los diferentes tipos de baterías	50
Tabla 2.3.- Data para el método de regresión lineal	63
Tabla 2.4.- Proporciones y relaciones	63
Tabla 2.5.- Áreas de Pasaje – Buque tipo PAX.	66
Tabla 2.6.- Métodos de predicción de resistencia en catamaranes	81
Tabla 2.7.- Factor de forma del monocasco, Armstrong (2000)	83
Tabla 2.8.- Factor de forma de catamaranes	84
Tabla 2.9.- Coeficientes de regresión para ecuación del factor de forma	85
Tabla 2.10.- Parámetros Geométricos	86
Tabla 2.11.- Hidrostáticas de la serie sistemática	86
Tabla 2.12.- Coeficientes de regresión para ecuación C_w Mono	88
Tabla 2.13.- Coeficientes de regresión para ecuación C_w Cat	88
Tabla 2.14.- Coeficientes de regresión para ecuación	90
Tabla 2.15.- Demanda DC	94
Tabla 2.16.- Símbolos de acuerdo con NR 217 B	109
Tabla 2.17.- Coeficientes y Símbolos de acuerdo con NR 217 B	110
Tabla 2.18.- Presiones de acuerdo con NR 217 B	111
Tabla 2.19.- Presiones laterales de diseño de planchas	111
Tabla 2.20.- Presiones laterales de diseño	112
Tabla 2.21.- Presiones laterales de diseño para costado y estructuras superiores	113
Tabla 2.22.- Fórmulas para el cálculo de presiones	114
Tabla 2.23.- Fórmulas para el cálculo de presión en cubiertas expuestas	114
Tabla 2.24.- Fórmulas para el cálculo de presión de olas	115
Tabla 2.25.- Fórmulas para el cálculo de presión en líquidos	116
Tabla 2.26.- Fórmulas para el cálculo de presión – Otros	117
Tabla 2.27.- Presión de aguas tranquilas transmitida a cubierta	117

Tabla 2.28.- Fórmulas para el cálculo de planchas del casco	118
Tabla 2.29.- Fórmulas para el cálculo de elementos del casco	119
Tabla 3.1.- Casco y Maquinaria – Forma de Inspección y Certificación	128
Tabla 3.2.- Cumplimiento de las Reglas, período de clase y equipos	129
Tabla 3.3.- Relación de peso / material elegido	134
Tabla 3.4.- Materiales seleccionados	135
Tabla 3.5.- Proceso para la selección de las dimensiones principales	141
Tabla 3.6.- Requerimientos del diseño	142
Tabla 3.7.- Base de datos para Regresión Lineal	147
Tabla 3.8.- Relaciones geométricas	148
Tabla 3.9.- Relaciones geométricas - Serie Sahoo, Browne y Salas	151
Tabla 3.10.- Rango de relaciones geométricas preliminares	151
Tabla 3.11.- Dimensiones típicas de posibles equipos a instalar	154
Tabla 3.12.- Peso estimado de acuerdo con NR 217	158
Tabla 3.13.- Dimensiones preliminares elegidas	161
Tabla 3.14.- Dimensiones y características principales	165
Tabla 3.15.- Esloras Inundables obtenidas	168
Tabla 3.16.- Compartimentado adoptado	172
Tabla 3.17.- Asignación de espacios.	173
Tabla 3.18.- Características Hidrostáticas.	174
Tabla 3.19.- Resumen de capacidades y volúmenes	179
Tabla 3.20.- Interpolación del factor de forma	181
Tabla 3.21.- Parámetros para la regresión	181
Tabla 3.22.- Coeficientes para la estimación del C_w Cat	182
Tabla 3.23.- Valores de resistencia calculada	183
Tabla 3.24.- Valores de resistencia calculada para varios métodos	185
Tabla 3.25.- Valores de resistencia en aguas tranquilas	186
Tabla 3.26.- Valores de resistencia en aguas razas	188
Tabla 3.27.- Parámetros para el cálculo de la hélice	190
Tabla 3.28.- Valores de Resistencia Total	191
Tabla 3.29.- Valores de la potencia estimada del motor BHP vs. V	193
Tabla 3.30.- Ventajas y desventajas de motores eléctricos	197

Tabla 3.31.- Valores para el cálculo del eje de propulsión	200
Tabla 3.32.- Distancias de protección de la hélice	202
Tabla 3.33.- Ajustes para paso y diámetro de hélices	204
Tabla 3.34.- Datos para el cálculo de BAR mínimo de la hélice	208
Tabla 3.35.- BAR requerido de la hélice	208
Tabla 3.36.- Valores de K_t Vs. J^2	209
Tabla 3.37.- Características de la Hélice	210
Tabla 3.38.- Valores para el cálculo de la fuerza actuante en el Timón	214
Tabla 3.39.- Valores para el cálculo del momento actuante en el Timón	214
Tabla 3.40.- Valores para el cálculo del diámetro mínimo	215
Tabla 3.41.- Valores para el cálculo del espesor mínimo	216
Tabla 3.42.- Longitud equivalente de los elementos	219
Tabla 3.43.- Resumen para protección catódica	225
Tabla 3.44.- Ubicación para protección catódica	225
Tabla 3.45.- Desempeño de recubrimientos	227
Tabla 3.46.- Desempeño de los sistemas de pinturas – ISO 12944	227
Tabla 3.47.- Plan de pintado propuesto	228
Tabla 3.48.- Tipos de anclas reconocidas	235
Tabla 3.49.- Servicios en función de tipo corriente	242
Tabla 3.50.- Cuadro de cargas DC	244
Tabla 3.51.- Cuadro de cargas AC	245
Tabla 3.52.- Cuadro de cargas – Parte I	248
Tabla 3.53.- Cuadro de cargas – Parte II	249
Tabla 3.54.- Energía eléctrica a generar por el sistema fotovoltaico	251
Tabla 3.55.- Características del panel SUNPOWER X22-360	259
Tabla 3.56.- Índice de radiación solar	263
Tabla 3.57.- Características de la batería seleccionada	272
Tabla 3.58.- Tabla para la selección del diámetro de conductores	278
Tabla 3.59.- Características del aluminio 5083-H111	282
Tabla 3.60.- Presiones estimadas	284
Tabla 3.61.- Área seccional de cubierta resistente	285
Tabla 3.62.- Espesores mínimos de planchas del casco	286

Tabla 3.63.- Características de los perfiles solicitados	287
Tabla 3.64.- Características de los perfiles seleccionados	288
Tabla 3.65.- Escantillonado final	289
Tabla 3.66.- Fórmulas y símbolos para el análisis torsional del catamarán	290
Tabla 3.67.- Momento de conexión torsional transversal	292
Tabla 3.68.- Cálculo torsional del catamarán	295
Tabla 3.69.- Cálculo de esfuerzos en el puente de conexión	296
Tabla 3.70.- Momentos flectores estimados	297
Tabla 3.71.- Esfuerzos de sección maestra	302
Tabla 3.72.- Resumen de pesos y centro de gravedad	305

PRÓLOGO

La cuenca hidrográfica del Amazonas permite el desarrollo de las comunidades nativas, centros poblados y principales puertos fluviales alrededor de los ríos. El comercio, transporte y el turismo se convierten en los principales impulsores de desarrollo a través del transporte de pasajeros, mercancías, combustibles, cargas a granel, madera, animales y otros similares, atrayendo inversiones y demandando tecnología.

Desde el 2007 el gobierno peruano busca impulsar el desarrollo de las regiones en base a la diversificación de las actividades y productos de cada región. De esta manera, la selva peruana, ha crecido económicamente por diversas fuentes, destacado el turismo y el transporte de mercancías vía fluvial. Sin embargo, este crecimiento ha dejado de lado el cuidado ambiental y ha permitido la inseguridad y el poco desarrollo tecnológico en dichas actividades económicas.

Lastimosamente, las actividades económicas en la amazonia peruana como el turismo y transporte de carga, hasta nuestros días, presentan diversas barreras para alcanzar un desarrollo sostenible tanto en lo social, económico, técnico y ambiental, que durante décadas se han sumado a la ausencia del estado incurriendo en el desarrollo deficiente; en donde los pobladores locales han desarrollado sus propias y marcadas tecnologías en la construcción de embarcaciones destinadas al transporte de pasajeros y de turismo, por lo que sus características y deficiencias técnicas son similares en toda la zona de la cuenca peruana del Amazonas.

Hasta la fecha, solo se cuenta como principal fuente de energía el uso de combustibles fósiles y el empirismo técnico en la construcción de sus embarcaciones; trayendo como consecuencia la contaminación de atmosférica por residuos fósiles y sonoros, afectando el ecosistema natural del Amazonas. A pesar de los intentos del gobierno

central, el cambio se ha tornado lento y reacio, esto como resultado de la falta de propuestas viables, los paradigmas mentales y el desinterés de las autoridades regionales.

Esta tesis propone una embarcación que responda a las necesidades del mercado actual del turismo minimizando el impacto ambiental. Esta embarcación plantea el uso de la energía solar en reemplazo de los motores de combustión diésel, para minimizar la emisión de NO_x, CO y CO₂, enfatizando cinco (05) puntos principales: el diseño conceptual, las energías renovables, la estabilidad, la rentabilidad económica y el impacto ambiental.

El capítulo I presenta los antecedentes, el planteamiento del problema, los objetivos, la metodología, el alcance, las especificaciones, el perfil y la misión operativa del buque considerando las limitantes técnicas y las normativas vigentes.

El capítulo II presenta el marco teórico desarrollando los conceptos claves de la generación y aplicación de la energía solar y los fundamentos del diseño de buques, criterios técnicos y normativas importantes en los buques de pasaje.

El capítulo III constituye el cuerpo central del diseño de la embarcación propuesta. Las dimensiones principales, la disposición general, las líneas de forma, el cálculo propulsivo, el dimensionamiento de sistemas, el balance de cargas, el cálculo del sistema eléctrico, la resistencia estructural y el balance de pesos son desarrollados para definir completamente la embarcación propuesta.

La estabilidad de la embarcación, el análisis económico y el impacto ambiental son analizadas en el Capítulo IV. Se presenta un análisis de las condiciones de carga, las variables económicas y la huella de carbono para que el diseño pueda definirse como un proyecto seguro en toda condición de carga, rentable y ecológicamente sostenible.

Asimismo, se presentan las respectivas conclusiones, recomendaciones y las referencias bibliográficas utilizadas para la elaboración de la presente tesis.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

La selva Amazónica ha sido catalogada desde hace años como “el pulmón del mundo”, pero no solo es una región atractiva para el desarrollo de diversas actividades económicas como el turismo, en donde sus ríos, la diversidad de flora y fauna, la naturaleza y la poca o casi nula presencia del hombre son el atractivo principal y el medio geográfico que permite el desarrollo del turismo nacional e internacional en la región.

En nuestro caso y para nuestra propuesta técnica, las condiciones climatológicas de la región (clima tropical, con presencia de radiación solar y temperaturas cercanas a los 35°C) son favorables durante casi todo el año, lo que asegura una fuente de radiación solar favorable para el uso de tecnologías híbridas fotovoltaicas, que pueden ser empleadas como fuente de energía para las embarcaciones de pasajeros, las mismas que no dañan el ecosistema natural de la zona, como la emisión de gases contaminantes y ruidos.

De acuerdo con el Ministerio del Comercio Exterior y Turismo (MINCETUR), uno de los mayores destinos turísticos del país es la Amazonia peruana, y en especial las reservas nacionales y comunidades nativas, lo que representa una oportunidad para el desarrollo de las comunidades y el contacto con la naturaleza.

El presente trabajo desarrolla una embarcación prototipo para operar dentro de las rutas turísticas hacia la Reserva de Pacaya - Samiria¹ y poblados cercanos, con capacidad para transportar hasta 50 pasajeros con el confort y la seguridad requerida para esta actividad.

1.2. ANTECEDENTES

El transporte de pasajeros en la selva amazónica desde hace más de 40 años ha sido dominado por cruceros y motonaves fluviales propulsados por motores diésel. Todas estas propuestas han circulado en el medio, presentando variantes estéticas y limitadas propuesta tecnológicas.

Desde la década pasada, el gobierno peruano viene adoptando medidas políticas (legales, marcos normativos, leyes, etc.) para mejorar no solo el panorama político naval, además, pretende mejorar las condiciones de navegabilidad en la región norte de la selva peruana e impulsar el desarrollo fluvial para la carga y transporte de pasajeros. Estos planes de inversión permitirán realizar obras que garanticen la navegación de embarcaciones de mayor capacidad de carga y mayores calados reduciendo los costos de operación y tiempo de navegación a través de las vías navegables, de esta manera se sienta precedentes en el entorno político y desarrollo potencial en la región norte de la selva.

Los principales proyectos de nuevas naves y la concentración de embarcaciones turísticas se encuentran en la cuenca del Amazonas. Siendo el denominado turismo vivencial, uno de los más solicitados. Este tipo de turismo pone en contacto al turista con el entorno, permitiéndole vivir una experiencia cercana como comer, realizar actividades en la comunidad, dormir y convivir con la población en el mismo lugar.

En los últimos años, la creciente demanda turística en la región Loreto (solo en la reserva de Pacaya-Samiria de 4,985 visitantes en el 2004 ha crecido hasta

¹ Reserva Nacional ubicada en el departamento de Loreto, cuya frecuencia de visitantes es una de las más visitadas en la región selva, según datos del MINCETUR 2016-2017.

unos 10,533 hasta setiembre del año 2018)² presenta una oportunidad única para impulsar el desarrollo económico en esta región

La principal ruta de turismo en la región Loreto se concentra en la ruta desde el puerto fluvial de Iquitos hacia la reserva protegida de Pacaya-Samiria, destino muy concurrido tanto para turistas nacionales como extranjeros. En el año 2012 esta reserva fue visitada por 9,030 turistas extranjeros y 785 turistas nacionales³, a la fecha el número de visitantes supera los 11,000 visitantes entre nacionales y extranjeros, constituyéndose en una de las más visitadas de la región y uno de los destinos con mayor proyección de crecimiento al 2021.

1.2.1. Flota Fluvial Nacional

Actualmente existen algunas embarcaciones dedicadas al rubro del transporte de turistas, que realizan rutas desde Iquitos hasta poblados indígenas, parques y reservas naturales, dando la posibilidad al turista de observar la gran biodiversidad, propia de la región y única en el mundo, pero estas embarcaciones realizan travesías con un diseño inadecuado, adaptado y sin mucho estudio. Generalmente realizan rutas cortas y son en su mayoría botes o lanchas artesanales.

Algunos de los aspectos en los que presentan limitaciones en el diseño y construcción de embarcaciones de pasajeros son las siguientes: uso de motores de combustión interna del tipo diésel, espacio reducido en la acomodación de pasajeros, servicios sanitarios limitados, emisión de ruidos y vibraciones provenientes de la sala de máquinas, emisiones de gases de combustión como

² Datos tomados de “Compendio de Cifras De Turismo”, noviembre 2018. Archivo digital en: https://www.mincetur.gob.pe/wp-content/uploads/documentos/turismo/publicaciones/Peru_Compendio_Turismo_Nov2018.pdf

³ Datos tomados de : Diseño de embarcación fluvial turística, para navegar en el Río Amazonas desde Iquitos hasta la reserva de Pacaya-Samiria, fuente: https://www.openstarts.units.it/dspace/bitstream/10077/8825/1/16_Vasquez_et_al.pdf

el CO₂, costo del pasaje relativamente alto,⁴ contaminación del agua del río por descarga de servicios sanitarios directos, estabilidad limitada, entre otros.

Una de las propuestas destinadas a mejorar el alcance del transporte fluvial de pasajeros (número de pasajeros, calidad y servicios al pasajero, entre otros) es la propuesta presentada por Manuel Urcia, Marco Biot y Giorgio Sbrizza, en el 2013, bajo el nombre de “Diseño de una Embarcación Fluvial Turística, para navegar en el Río Amazonas desde Iquitos hasta la reserva de Pacaya-Samiria”. Ellos diseñaron una embarcación para tener una autonomía de 11 días, pero la perspectiva era un crucero a bordo por el Amazonas con recorridos largos, obviando el turismo vivencial y con uso de motores Diésel.

Tras la consulta local, sobre algunas propuestas de diseño de embarcaciones fluviales en la zona de Iquitos, pudimos elaborar la Tabla 1.1, en donde se presenta las características de cuatro embarcaciones que, a pesar de sus limitantes, están apostando por un servicio destinado al turismo exploratorio y recreacional acorde a las necesidades del turismo extranjero.

Tabla 1.1.- Características de las Embarcaciones actuales destinadas al servicio de Cruceros Turísticos en la Selva

Nombre	Dimensiones Principales⁵	Velocidad V (nudos)	Potencia Instalada	Fuente de Energía
Selva Viva ¹	22 x 7.0 x 0.6	6	125 HP	Solar & Diésel
La Amatista ²	27 x 7.0 x 0.6	8	322 HP	Diésel
Delfin I ³	30 x 5.0 x 2.0	8-10	350 HP	Diésel
Delfin II ⁴	31 x 10 x 0.7	8	190 HP	Diésel
⁽¹⁾ Motonave fluvial – Monocasco				
^(2,3,4) Embarcación de lujo - Monocasco				

Fuente: Recopilaciones la ciudad de Iquitos. Elaboración propia.

⁴ Alrededor de S/ 1400 – 3500 Soles por un viaje de 11 días, dependiendo de las empresas de crucero Amazónicas.

⁵ Considerando la Eslora Total, Manga y Puntal de las embarcaciones presentadas.

Según las fuentes de información de la dirección general de capitanías y guardacostas del Perú (DICAPI) y del ministerio de transporte y Comunicaciones (MTC), no se han podido identificar el uso de fuentes de energía alternativas para la propulsión de embarcaciones, como sería el caso de nuestra propuesta, que se caracterizara en una embarcación multicasco, del tipo catamarán, diseñada para ser construida en aluminio, cuyas ventajas operativas existentes estarían destinadas al transporte de pasajeros proporcionando un menor desplazamiento, por ende, un menor calado, una menor resistencia al avance y menor consumo energético, una mayor área de habitabilidad y servicios acordes al turismo recreacional. La embarcación propuesta transportaría al menos a 50 pasajeros y sería propulsada mediante un sistema de paneles fotovoltaicos que le permitiría alcanzar una autonomía completa de 4 horas diarias, supliendo las demandas energéticas de dos motores eléctricos y a los servicios de la embarcación, logrando alcanzar una velocidad de 9.5 nudos con una menor potencia instalada, alrededor de 130 kW (174 Hp).

1.2.2. Embarcaciones solares en el mundo

Países como España, Italia, suiza y otras, están desarrollando una cultura sostenible, que en combinación con el turismo vivencial están impulsando el uso de energías renovables, cumpliendo con la agenda para un desarrollo sostenible para el 2030 propuesta por la ONU. Las propuestas para el sector son embarcaciones solares del tipo catamarán con sistemas fotovoltaicos aislados patrocinadas por el gobierno y empresas del medio.

Uno de los cambios más importantes es que se prefiere el uso de embarcaciones del tipo catamarán en lugar de los monocascos por dos razones: menor resistencia al avance y mayor área para la disposición de paneles.

Tabla 1.2.- Embarcaciones solares más representativas en el Mundo

Nombre	Dimensiones Principales ⁶	Velocidad V (nudos)	Potencia Instalada	Fuente de Energía
Ecosol 33 ¹	22 x 7.0 x 0.6	6	20 kW	Solar & baterías
Solemar 30 ²	27 x 7.0 x 0.6	6.5	48 kW	Solar & baterías
Planet Solar ³	30 x 15 x 2.0	14	120 kW	Solar & baterías
⁽¹⁾ Catamarán – Casco de Codillo				
^(2,3) Catamarán – Casco en de formas, pantoque redondo				

Fuente: Elaboración Propia.⁷

Estas propuestas presentan limitaciones en servicios, confort, capacidad de pasajeros, limitada capacidad energética y poca autonomía.⁸ La mayoría de las embarcaciones solares desarrolladas son destinadas al transporte de pasajeros y han sido desarrollados para aguas restringidas en zonas turísticas.

Existen algunos anteproyectos como el proyecto Kara Solar⁹ o el barco solar para Santay¹⁰, ambos en etapa preliminar y promovidas por el gobierno ecuatoriano para el ámbito fluvial.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Al analizar y contrastar el panorama nacional del transporte y el turismo fluvial de pasajeros con los estándares internacionales, podemos citar:

1.3.1. Construcción Artesanal

Las construcciones en madera, acero y/o aluminio son de carácter empírico en su gran mayoría. Motonaves, chatas, remolcadores, lanchas, peque-peques, barcazas y demás artefactos fluviales son diseñados y construidos en base a la

⁶ Considerando la Eslora Total, Manga y Puntal de las embarcaciones presentadas.

⁷ Datos tomados de <http://www.consumer.es>

⁸ Debido a que los índices de radiación solar es en promedio 2 - 3 kWh /m² diarios en Europa, limitando el uso de baterías y restringiendo el número de pasajeros.

⁹ Este proyecto busca la construcción de barcazas capaces de navegar por la Amazonía ecuatoriana alimentados únicamente por la energía del Sol.

¹⁰ Este proyecto consiste en la construcción y puesta en servicio de un barco electro solar construido en Guayaquil con asesoría suiza, para navegar en Zonas Protegidas como es el caso de la Isla Santay, el parque Samanes y por supuesto el Río Guayas.

experiencia de los propios armadores con un diseño básico sin profundizar en el análisis, la evaluación o el rigor técnico que se requiere para el diseño de formas, construcción, soldadura, acomodación o criterios de seguridad. Aunque, en los últimos años, los diseños de ingeniería están siendo introducidos en la zona de la Amazonía peruana con mejoras propulsivas, estructuración adecuada, construcción modular, supervisión técnica y otros.

1.3.2. Emisiones de CO₂ y Combustible Fósiles

En la flota actual de embarcaciones turísticas y en general, prima el uso de combustibles fósiles y derivados. Las embarcaciones denominadas “peque-peque”, botes y lanchas, prefieren el uso de motores fuera a bordo (motores adaptados, motores diésel y/o gasolineras), mientras que los motores intrabordo diésel son preferidos por motochatas, empujadores y cruceros que realizan viajes con una autonomía alrededor de los 7 días. Todos con una potencia instalada que varía entre 50 - 1200 Hp. en promedio, con un consumo superior a los 70 l/h promedio¹¹, lo que se traduce por lo menos en 2.6 kg CO₂/l de combustible fósil consumido.

Las embarcaciones dedicadas al turismo transportan entre 10 a 30 pasajeros, realizando rutas con una autonomía menor a 1 día, con una velocidad media de 6 nudos con un confort limitado y espacio reducido, abusando de combustibles fósiles.

1.3.3. Velocidad de operación y navegabilidad

El transporte de pasajeros en esta zona en particular debe considerar algunos factores tomados en cuenta con la exigencia y demanda de la geografía de los ríos de la selva, estos son:

- Navegabilidad en cualquier época del año, en época de vaciante o creciente. Esto supone un calado máximo para las embarcaciones. Para

¹¹ Datos tomados de la tesis: “Diseño de un empujador fluvial de 900 Hp de potencia instalada para la navegación en la Amazonia peruana”, Gary Gago, Aember, pág. (101-102)

la cuenca del río Amazonas el calado máximo permisible para toda época es de 4 ft (aprox. 1.2 m de profundidad).¹²

- Una velocidad de operación adecuada que permita la maniobrabilidad en los meandros. Las velocidades de operación varían entre 6 - 8 nudos (3 - 4 m/s), considerando la corriente propia del río.
- Maniobrabilidad sin restricción en condición de vaciante o creciente, permitiendo giros, embarque y desembarque de pasajeros, maniobras de amarre en puerto, y otros, por lo que un buen sistema de gobierno debe ser considerado.

1.3.4. Acomodación, Confort, Seguridad y Transporte

Según los reportes del MINCETUR, las embarcaciones existentes dedicadas al turismo no cuentan con suficientes instalaciones para proporcionar comodidad, recreación y seguridad a bordo, por lo que han desarrollado publicaciones como: Manual de Buenas Prácticas de Gestión de Servicios para Empresas de Transporte Turístico Acuático (2010), Plan Nacional de Calidad Turística del Perú – CALTUR 2107- 2025 (2017), y otras, cuya finalidad es mejorar el servicio turístico y el transporte de pasajeros con un enfoque integral en el confort, la seguridad y la calidad de servicio.

1.3.5. Normativas Legales

La política nacional para la calidad, aprobada por el Decreto Supremo N° 046-2014-PCM, eje principal en el CALTUR, establece que todos los peruanos debemos asumir un compromiso con la calidad, a fin de contribuir en la mejora de la competitividad de la producción y comercialización de bienes y/o servicios.

¹² De acuerdo con las mediciones de Caudales del SENAMHI: HYBAM/Perú: Comisión P2 – 05/02 – Napo – Ucayali – Amazonas (Anexos), se registran zonas con esa profundidad, aunque generalmente son evitadas por las embarcaciones, será una variable por considerar para limitar peso, las dimensiones y acomodación.

En este marco, el plan Nacional de Calidad Turística del Perú, tiene como finalidad establecer las líneas de actuación que al 2025 nos permitirá promover e impulsar el desarrollo sostenible, competitivo y diversificado del turismo. Además, señala que sus ámbitos de actuación son: los recursos humanos, los prestadores de servicios y destinos turísticos, involucrando al gobierno regional y local. Esto supone una mejora en la infraestructura y los medios de transporte para las actividades de turismo, como: puertos, botes, lanchas, embarcaciones, hoteles, gestión ambiental y propuestas sostenibles.

Es importante señalar una de las definiciones claves en el CALTUR 2017 – 2025, esto es el turismo sostenible. Este se define como el turismo que tiene plenamente en cuenta las repercusiones actuales y futuras, económicas, sociales y medioambientales para satisfacer las necesidades de los visitantes, de la industria, del entorno y de las comunidades anfitrionas.

Además, se debe acotar, que con fecha 19 de agosto 2016, se ha publicado en el diario El Peruano, la aprobación de las “Normas para la obtención de los certificados de condición y de clase expedido por las Sociedades de Clasificación para las naves y artefactos fluviales, existentes y nuevos, en el “ámbito fluvial”, mediante R.D. N.º 0683-2016 MGP/DGCG y los “Lineamientos para el reconocimiento y la supervisión de las Sociedades de Clasificación que actúen en el ámbito fluvial”, con R.D. N.º 684-2016 MGP/DGCG; Resolución Directoral que aprueba la R.D. N.º 337-2016 MGP/DGCG, Anexo “A”, que detalla que el reconocimiento desde planos hasta la supervisión de la construcción de las naves fluviales, será efectuado por Sociedades de Clasificación de Naves registradas en DICAPI.

Así como, la R.D. N.º 338-2016 MGP/DGCG, Anexo “A”, detalla que las Sociedades de Clasificación de naves deben ser miembros de IACS (Asociación Internacional de Sociedades de Clasificación), ACS (Asociación de Sociedades de Clasificación de Asia) o TSCI (Asociación Internacional de Inspección y Clasificación), otorgando dos (02) años para la adecuación. Con ello, se da un paso importante en la normalización de la construcción de naves

fluviales bajo estándares internacionales, y eliminando el alto número de naves subestándar en el ámbito fluvial, construidas sin criterio técnico.

Asimismo, la norma indica que las naves fluviales se construirán según los planos aprobados con los criterios de la clase, con materiales y equipos aprobados, antes de la entrega de esta. En cumplimiento con las directrices del Código para las Organizaciones reconocidas aprobadas mediante las resoluciones MEPC.237(65) y MSC.349(92), adoptadas por el Comité de Protección del Medio Marino (MEPC) y por el Comité de Seguridad Marítima (MSC), de la Organización Marítima Internacional OMI en su 65° y 92° periodo de sesiones respectivamente, se crea una oportunidad para el diseño, la evaluación, la supervisión y gestión de las naves fluviales bajo estándares internacionales para una navegación segura.

Asimismo, se debe señalar cada nueva embarcación debe cumplir con las disposiciones de la autoridad marítima nacional (DICAPI), como se detalla en la Ley 26620 (ley de control y vigilancia de las actividades marítimas, fluviales y lacustres, la resolución directoral N° 0562-2003-DG 05/2003 (código de seguridad de equipos para naves y artefactos navales, marítimos, fluviales y lacustres) y otras complementarias emitidas por esta para cada tipo de nave.

1.3.6. Potencial Energético y cultura sostenible

Actualmente, el uso de combustibles fósiles ha suscitado un problema ambiental en todo el mundo. Las emisiones de CO₂ y NO_x, han deteriorado la capa de ozono y constituyen uno de los principales agentes contaminantes en cualquier ecosistema. Lastimosamente, nuestra Amazonía no es ajena a esta realidad. El uso de motores diésel y gasolina, es común en embarcaciones de transporte, carga y otros.

De acuerdo con el Reporte Semestral de Monitoreo del Mercado de Hidrocarburos de OSINERGMIN, se tiene que en la región selva, el departamento de Loreto presenta un mayor consumo de combustibles fósiles y derivados, según muestra en la Figura 1.1.

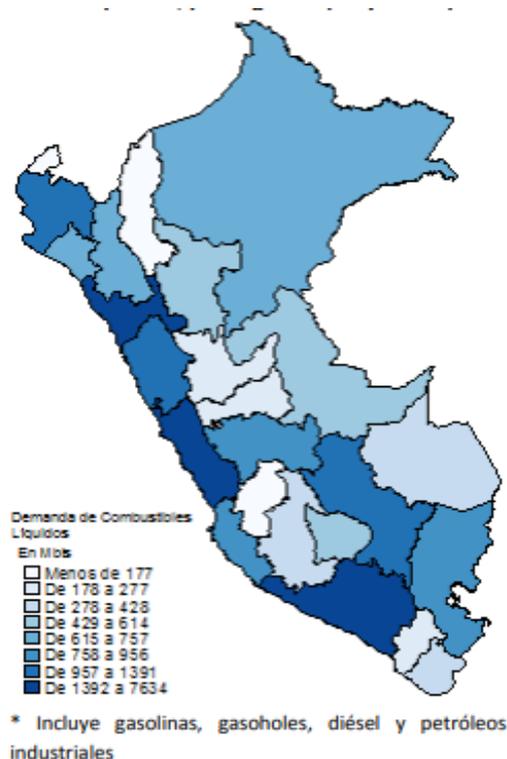


Figura 1.1.- Demanda Nacional de Combustibles líquidos*, por regiones (mayo 2017)

Fuente: DSR-GSE- OSINERGMIN

Aunque hoy existe una cultura de desarrollo sostenible, no se tiene a la fecha, una propuesta de desarrollo tecnológico para reemplazar el consumo de combustibles fósiles por alternativas energéticas más amigables como la energía solar. Las iniciativas privadas como Torqueado y similares, usan fondos propios y han logrado desarrollar pequeñas embarcaciones de 10 a 15 personas con uso de paneles solares y baterías.

El transporte marítimo internacional, fluvial y lacustre, en todas sus formas, es responsable de al menos¹³:

- 2.7% de emisiones globales de CO₂
- 5 % al 12% de las emisiones de SO_x
- 7% al 31% de las emisiones de NO

¹³ Datos tomados de <https://www.rederi.no/en/aktuelt/2017/skipsfarten-bidrar-til-fnsbarekraftsmal/>

Sin medidas ni propuestas que ayuden a reducir el empleo de combustibles fósiles, las emisiones pueden incrementarse de un 150% a un 200%, entre 2007 y 2050. Por esta razón, los convenios de la OMI regulan las emisiones atmosféricas producidas por los buques y embarcaciones existentes y, reducir la emisión de Gases Efecto Invernadero (GEI). Este tipo de convenios busca un impacto positivo en el medio ambiente y en la salud de las personas, así como las medidas destinadas a promover un transporte marítimo seguro, protegido y ecológicamente racional sin detrimento de la eficiencia del transporte marítimo.

Uno de los convenios más destacados en este tema es el convenio MARPOL, el Anexo VI del convenio trata sobre el control de emisiones de óxido de azufre (SO_x), óxido de nitrógeno (NO_x), CO₂ y sustancias agotadoras del ozono, además de promover la reducción de emisiones y evitar la incineración a bordo de desechos u otras materias a bordo de un buque si dichos desechos u otras materias se han producido durante la explotación normal de dicho buque, permite la adopción de Áreas de Control de Emisiones (ECA) donde se establecen límites de emisiones de óxido de azufre y óxido de nitrógeno adoptan medidas más estrictas para prevenir, reducir y contener la contaminación atmosférica.

Uno de los beneficios que traería sería la reducción de las emisiones de contaminantes en más del 70% al 2030, prevenirse enfermedades, fallecimientos prematuros y ausentismo laboral (por enfermedades vinculadas al sistema respiratorio), un ahorro económicos valorizados en miles de millones de dólares para el sistema de salud, oportunidades de negocio relacionadas con el mercado de combustible marino ecológico y nuevos medios energéticos; siendo necesario la perspectiva del desarrollo sostenible como eje impulsor del cambio.

En 2015, la ONU adoptó una nueva agenda para el desarrollo mediante la iniciativa “Transformar nuestro mundo: la agenda de 2030 para el desarrollo sostenible” y sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) asociados. En

ellos se plantea que las emisiones procedentes de los buques afectan a las personas que viven cerca de las zonas costeras y/o cercanas a puertos, la necesidad de preservar la vida submarina, potenciar el uso de energías limpias y contribuir a la innovación e infraestructuras que permitan reducir el impacto en las personas y el medio ambiente perjudicados por las emisiones de gases procedentes de los buques desarrollando sociedades y comunidades sostenibles; por tanto, se precisa medios y propuestas que reduzcan, reemplacen y eliminen las emisiones de agentes contaminantes.

El desarrollo sostenible debe tener un equilibrio en tres dimensiones la social, el ambiente y la económica. Estas dimensiones deben ser tratadas y consideradas por las nuevas innovaciones e infraestructuras.



Figura 1.2.- Dimensiones del Desarrollo Sostenible

Fuente: Norwegian Shipowners' Association.¹⁴

¹⁴ Tomado de <https://www.rederi.no/en/aktuelt/2017/skipsfarten-bidrar-til-fnsbarekraftsmal/>

La energía solar es una de las opciones que se están desarrollando como alternativa a las energías provenientes de la quema de combustibles fósiles. A diferencia de los países nórdicos, el territorio peruano, por estar más próximo al Ecuador, cuenta con mayor radiación solar durante el año. Según el Atlas Solar del Perú elaborado por el Ministerio de Energía y Minas, el Perú tiene una elevada radiación solar anual en la sierra de aproximadamente 5.5 a 6.5 kWh/m²; 5.0 a 6.0 kWh/m² en la costa y en la selva de aproximadamente 4.5 a 5.0 kWh/m², valores que superan por mucho a los 2 a 3 kWh/m² que son los máximos en Europa, en donde existen iniciativas y proyectos de energía solar viables y en operación.

Existen tres líneas de aprovechamiento energético solar, que pueden ser aprovechados en el Perú. El primero es el uso como fuente térmica, el segundo es la provisión de electricidad, como plantas solares de pequeña y gran escala para las zonas rurales e incluso Lima; y el último, es en el transporte.

Un caso en particular es la selva del Perú, donde la vía fluvial es la única posibilidad de comunicar poblados de difícil acceso y no cuentan con puentes o carreteras, así que, seguramente se podría reemplazar el transporte de automóviles de gasolina por embarcaciones, que usarían paneles solares.

Las embarcaciones con motores diésel no contaminan solamente el aire, sino también el agua de los ríos con restos de gasolina y aceite. Esto es nocivo para la vida de los ríos y de sus riberas. Por ejemplo, en el río Amazonas, donde el transporte de embarcaciones es muy grande y frecuente los delfines rosados sufren los estragos de los agentes contaminantes. Las embarcaciones accionadas por un motor eléctrico con energía de paneles solares no producen residuos contaminantes al medio ni emiten ruido en decibeles perjudiciales al entorno.

Por lo tanto, al considerar las características actuales del transporte de pasajeros en Iquitos, no cabe duda de que se presenta la necesidad y la oportunidad de ofrecer un nuevo diseño de una embarcación turística fluvial sostenible,

considerando las particularidades de navegación por el río Amazonas, que cuente con todas las instalaciones mínimas necesarias para brindar al turista bienestar y seguridad durante su viaje, así como una excelente e inolvidable experiencia, permitiendo contribuir a la creación de puestos de trabajo (directo e indirecto, en la población y en la región) y desarrollo. Se requiere proponer un diseño que pueda integrar factores como la calidad del servicio, tecnología sostenible, mejora continua y una política de bienestar social para dar el siguiente paso en el desarrollo tecnológico y al cambio social en uno de los tantos destinos turísticos más visitados en el Perú.

1.4. OBJETIVO

El objetivo principal de esta tesis es la elaboración del diseño preliminar de una embarcación fluvial solar para el transporte de 50 pasajeros, con capacidad energética suficiente para desarrollar una velocidad de crucero de 6 nudos para la navegación en la cuenca del Amazonas, desde la ciudad de Iquitos hasta la reserva nacional de pacaya Samaria, recalando en puertos intermedios y contribuyendo con los objetivos de desarrollo de la OMI al 2030.

1.5. HIPÓTESIS

Considerando el panorama actual, la proyección del turismo al 2030, y el potencial energético de la Amazonía peruana se plantea la siguiente hipótesis: ¿Es posible la elaboración de una embarcación fluvial de tipo solar para el transporte de al menos 50 pasajeros, con capacidad para generar su propia demanda energética, con una Tasa interna de retorno mayor al 20 %, garantizando una autonomía de 4hrs diarias y una velocidad de crucero de al menos 6 nudos, con capacidad de recarga en puerto, bajo criterios de diseño estándar y un enfoque sostenible?

1.6. JUSTIFICACIÓN

La elaboración preliminar de una embarcación solar permitirá contribuir con una propuesta viable para la reducción de emisiones de gases de efecto

invernadero, contribuirá a la mejora e impacto positivo en la salud y la preservación de la vida submarina, flora y fauna circundante de las rutas propuestas a través de la disminución de ruidos y agentes contaminantes al agua y a la atmósfera. Asimismo, promueve el uso de energías renovables y abre la posibilidad de nuevos y atractivos mercados, permitiendo que las comunidades y ciudades circundantes a la ruta desde la reserva de Pacaya-Samiria a Iquitos inicien una cultura en el consumo y desarrollo sostenible, promoviendo el turismo y el desarrollo social.

1.7. ALCANCE

El presente trabajo abarca el diseño preliminar de una embarcación solar para el transporte de pasajeros en el río Amazonas. Hemos elaborado los planos principales, cálculos a nivel preliminar (incluyendo la estructuración y escantillonado, predicción y estimación de potencia, análisis de estabilidad, etc.), esquemas de funcionamiento, costos y presupuestos para conseguir el diseño de nuestra embarcación prototipo a nivel preliminar.

Es importante señalar que todos los accesorios, el equipamiento seleccionado, la selección preliminar de los principales elementos y otros, están sujetos a modificaciones propias de la ingeniería de detalle en la implementación del proyecto.

La proyección del tiempo de ejecución y planeamiento de proyecto no se encuentran dentro del alcance de esta tesis. Sin embargo, del análisis rentable del proyecto como una inversión privada sujeta a una evaluación de los indicadores del valor actual neto, tasa interna de retorno y periodo de recuperación, con tasa de rentabilidad de inversiones cercanas 20%, están consideradas. Hemos tratado de trabajar con la información disponible en los medios para realizar estimaciones cercanas a la realidad en base a flujos promedios y costos referenciales.

El objetivo de la tesis no es el diseño completo y detallado de una embarcación, ello es materia fundamental a nivel del desarrollo contractual y en la ingeniería

de detalle, por lo que no ahondaremos en detalles de instalación, conexión de equipamientos y otros. Nos centraremos en definir los elementos principales y sus características; las formulaciones y métodos aproximados para la selección de elementos serán usados, de acuerdo con su factibilidad.

Con la finalidad de cumplir con el objetivo del proyecto, el perfil operativo, enfoque conceptual y especificaciones técnicas mínimas a cumplir, se considerará las disposiciones de los siguientes reglamentos, según aplique:

- NR 217 Rules for the Classification of Inland Navigation Vessels
- Disposiciones del SOLAS 74 – Capitulo II, III – IV
- MARPOL 73/78 – Anexo VI-V
- Criterios de Estabilidad - IMO.

El desarrollo de este trabajo cumple con las disposiciones de las normativas, pero no se exigirá el cumplimiento fidedigno de todos los requisitos de una embarcación clasificada con la notación de clase más alta (que demanda un incremento considerable en el presupuesto para la compra de materiales, consideraciones en el personal de construcción, equipamiento del astillero constructor, entre otros, fuera del alcance del proyecto). Sin embargo, los principios de seguridad, compartimentado, estabilidad y otros, serán tomados en cuenta y desarrollados en cada capítulo, según el alcance de estos. Esto no significa un detrimento en la seguridad, sino permite establecer un horizonte mínimo y aceptable, que puede ser perfectible en posteriores trabajos.

1.8. METODOLOGÍA

La elaboración del diseño preliminar de una embarcación solar debe tratarse como todo proyecto de ingeniería naval, bajo la perspectiva de la espiral de diseño. El diseño inicial de un buque, generalmente se procede a través de tres etapas: concepto; preliminar y diseño del contrato.

El proceso de diseño inicial es a menudo ilustrado por el esquema de la espiral de diseño, lo que indica que, dada los objetivos del diseño, el diseñador trabaja en busca de la mejor solución para los requisitos planteados.

El diseño preliminar refina y desarrolla la propuesta de acuerdo con el diseño conceptual. Delimita, estructura y esquematiza a fin de optimizar el rendimiento de la nave. Para lograrlo debemos tener en claro previamente:

- Tipo de nave deseado.
- Acomodación necesaria para las actividades.
- Dimensiones o espacios mínimos para desarrollar la actividad.
- Desplazamiento o calado máximo en la zona de operación.
- Estabilidad requerida para el tipo de nave, según norma u otro.
- Propulsión y la forma del casco, según el tipo de nave deseado.
- Disposición general, acorde a las actividades y puntos anteriores.

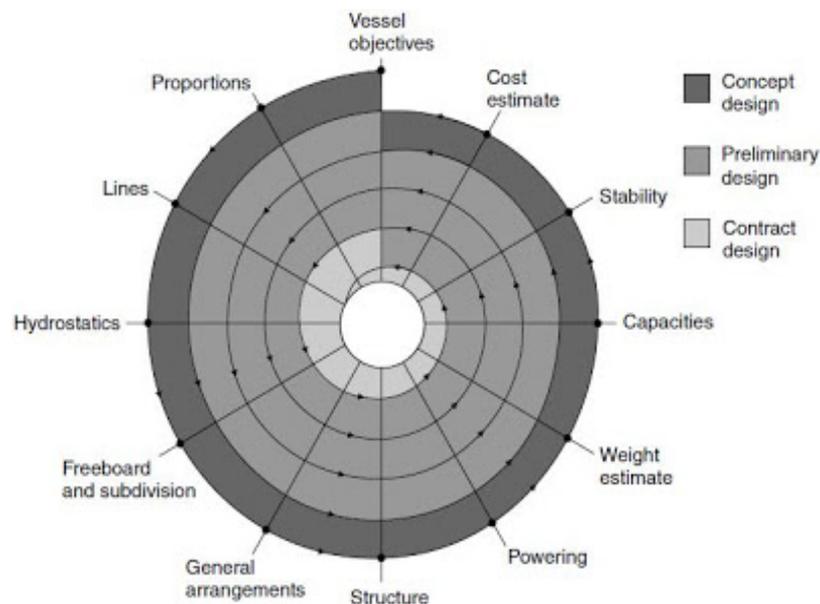


Figura 1.3.- Espiral de Diseño dentro del desarrollo de un proyecto Naval

Fuente: Ship Construction, Sixth Edition¹⁵

¹⁵ Tomado de: <https://www.globalspec.com/reference/25982/203279/part-1-introduction-to-shipbuilding>

Cada elemento de información puede ser considerado en mayor detalle, junto con cualquier restricción impuesta sobre estos temas por el servicio de los buques u otros factores fuera del control del diseñador.

Nuestro diseño debe precisar el tipo de nave, la acomodación necesaria (a fin de evitar el hacinamiento), las dimensiones principales, la propulsión y la selección de formas adecuada. Todas estas plasmadas en un plano denominado disposición general y esquemas complementarios.

Para lograr el diseño preliminar, debemos seguir la siguiente metodología de trabajo:

- Definir el perfil del buque, la descripción de la embarcación o buque.
- Establecer las dimensiones principales
- Definir las líneas de formas, propiedades de carena.
- Delimitar el calado y la subdivisión estanca.
- Definir los sistemas principales de la embarcación.
- Estructurar la embarcación
- Estimar el peso y las capacidades de la embarcación
- Analizar la estabilidad
- Estimar el costo de la nave y su rentabilidad

Lógicamente todo esto, dentro del alcance y las limitaciones del diseño preliminar, esto no implica todos los detalles, pero si aquellos componentes principales de la nave que nos sirvan de base para las siguientes fases de un proyecto naval, el diseño de contrato con la ingeniería de detalle.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. MARCO CONCEPTUAL

2.1.1. Embarcaciones solares

Las embarcaciones solares son buques, naves o vehículos dotados de medios suficientes para garantizar la transformación de la radiación solar en energía para la planta propulsora, generalmente se usa paneles solares como medio de captación.



Figura 2.1.- Barco Solar Marine Parka

Fuente: <https://elblogverde.com>¹⁶

¹⁶ Imagen tomada de: <https://elblogverde.com/barco-de-energia-solar-para-patullar-la-gran-barrera-de-coral/>

Las embarcaciones solares, en general, pueden ser de múltiples formas y diseños, los cuales son adaptados para proporcionar una superficie adecuada y suficiente de captación solar, entre ellas encontramos: los de tipo monocasco, catamaranes, trimaranes o nuevas formas, complejas y muy creativas.

2.1.1.1. Monocascos

Estos tipos de embarcaciones son conformados por un único casco de formas variadas, según los requerimientos de diseño. Los diseños clásicos son de este tipo como buques, embarcaciones o naves de un solo casco como: veleros, ferry, bulk carrier, etc. Presentan ventajas constructivas, pero ofrecen una menor área de captación solar, mayor superficie mojada, y una menor estabilidad. La mayoría dispone de ciertos espacios sobrecubierta para adecuarlos a paneles solares, con la finalidad de proveer parte de la demanda eléctrica de la embarcación.



Figura 2.2.- Embarcaciones de tipo monocasco

Fuente: <https://es.dreamstime.com>¹⁷

¹⁷ Imagen tomada de: <https://es.dreamstime.com/imagen-editorial-diferentes-tipos-de-barcos-de-la-velocidad-image42556885>

2.1.1.2. Catamaranes

Las embarcaciones de este tipo consisten en la unión de dos cascos paralelos. Se caracterizan por tener forma esbelta para mejorar sus coeficientes hidrodinámicos, menor calado, mayor estabilidad en comparación a una de tipo monocasco de similares dimensiones, entre otros.

El mayor beneficio que puede obtenerse es que permite implementar una mayor área para captar energía solar y una mejor distribución para la acomodación, además de ofrecer una ventaja energética en la propulsión (menor resistencia al avance y menor consumo de energía).

La mayoría de los barcos solares son del tipo catamarán, de una sola cubierta y con monocascos finos, con propulsión eléctrica.



Figura 2.3.- Planet Solar: Embarcación trasatlántica tipo catamarán

Fuente: <http://www.consumer.es>¹⁸

¹⁸ Imagen Tomada de :
http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2012/04/26/209019.php

2.1.1.3. Trimaranes

En este grupo pertenecen las embarcaciones de diseño conformado por un casco central y dos monocascos laterales. Su elección es apropiada para condiciones de esfuerzos dinámicos, altas velocidades y un gran control de estabilidad. Actualmente su elección constituye un incremento considerable en los costes de fabricación.



Figura 2.4.- Embarcación de alta velocidad tipo trimarón

Fuente: <http://www.yachtworld.com/boats/Sail/Trimaran>

2.1.2. Embarcaciones solares existentes

Estudiando la entrada progresiva de la energía solar en las embarcaciones, se puede observar la continua evolución e importancia que ésta va tomando, en el ámbito náutico como alternativa a la combustión de hidrocarburos. Tanto es así, que hoy existen embarcaciones que solo utilizan dicha fuente de energía renovable, y con resultados que auguran un gran futuro.

Gracias a la investigación de equipos más eficientes, y a la progresiva apuesta por este tipo de energía renovable, se ha logrado desarrollar embarcaciones solares más competitivas, hecho que ocasionará un cambio en la fuente de

consumo de las embarcaciones hacia una energía limpia y renovable. Por todo esto, hay que analizar en qué situación se encuentran estas embarcaciones hoy en día. Actualmente existen barcos solares con grandes resultados, destacando el Sunrider 2009, el Foton, el DSe Island Pilot Hybrid, el Sydney SolarSailor o el Solemar (España).

El Sunrider 2009, creado en este mismo año, es una embarcación solar con capacidad para diez pasajeros creada por Navgathi Marine Design & Constructions junto a Team Sustain, que actualmente ofrece su servicio como medio de transporte a través del Vembanad Lake en la India. Esta modesta embarcación alcanza más de 6 nudos y en su momento supuso un gran avance en el campo de los barcos solares.



Figura 2.5.- Sunrider 2009

Fuente: Oscar López, 2016

El DSe Island Pilot Hybrid es un yate a motor de 39'6'' (12 m) de eslora, 17' de manga y 26'' de calado. Funciona con combustible diésel y energía solar, alcanzando los 7 nudos cuando funciona con la segunda opción. Equipado con una potencia total de paneles de 6 kW y un banco de baterías de 20 kWh, esta embarcación fue pionera en su momento al ser el primer yate a motor de

producción con cero emisiones en Estados Unidos presentada en octubre del 2008.



Figura 2.6.- DSe Island Pilot Hybrid

Fuente: Oscar López, 2016



Figura 2.7.- Humber Foton

Fuente: Oscar López, 2016

Una de las embarcaciones más representativas es la embarcación Sun 21 – Travesía transoceánico. Este modelo fue desarrollado por una compañía suiza especializada en embarcaciones solares. Este cruzó el atlántico desde Sevilla

hasta Miami solamente utilizando energía solar. El trayecto lo hizo en un periodo de 117 días, su velocidad de crucero fue de 5,5 nudos (10km/h). La embarcación es una muestra palpable de la viabilidad de un barco solar con una alimentación 100% solar. Sin ningún motor híbrido de apoyo ni ninguna carga auxiliar.

El único dato técnico disponible es sobre su generador solar. Está compuesto por 48 paneles fotovoltaicos monocristalinos que entregan una potencia aproximada de 9,6 kWp, capaz de alimentarlo prácticamente sin interrupciones.



Figura 2.8.- Embarcación Transatlántica Sun 21

Fuente: <http://www.transatlantic21.org/boat/>

La embarcación Solemar 30 es una embarcación similar a la versión anterior, pero de prestaciones más modestas. El promotor de su desarrollo ha sido el Centro Tecnológico Electrosolar de las Islas Baleares (España), en conjunto con la empresa de construcción naval Seacleaner Trawler S.A. Tiene una velocidad de crucero de 3 nudos (5,5 km/h), y utiliza dos motores de corriente continua de baja potencia.

Para este modelo, el generador solar puede cubrir hasta el 60% de la demanda total de energía del sistema de propulsión trabajando a máxima potencia. Por

lo que se puede considerar una embarcación que realmente se sustenta a través de la energía solar fotovoltaica.

Emplea unas baterías de plomo-ácido con electrolito de gel. No definen una autonomía mínima, pero suponemos que es baja, ya que está destinado para paseos dentro de un estanque ubicado en un casco urbano, siendo su principal finalidad la divulgación de EERR's. En la siguiente ilustración se menciona de forma breve sus principales características técnicas.



Figura 2.9.- Embarcación Solemar 3.0

Fuente: http://www.seacleaner.com/pdfs/Solemar_es.pdf

2.1.3. Energía solar aplicada a Embarcaciones

Considerando los diferentes métodos de obtención de electricidad a partir del aprovechamiento de la irradiación solar se puede clasificar la energía solar en diferentes tipos. Cada uno de estos procedimientos difiere en cuanto a la captación y transformación de energía, obteniendo a su vez características y rendimientos específicos en cada caso.

Los dos tipos de energía solar más utilizados son: la energía fotovoltaica y la energía solar térmica, siendo la energía fotovoltaica de nuestro mayor interés.

2.1.3.1. Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es aquella que transforma directamente la radiación solar en electricidad. Dicha transformación se produce en los dispositivos denominados paneles fotovoltaicos.

El funcionamiento de estos paneles se basa en el uso de semiconductores para, gracias a la excitación de los electrones que produce la radiación solar, conseguir una pequeña diferencia de potencial en cada celda. Al conectar en serie varias celdas se logra obtener mayores diferencias de potencial. El éxito en la invención de estas placas reside en la unión de un semiconductor P con un semiconductor N.

Un semiconductor es aquel material que se comporta como conductor o aislante dependiendo de varios factores como serían temperatura, radiación o presión entre otros. Sabiendo que un semiconductor P es aquel en que aparecen huecos (o falta de electrones) y un semiconductor N el que quedan electrones libres, la unión de estos propicia el paso de electrones entre ellas.

Así, debido a la ley de difusión, la alta concentración de electrones de la zona N hace que éstos tiendan a dirigirse a la zona P, donde apenas hay. De igual manera sucede con los huecos, cuya elevada concentración en la zona P crea una tendencia a dirigirse a la zona contraria. Al encontrarse un electrón con un hueco éste primero ocupara el lugar vacío, formándose así en la zona de la unión una estructura estable y neutra.

Al producirse este fenómeno la zona N, que en principio era neutra pero que al unirla pierde electrones, se va volviendo cada vez más positiva, mientras que en la zona P, que capta todos estos electrones, lo hará de igual manera, pero en forma negativa. Es por dicho suceso que aparece una diferencia de potencial entre ambas zonas.

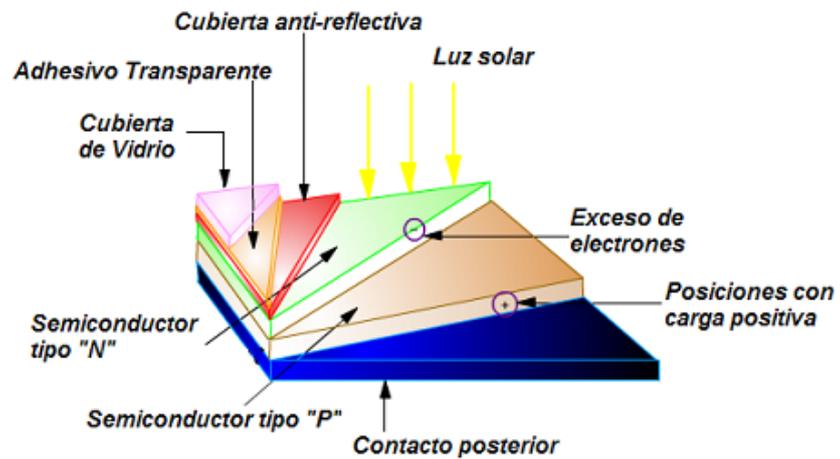


Figura 2.10.- Estructura de un panel solar

Fuente: Óscar López (2016)

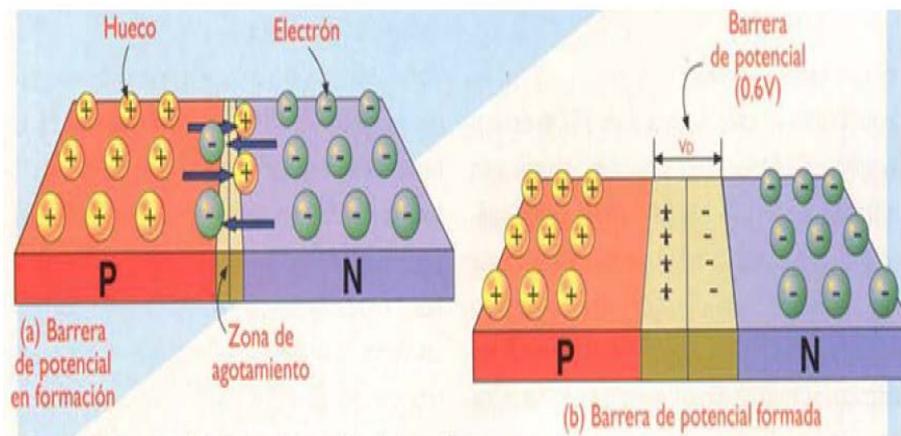


Figura 2.11.- Esquemas de comportamiento al unir semiconductores tipo P y N de Silicio

Fuente: Óscar López (2016)¹⁹

¹⁹Trabajo de fin de grado: Guía de aplicación de energía solar como alternativa de energía renovable en embarcaciones de recreo - López Sánchez, Óscar - 2106. Web site: <http://hdl.handle.net/2117/89553>

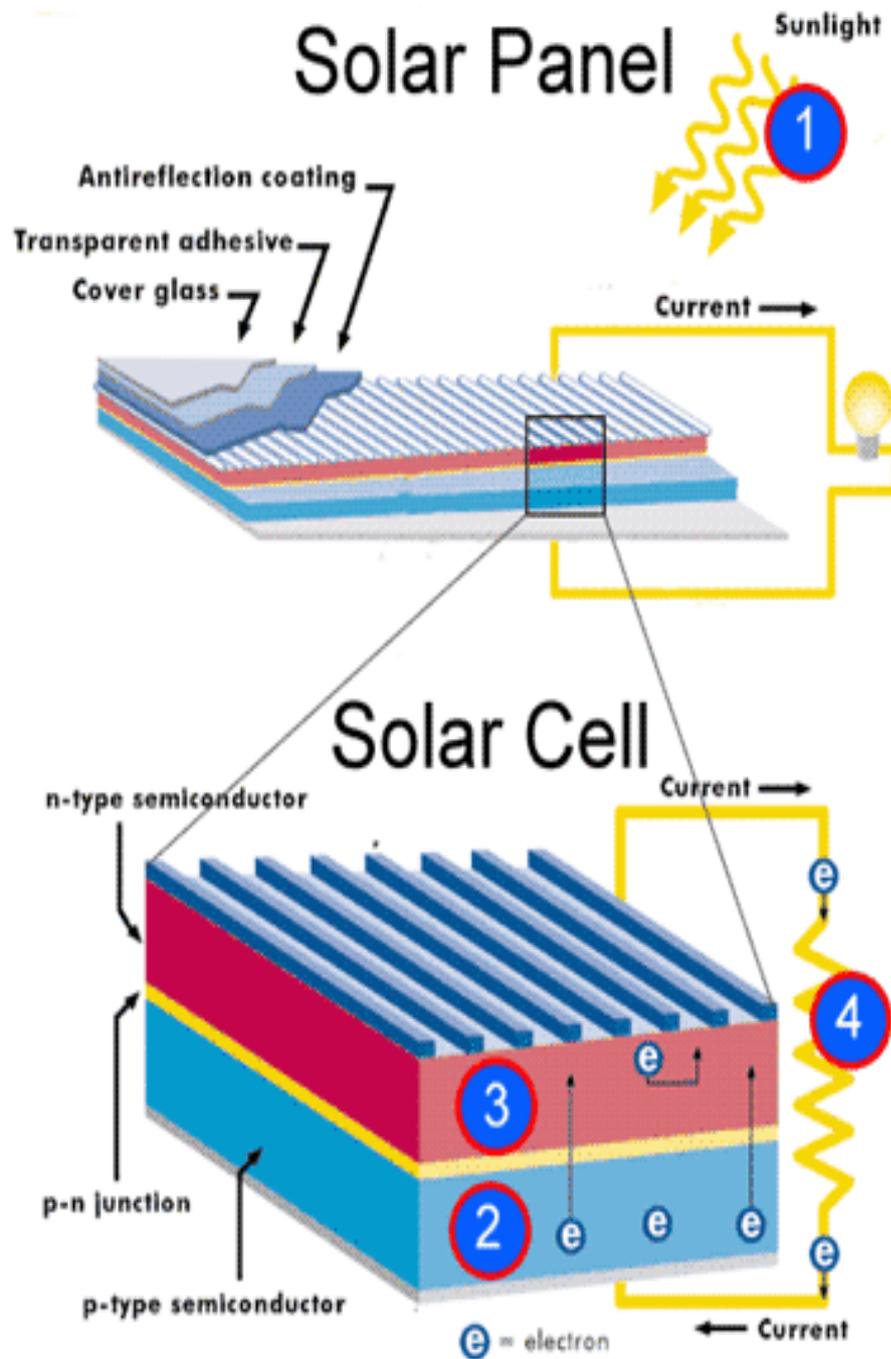


Figura 2.12.- Estructura de un panel y celda solar.

Fuente: Imagen disponible en Internet.

La tensión que aparece, llamada barrera de potencial se opone a la ley de difusión, ya que el potencial positivo creado en la zona N repele a los huecos que se acercan de P y lo contrario en la zona P. Llega un momento en que esta barrera impide la difusión de más electrones. Esta barrera de potencial es característica de cada elemento, siendo del orden de 0.2 - 0.3V para el Germanio y de unos 0.5 - 0.6V si se trata de Silicio. La explotación de dicho efecto en la energía solar reside en el efecto fotovoltaico, donde a grandes rasgos al incidir sobre la unión de semiconductores la radiación solar, a saber, partículas llamadas fotones, la energía de estos últimos produce la excitación de los electrones que provoca el movimiento caótico de estos en el interior del dispositivo. Mediante la colocación de contactos metálicos en ambas zonas se consigue el paso de electrones a través de estos, extrayendo así la energía eléctrica que se utilizará para alimentar una carga.

Las aplicaciones de la energía fotovoltaica actualmente pueden dividirse en dos sectores diferenciados, como son los sistemas aislados y los sistemas conectados a la red.

Los sistemas aislados son aquellos que generan electricidad sin estar conectados a la red eléctrica que proporciona al propietario normalmente esta energía. Normalmente requieren acumuladores solares o baterías para almacenar la energía fotovoltaica generada y así poder disponer de ésta en cualquier momento del día, incluyendo las horas en que no hay luz solar y por tanto no se produce energía. Los principales ejemplos de sistemas aislados los encontramos en telecomunicaciones, aplicaciones agrícolas y ganaderas, en el alumbrado público, en señalización o en el control de magnitudes como el nivel o la temperatura.

Para tener una imagen más clara sobre el uso de la energía fotovoltaica en instalaciones aisladas, se muestran la Tabla 2.1. Estas instalaciones son ideales para zonas o regiones donde la conexión a la red eléctrica no es posible o requiere de altos costes de construcción de las infraestructuras requeridas. Así ocurre en la electrificación rural, donde se puede emplear la energía

fotovoltaica para viviendas de uso temporal o permanente, para refugios y albergues de montaña y en postas sanitarias, entre otros.

Tabla 2.1.- Aplicaciones de los sistemas aislados

ELECTRIFICACIÓN RURAL	<ul style="list-style-type: none"> •Viviendas de uso temporal / permanente •Electrificación de refugios y albergues de montaña. •Escuelas y centros comunales. •Puestos de policía y fronteras.
SEÑALIZACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> •Faros y boyas de uso marítimo •Radiofaros y radiobalizas de uso aéreo •Señalización de carreteras
APLICACIONES AGRÍCOLAS - GANADERAS	<ul style="list-style-type: none"> •Bombeos de agua •Controles de riego •electrificación de granjas / invernaderos /cercas
TELECOMUNICACIONES	<ul style="list-style-type: none"> •Telefonía móvil •Repetidores de radio y televisión •Postes S.O.S. de carreteras. •Telecontrol para redes de riego. •Telemetría •Radares •Telefonía rural vía satélite •Cabinas telefónicas de uso público. •Centrales de conmutación. •Cobertura de radio y comunicaciones en túneles del Ferrocarril.
OTRAS	<ul style="list-style-type: none"> •Control de válvulas, puertas, presas, gaseoductos, etc. •Barcos, autocaravanas, etc. •Sistemas de detección de incendios y de seguridad •Iluminación de túneles, cuevas, •Paradas de buses

Fuente: Elaboración propia.²⁰

²⁰ Datos tomados de Guía de aplicación de energía solar como alternativa de energía renovable en embarcaciones de recreo - López Sánchez, Óscar

Este es también el caso de los barcos, que se pueden considerar zonas aisladas reducidas donde no existe la posibilidad de conexión con la red eléctrica cuando se está navegando. Éste, por tanto, será el campo de trabajo del proyecto. Por otro lado, se encuentran los sistemas conectados a la red eléctrica, ya sean de pequeño tamaño (viviendas particulares) o centrales de gran tamaño.

Estas instalaciones de conexión a la red trabajan en intercambio con la red eléctrica local. En la práctica, el usuario aprovechará las horas en que se produce energía solar fotovoltaica para consumir la electricidad obtenida por esta fuente, mientras que cuando ésta no sea capaz de proporcionar la energía que el usuario requiere ya sea por falta de producción o porque la demanda es mayor a lo producido, será la red eléctrica quien lo haga. Si, en el caso contrario, la energía solar producida es mayor que la requerida, ésta puede ser cedida a la red. Esto se conoce como transferencia del excedente a la red. Este sistema de aplicación no tiene interés desde el punto de vista naval ya que el consumo mayoritario del buque se produce cuando éste está navegando.

2.1.4. Sistema de Generación Solar Fotovoltaica

Una embarcación o buque solar, presente como característica un sistema de generación solar que permite la transformación de energía solar a energía eléctrica. Las embarcaciones solares actuales presentan algunos elementos comunes que forman parte del sistema de generación, gestión y aplicación de la energía que proporciona la fuerza motriz que requiere la embarcación o buque.

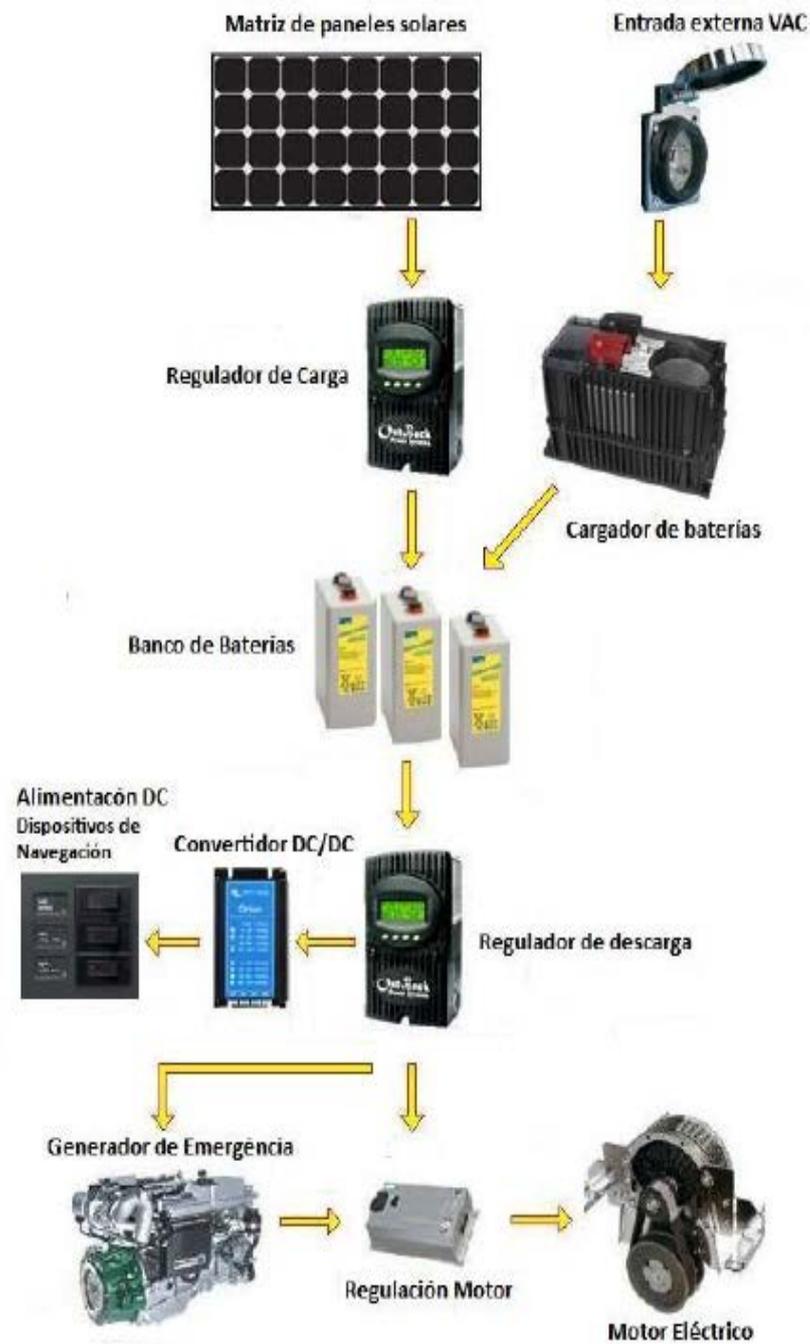


Figura 2.13.- Esquema de componentes de la embarcación solar

Fuente: Carlos Jiménez, 2010

2.1.4.1. Paneles Solares Fotovoltaicos

Una placa solar fotovoltaica se basa en la unión de varias células iguales, pudiéndose ajustar la corriente y tensión hasta un valor que satisfaga al consumidor. Así, la asociación en serie de células aumenta la tensión final de la placa, mientras que al colocarlas en paralelo la unidad que aumenta es la corriente.

Normalmente, en el proceso de construcción, el primer paso es unir celdas en serie hasta conseguir el voltaje deseado, pasando después a la unión en paralelo para ajustar la corriente. Los paneles solares tienen entre 28 y 40 celdas, aunque lo normal es que trabajen con 36. La superficie de estos varía entre 0.1 y 0.5 m² con dos bornes de salida (positivo y negativo), que pueden incluir alguna intermedia para los diodos de protección.

Los paneles cuentan además con otros elementos aparte de las celdas. Dichos elementos dotan a la placa de mejores características de rigidez y sujeción, protección frente a agentes externos y permitiendo la conexión eléctrica. Los elementos más importantes son:

- **Cubierta exterior**

Se trata de un vidrio con una transmisión de luz de más del 90%, resistente a la abrasión e impactos prominentes del exterior. También es antirreflejante, permitiendo la entrada de más luz en la placa, lo que implica una mayor conversión de potencia.

- **Encapsulante**

Hecho de material polímero termoplástico conocido como EVA (etilenvinil-acetato) o de silicona en menor frecuencia, se trata de un sellado y protector contra la entrada de aire, agua o partículas en suspensión que puedan dañar o afectar a la eficiencia de la placa.

- **Marco metálico**

De aluminio o acero inoxidable, proporcionando rigidez y estanqueidad al panel, e incluyendo los elementos de sujeción a la estructura exterior.

- **Diodo de protección**

Permiten el paso de la corriente eléctrica en una única dirección, impidiendo en este caso que regrese a la placa bajo ningún concepto, protegiéndola así de sobre-cargas o alteraciones de funcionamiento.

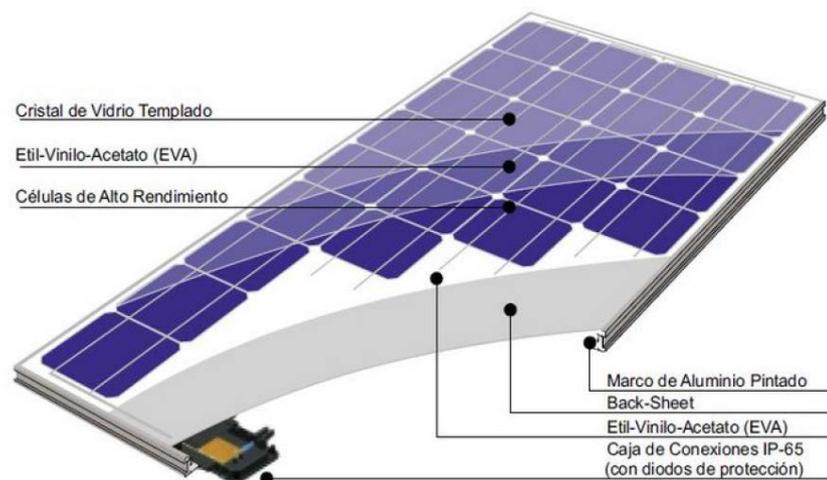


Figura 2.14.- Partes básicas de una placa solar fotovoltaica

Fuente: Oscar López, 2016

Otro apartado importante a destacar cuando se habla de placas solares son los factores externos o internos que afectan directamente en el funcionamiento de la placa.

La temperatura afecta al rendimiento de la placa, dado que la exposición prolongada de la placa hace que ésta aumente progresivamente su temperatura, afectando directamente a su eficiencia. Una radiación de 1000 W/m^2 puede calentar una célula alrededor de 30° por encima de la temperatura del aire circulante. Para reducir en la medida de lo posible este fenómeno, dichos

paneles deben estar colocados en zonas bien aireadas. En caso de no conseguirlo, y dado que la temperatura afecta a la tensión generada, puede plantearse colocar más celdas para incrementar el voltaje. En el caso de las placas en embarcaciones de recreo y similares, este fenómeno se puede controlar en mayor medida que cuando se trata de viviendas, ya que en condiciones de navegación es constante el aire circulante y por tanto la refrigeración de las placas.

La radiación afecta a la intensidad aumentándola, dado que la radiación que incide sobre una placa varía en función del ángulo del sol con el horizonte, debe plantearse la colocación de los paneles cambiando su posición con el tiempo, sea durante un mismo día o durante el año dependiendo de la estación. En una embarcación, los cambios constantes de rumbo dificultan la orientación de las placas, siendo el horizontal la manera más habitual y con mejores resultados. Este factor afectará también a la producción de corriente dependiendo de las condiciones atmosféricas que afectan a la radiación solar que llega (valores entre 1000 W/m^2 a medio día y en pleno sol y de 100 W/m^2 con cielo cubierto).

Por último, hay que diferenciar entre los diferentes tipos de placa solar fotovoltaica dependiendo no tanto del material, ya que cerca del 90% de dichas placas se basan en el silicio, sino por la forma y pureza en que éste se encuentra.

Los tres principales tipos de placas fotovoltaicas en la actualidad son los paneles monocristalinos, los paneles policristalinos y los paneles de capa fina o células amorfas.

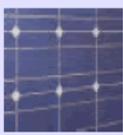
CÉLULAS		RENDIMIENTO LABORATORIO	RENDIMIENTO DIRECTO	CARACTERÍSTICAS	FABRICACIÓN
	MONOCRISTALINO	24 %	15 - 18 %	Es típico los azules homogéneos y la conexión de las células individuales entre sí (Czochralsky).	Se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro.
	POLICRISTALINO	19 - 20 %	12 - 14 %	La superficie está estructurada en cristales y contiene distintos tonos azules.	Igual que el del monocristalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización.
	AMORFO	16 %	< 10 %	Tiene un color homogéneo (marrón), pero no existe conexión visible entre las células.	Tiene la ventaja de depositarse en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como vidrio o plástico.

Figura 2.15.- Tipos de paneles fotovoltaicos

Fuente: Imagen disponible en internet.²¹

2.1.4.2. Paneles solares Monocristalinos

Estas células se cortan de un solo cristal de silicio. Son los paneles más eficientes, pero a su vez los más caros de producir. Deben estar montados en una estructura rígida para su protección, pese a que son rígidos. El método de fabricación es el método Czochralski²², donde se obtienen bloques cilíndricos. Al recortarlos posteriormente en cuatro lados para hacer láminas de silicio, se derrocha una gran cantidad de éste. Todo esto repercute en un mayor precio de fabricación.

Las ventajas principales de estos paneles residen en sus mayores tasas de eficiencia debido a la alta pureza del silicio, hablando siempre de un valor superior al 15% llegando y superando a veces el 21%. La vida de estos paneles es más larga, y sus fabricantes ofrecen con frecuencia garantías de hasta 25

²¹ Datos tomados de :

https://www.ujen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_05.htm

²² El proceso o método de Czochralski consiste en un procedimiento para la obtención de lingotes monocristalinos. Fue desarrollado por el científico polaco Jan Czochralski a partir de 1916. Este método es utilizado para la obtención de silicio monocristalino mediante un cristal semilla depositado en un baño de silicio.

años. En condiciones de poca luz, a su vez, suelen funcionar mejor que los paneles policristalinos similares en características. Por último, pese a que el factor temperatura afecta al rendimiento de estas placas, lo hace en menor medida respecto a las placas policristalinas.

Por el contrario, la principal desventaja reside en los altos costes de estos sistemas. Además, el circuito entero puede averiarse si el panel se cubre parcialmente por una sobra o suciedad. Una solución a este problema es la instalación de microinversores solares en vez de inversores en cadena o centrales.

2.1.4.3. Paneles Solares Policristalinos

Estas células son una reducción de corte de un bloque de silicio compuesto de un gran número de cristales. Montadas también en marcos rígidos, estas placas tienen una eficiencia y coste un poco menor respecto a las anteriores. Esto se debe al uso de un método de fabricación diferente al de las monocristalinas, fundiéndose en este caso el silicio bruto y enfriado en un molde cuadrado, donde posteriormente se corta en láminas perfectamente cuadradas.

La principal ventaja de los paneles policristalinos se encuentra en su precio, mientras que los inconvenientes son una menor resistencia al calor, una eficiencia característica de un 13-16% y de la necesidad de mayor superficie para obtener los mismos resultados que las placas monocristalinas.

Como se ha comentado anteriormente, encontramos que las placas monocristalinas, tienen un coste mayor a las policristalinas, sin embargo, tienen un rendimiento un poco más alto, lo que se traduce en una menor superficie de placa para obtener la misma energía solar producida. Además, las placas monocristalinas tienen mejores propiedades térmicas, conservando mejor su rendimiento al aumentar la temperatura de estas. Pese a las diferencias entre ambas, en cuanto a ventas o demanda se encuentran cerca del 50% una y otra.

2.1.4.4. Dispositivos de Optimización de Energía

En la mayoría de las instalaciones fotovoltaicas para optimizar el rendimiento del sistema se requiere un regulador electrónico instalado entre la salida del panel y la carga, denominado seguidor del punto de máxima potencia (MPPT).

El principio de funcionamiento se basa en la conexión indirecta entre la salida del panel solar y la entrada de la carga. A través de un convertidor CC /CC, se adaptan los niveles de tensión de salida del panel fotovoltaico a los que requiere cada elemento alimentado. Con ello, se podrá trabajar a la máxima potencia cumpliendo el objetivo de generar la máxima cantidad de energía a partir de la radiación solar disponible, independientemente de la tensión de la carga.

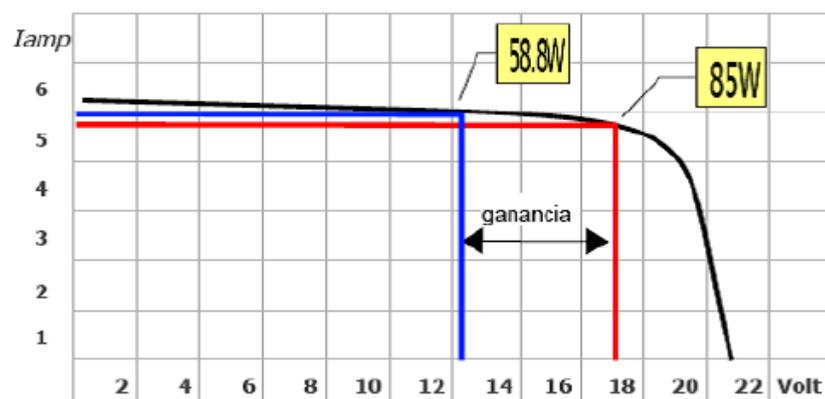


Figura 2.16.- Curva de máxima potencia del panel solar BP585²³

Fuente: <http://www.soltermia.org/T80%20esp.pdf>

Como se puede observar en la figura anterior, el nivel de máxima potencia se encuentra en el punto donde el producto Tensión-Intensidad es mayor. A partir de modelizaciones matemáticas, se comparan valores de tensión e intensidad tomados de la curva característica del panel fotovoltaico de referencia. Con ello es posible conocer sus puntos óptimos de generación de energía. También

²³ Panel solar BP585: Voc 22v Isc 5,1 A / Vmpp 17,6v Impp 4,72A

puede hacerlo mediante el control de variables como la irradiación solar y la temperatura del panel, pero no es un método tan común.

En términos puramente energéticos se puede considerar que el convertidor tiene ciertas pérdidas en su operación. Sin embargo, la eficiencia global del sistema mejorará respecto a instalaciones que carezcan de este elemento.

2.1.4.5. Acumuladores de Baterías

Actualmente existe una gran variedad de tecnologías dentro del campo de la acumulación de energía, con una multitud de posibilidades, a nivel de prestaciones, aplicación y calidad. Desde el punto de vista de aplicación, las baterías se pueden dividir en tres tipos: Arranque, Tracción y Estacionarias.

El primer tipo permite entregar una gran cantidad de energía durante un tiempo muy corto sin tolerar descargas profundas, su aplicación típica es para el arranque en automóviles.

Las de tipo de tracción, son especialmente diseñadas para vehículos eléctricos. Estas tienen más tolerancia a descargas profundas durante periodos más largos, pero pueden someterse a puntuales demandas donde se entrega la energía en tiempos relativamente cortos.

Y por último las de tipo estacionario, que generalmente, están destinadas a acumulación fotovoltaica. Estas permiten entregar la energía de una forma progresiva durante un largo periodo de tiempo y toleran profundidades de descarga importantes que, al vincularlo con las necesidades del proyecto, el tipo de batería a usar sería una tecnología a medio camino entre tracción y estacionaria. Nuestra embarcación es un vehículo eléctrico con ciertas particularidades, donde puede haber periodos de carga similares a las de una instalación fotovoltaica.

Desde un punto de vista de tecnología de fabricación empleada, las más usuales se pueden clasificar en los siguientes tipos: Plomo ácido, Alcalinas y Litio - Ion.

2.1.4.5.1. Plomo Ácido

Las baterías de tipo plomo-ácido fueron las primeras baterías de acumulación de energía eléctrica que se fabricaron. El investigador Gastón Planté, a mediados del siglo XIX, descubrió que, sumergiendo unos electrodos de plomo dentro de una solución de ácido sulfúrico, podía obtener energía eléctrica a partir de la reacción química de los materiales, siendo este proceso reversible.

Pese a su antigüedad, hoy día siguen utilizándose y sigue abarcando una parte importante del sector de acumulación de energía eléctrica. La principal razón, se debe a que los materiales empleados en su fabricación son más accesibles que en otras tecnologías y sus tecnologías de construcción son más sencillas. Sin embargo, no todos son ventajas. La dependencia de su vida útil ante la profundidad de descarga es muy desfavorable.

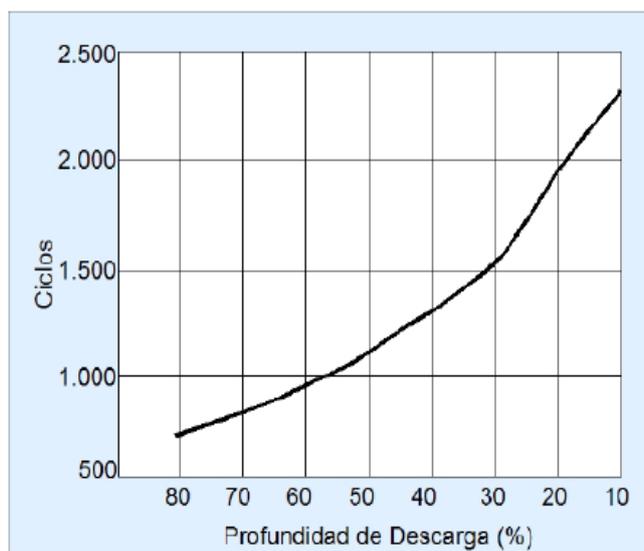


Figura 2.17.- Ciclos de vida - Profundidad de descarga en baterías de Pb-Ad

Fuente: Máster en energía para el desarrollo²⁴

²⁴ Imágenes tomadas de Máster en energía para el desarrollo sostenible. Módulo 5. Energía solar Fotovoltaica. Cátedra Unesco Universidad Politécnica de Cataluña. 3ª Edición. 2008.

Los ciclos útiles de la batería disminuyen proporcionalmente con la profundidad de descarga a la que se le someten. Otro inconveniente es su baja densidad energética, parámetro esencial para aplicaciones en las que el peso de la batería sea determinante.

Su principio de funcionamiento mantiene el concepto de la batería original, aunque se han desarrollado modificaciones importantes en las diferentes tecnologías de construcción y el tipo de electrolito empleado. Se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- **Con electrolito líquido / Húmedas**

La opción más simple dentro de las baterías de plomo ácido. El electrolito se encuentra en estado líquido en contacto con los electrodos metálicos. Sus prestaciones son limitadas. Tiene el inconveniente de la sulfatación, que consiste en pérdidas sufridas por emisión de gases (H_2 y O_2) hecho que requiere un mantenimiento para reponer esa agua evaporada.

- **Con electrolito en gel / Secas**

La principal diferencia respecto a la anterior es que su electrolito tiene un compuesto añadido: dióxido de silicio (SiO_2), éste lo gelifica dándole una consistencia menos líquida.

Generalmente están selladas, así que no dejan salir los gases derivados de la gasificación la operación de la batería. Para compensar la pérdida de agua del electrolito, existe un proceso químico que combina los gases de hidrógeno y oxígeno volviéndolos a convertir en agua. Así solucionan el problema de pérdida de agua y no se requiere ningún mantenimiento.

Otra característica relevante se muestra cuando ante un posible aumento de presión ocasionado por los gases dentro de la batería, se incorporan

unas válvulas de seguridad que liberar este exceso en caso de que se supere un valor máximo determinado por el propio fabricante.

- **AGM (Absorved Glass Mat)**

Se puede considerar como una combinación de las tecnologías mencionadas. El electrolito se deposita en una rejilla de fibra de vidrio absorbente. Dicha rejilla se ubica entre los electrodos positivo y negativo de la celda. Así funciona como electrolito líquido, con las ventajas de la batería seca. Están selladas, por lo que no requieren mantenimiento durante su vida útil.

En conclusión, las baterías de Pb-Ad son óptimas para ciertas instalaciones, en las que no importante demasiado su peso y dimensiones, y en configuraciones que permitan evitar profundidades de descarga demasiado altas para no comprometer su vida útil.

2.1.4.5.2. Baterías Alcalinas

Denominadas alcalinas por los tipos de metal que las componen. Su tecnología mantiene el concepto de las baterías plomo-ácido. Es decir, un electrodo positivo y otro negativo sumergidos en un electrolito, con la diferencia en los tipos de materiales utilizado.

Los primeros modelos eran en baterías domésticas de poca potencia para pequeños dispositivos electrónicos, hasta evolucionar a modelos de uso industrial. Siendo las de Níquel – Cadmio las más desarrolladas y experimentadas dentro de este tipo de baterías. Estas baterías se componen por dos tipos de metales, hidróxido de níquel en el ánodo y un compuesto de cadmio para el cátodo, y con una composición del electrolito, comúnmente usado el hidróxido de potasio (metal alcalino).

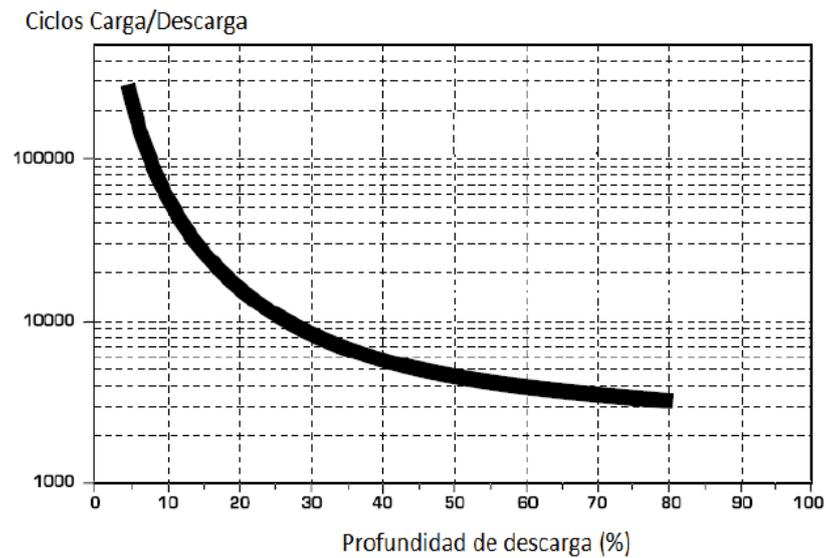
Esta tecnología presenta grandes ventajas respecto a las de plomo, destacando los siguientes puntos:

- Mayor profundidad de descarga, sin verse tan afectada por la tecnología de plomo.
- Debido al tipo de material utilizado fabricación, no se ven afectadas por la corrosión ni la sulfatación. Esto implica su mayor vida útil y un envejecimiento lineal y predecible.
- Soportan un rango más amplio de temperaturas
- Su densidad energética es mayor, aunque los niveles de tensión que entrega son inferiores, por lo que la diferencia no es tan notable.

Pese a ser una batería con buenas prestaciones, tiene sus inconvenientes, entre las cuales podemos mencionar que:

- Sigue teniendo un coste más elevado que las de Pb-Ad, (a pesar de más vida útil)
- Sufren el conocido efecto memoria que merma su capacidad de acumulación.
- La toxicidad de los metales empleados en su fabricación las hace menos atractivas.

Otro factor importante por considerar es que el cadmio es un metal con un alto poder contaminante muy difícil de reciclar, si no se le aplica una correcta disposición en celdas de seguridad, puede ocasionar graves problemas ambientales. Esta característica se ha considerado como un aspecto muy negativo, dejando esta tecnología descartada para los fines de este trabajo.



**Figura 2.18.- Ciclos de vida - profundidad de descarga en
Baterías de Ni-Cd**

Fuente: <http://saftbatbatteries.com>

2.1.4.5.3. Baterías de Litio- Ion

Inicialmente fueron baterías de pequeño tamaño, siendo empleadas únicamente para aplicaciones de poca potencia. Actualmente siguen cumpliendo dicha función en pequeños dispositivos electrónicos como teléfonos móviles y ordenadores portátiles, sin embargo, se han desarrollado varias tecnologías de baterías para aplicaciones de mayor demanda de energía como la acumulación en vehículos eléctricos.

La tecnología de las baterías Li-Ion se basa en utilizar un ánodo de grafito sobre el cual se intercalan iones de litio. Posteriormente, estos iones fluyen hacia el polo opuesto a través del electrolito de sales de litio contenidas en una fibra porosa. El cátodo está compuesto por óxido de cobalto, de manganeso o fosfato, dependiendo de estos últimos materiales, las prestaciones de la batería pueden variar notablemente.

Su nivel de desarrollo ha permitido la obtención de una batería con grandes ventajas, éstas se resumen a continuación:

- En términos de tensión, genera el equivalente a tres baterías de tipo alcalino.
- Tiene el mejor valor de densidad energética, del orden de 90 hasta 190 Wh/Kg²⁵
- Poseen cantidades de metales contaminantes notablemente inferior en comparación con las otras tecnologías.
- La entrega de energía es muy lineal (es independiente del nivel de carga de la batería)

Es una batería con excelentes prestaciones, pero mucho más compleja, por lo que se debe tener especial atención en los siguientes factores:

- Evitar sobrecargas ya que puede resultar muy peligroso (inflamación). Cuando se conecten en bancos de baterías en serie o paralelo, se recomiendan circuitos electrónicos de protección que realicen un control preciso sobre valores máximos de tensión e intensidad durante los procesos de carga y descarga.
- Otro factor negativo es la baja tolerancia a niveles extremos y cambios bruscos de temperatura. Puede resultar un factor muy limitante para cierto tipo de instalación.
- Su coste sigue siendo elevado, del orden de tres veces superior a las de plomo ácido.

Para concluir, pese a ciertas desventajas, este tipo de tecnología ha llegado a niveles muy competitivos para ser utilizada como acumuladores de tracción.

²⁵Datos de Tecnología de Li-Ion Cobalto, utilizada para pequeños aparatos. (Jiménez Laos, 2010)

Tabla 2.2.- Características de los diferentes tipos de baterías

	Nickel-cadmium	Nickel-metal-hydride	Lead-acid sealed	Lithium-ion cobalt	Lithium-ion manganese	Lithium-ion phosphate
Gravimetric Energy Density (Wh/kg)	45-80	60-120	30-50	150 - 190	100 - 135	90 - 120
Internal Resistance in mΩ	100 to 200 ¹ 6V pack	200 to 300 ¹ 6V pack	<100 ¹ 12V pack	150 - 300 ¹ pack 100 -130 per cell	25 – 75 ² per cell	25 – 50 ² per cell
Cycle Life (to 80% of initial capacity)	1500 ²	300 to 500 ^{3,4}	200 to 300 ³	300 - 500 ³	Better than 300 – 500 ⁴	>1000 lab conditions
Fast Charge Time	1h typical	2 to 4h	8 to 16h	1.5 - 3h	1h or less	1h or less
Overcharge Tolerance	moderate	low	high	Low. Cannot tolerate trickle charge.		
Self-discharge / Month (room temperature)	20% ⁵	30% ⁵	5%	<10% ⁵		
Cell Voltage Nominal Average	1.25V ⁷	1.25V ⁷	2V	3.6V 3.7V ⁶	Nominal 3.6V Average 3.8V ⁶	3.3V
Load Current peak best result	20C 1C	5C 0.5C or lower	5C ⁹ 0.2C	<3C 1C or lower	>30C 10C or lower	>30C 10C or lower
Operating Temperature ¹⁰ (discharge only)	-40 to 60°C	-20 to 60°C	-20 to 60°C	-20 to 60°C		
Maintenance Requirement	30 to 60 days	60 to 90 days	3 to 6 months ¹¹	not required		
Safety	Thermally stable, fuse recommended	Thermally stable, fuse recommended	Thermally stable	Protection circuit mandatory; stable to 150°C	Protection circuit recommended; stable to 250°C	Protection circuit recommended; stable to 250°C
Commercial use since	1950	1990	1970	1991	1996	2006
Toxicity	Highly toxic, harmful to environment	Relatively low toxicity, should be recycled	Toxic lead and acids, harmful to environment	Low toxicity, can be disposed in small quantities		

Fuente: <http://www.batteryuniversity.com/partone-3.htm>

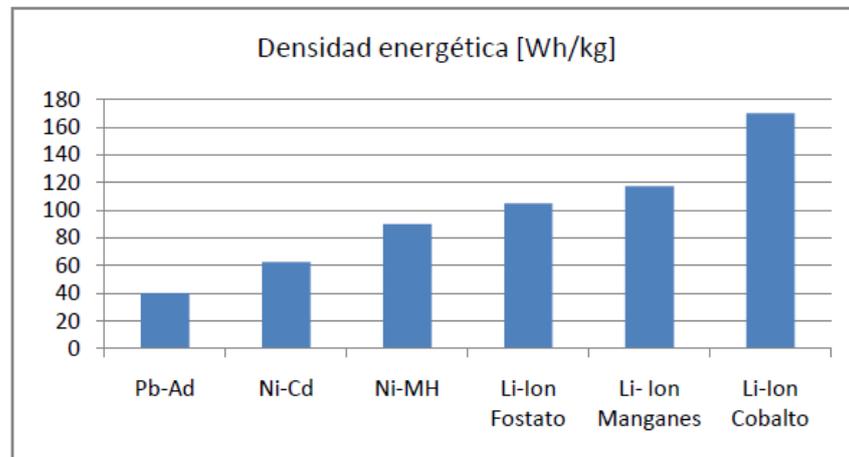


Figura 2.19.- Densidad energética media de diferentes tipos de baterías

Fuente: Jiménez Laos, 2010

2.1.4.6. Motores Eléctricos

Entre los diferentes tipos de motores se pueden clasificar en los de corriente alterna y los de corriente continua, y dentro de estos, existe un abanico de posibilidades muy amplio, en función de la aplicación del motor, rango de potencia, necesidad de regulación, etc.

2.1.4.6.1. Motores de corriente alterna

Su principio de funcionamiento está basado en las leyes del electromagnetismo, donde se establece una relación del campo magnético giratorio creado en el estator²⁶ con el campo inducido en el rotor.²⁷ Para facilitar su comprensión se muestra la siguiente secuencia:

- Se aplica una corriente eléctrica en el bobinado del estator.
- Esta corriente eléctrica genera un campo magnético en el propio estator.
- Dicho campo magnético induce una corriente en el bobinado del rotor.
- Esta corriente genera una fuerza electromotriz que permite el giro.

²⁶ Estator: Es la parte estática del motor a la que también se le puede denominar inductor.

²⁷ Rotor: Parte móvil giratoria del motor a la que también se le puede denominar inducido.

Dentro de los motores de corriente alterna tenemos los de tipo síncrono y los asíncronos.

El motor asíncrono es la más sencilla tecnología en la construcción de motores. Aunque inicialmente fue diseñado para trabajar a velocidades y cargas constantes acepta variaciones en su régimen de giro.

La denominación asíncrona viene dada, a que la velocidad del campo magnético giratorio del estator no corresponde con la del rotor. A este desfase de velocidades se le denomina deslizamiento. La velocidad de giro de un motor asíncrono es igual a la velocidad del campo magnético menos el deslizamiento del rotor.

Dependiendo del tipo de construcción de su rotor, se pueden dividir en dos tipos: rotor bobinado o anillos rodantes, y el rotor de jaula de ardilla. El primer tipo, utiliza un rotor que aloja un bobinado eléctrico alimentado mediante unas escobillas. Mientras que el rotor de jaula es un bloque compacto que lleva encastradas unas barras de cobre o aluminio que cumplen la función de circuito magnético.

A nivel funcional, se diferencian en que los de rotor bobinado permiten la regulación eléctrica mediante la modificación del valor de unas resistencias externas, con ello se puede modificar el par de arranque. Por ello el de rotor bobinado tiene una cierta flexibilidad en cuanto a sus características eléctricas. En cambio, el de jaula de ardilla no permite ninguna modificación.

A pesar de todo, con los controles de motores disponibles actualmente es más conveniente utilizar uno de jaula de ardilla, ya que no requiere ningún tipo de mantenimiento eléctrico, es más robusto y su construcción es más simple y en consecuencia más económica.

El par motor depende directamente de las corrientes del rotor, que en el arranque son muy elevadas y disminuyen a medida que aumenta la velocidad (par de arranque y par normal).

El motor síncrono tiene un principio básico de diferente de los de tipo asíncrono. Éstos requieren una excitación eléctrica en el bobinado de su rotor para generar movimiento. Es decir, la corriente de alimentación del bobinado del estator más la que excita el rotor.

La característica síncrona, viene dada porque la velocidad de giro del rotor es la misma que la del campo magnético generado en el estator, es decir se mantienen en sincronía. Este tipo de motores suelen utilizarse en grandes máquinas con carga variable y necesitan trabajar a una velocidad constante. Por su tipo de construcción y grandes fuerzas de inercia no se recomiendan para aplicaciones de velocidad variable.

2.1.4.6.2. Motores de corriente continua

Todas las máquinas eléctricas (motores o generadores) necesitan una relación entre campos magnéticos para generar movimiento, o dicho de otro modo convertir energía eléctrica en mecánica. Así que el motor de corriente continua mantiene el mismo concepto de funcionamiento que los de alterna, excepto que los campos magnéticos son generados por una componente continua y unos polos magnéticos ubicados en el estator. De todas las tecnologías en máquinas de corriente continua, se clasifican en dos categorías: de autoexcitación y de excitación independiente.

Los primeros son motores que incorporan un sistema de excitación con la propia corriente de la máquina, los hay de conexión serie, paralelo y mixto. Los de excitación independiente, se clasifican en motores de campo devanado y motores de imán permanente. Siendo este último, el motor de imanes permanentes, el que se va a describir debido a su idoneidad para nuestro diseño.

En este tipo de motor se caracterizan porque utilizan la combinación de campos magnéticos de naturaleza permanente (Imanes) y los campos magnéticos producidos por la corriente de excitación externa que fluye a través de los bobinados.

El campo magnético genera por unos imanes ubicados en el estator. Induciendo corrientes mediante dos imanes fijos que poseen de por sí, la propiedad magnética.

Como ventaja, no requiere energía para la excitación de dichos polos magnéticos. Así se evitan pérdidas y se mejora la eficiencia del motor (dependiendo del tamaño puede ser importante). Posee grandes aceleraciones, ya que por su constitución tiene una inercia menor que el resto. La relación entre la velocidad y la tensión es muy lineal. También lo es el par motor con la corriente. En los dos casos, se podría decir que son casi proporcionales.

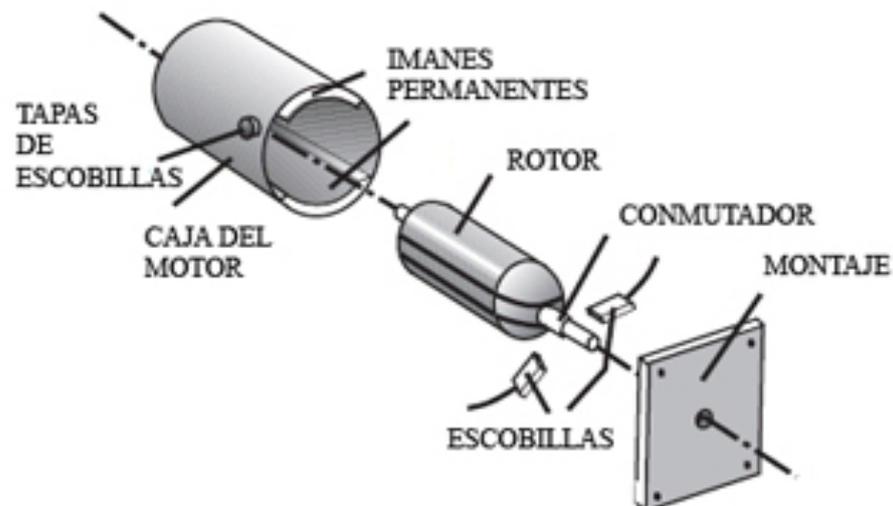


Figura 2.20.- Esquema de un motor de imanes permanentes

Fuente: <http://www.sapiensman.com>²⁸

No se tiene un control del campo de excitación ya que está fijado por la característica del imán. Pese a que pueda parecer un inconveniente, puede resultar muy útil para diseños en los que se requiera una excitación constante.

En cuanto a sus inconvenientes, se pueden describir dos. En condiciones de uso muy desfavorables, se pueden desmagnetizar sus imanes. Aunque de un modo muy leve, puede llegar a niveles irreversibles que empeoran sus condiciones

²⁸ Tomado de : http://www.sapiensman.com/tecnoficio/electricidad/tipos_de_motores_electricos.php

de funcionamiento. En segundo lugar, hay que mencionar que este tipo de motor posee el precio más elevado.

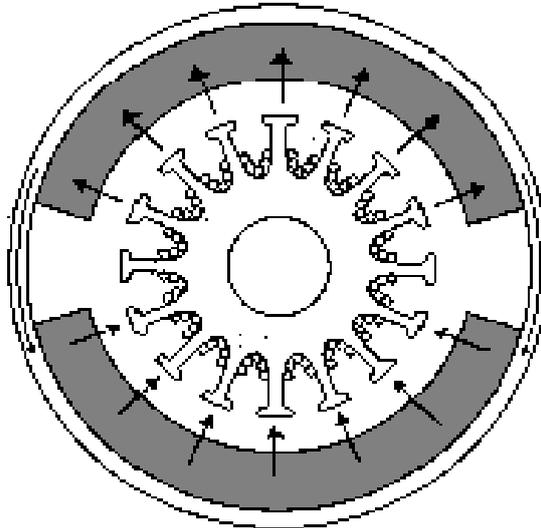


Figura 2.21.- Motor de imanes permanentes

Fuente: <http://proton.ucting.udg.mx>²⁹

2.1.4.7. Regulación de Motores

Partiendo de la necesidad de un control en la velocidad que llevaría la embarcación, se hace obvia la necesidad de un sistema que permita regular la velocidad de giro de los motores que proporcionan la fuerza motriz a la hélice del sistema de propulsión. Otra necesidad es el control del cambio del sentido en los motores, prestación necesaria para el frenado de la embarcación y la posibilidad de maniobrar en sentido contrario. Es decir, desplazarse marcha atrás. Dicho control no puede ser de tipo “Todo-Nada”, así que se precisará de un control de velocidad preciso, que permita cambios progresivos en el régimen de potencia del motor.

Las diferentes tecnologías empleadas en la regulación de motores pueden variar depende de la magnitud controlada, pudiendo haber reguladores

²⁹ Tomado de: <http://proton.ucting.udg.mx/dpto/tesis/quetzal/CAPITUL4.html>

mecánicos, hidráulicos, eléctricos y puramente electrónicos. Cada tecnología tiene sus parámetros específicos, por lo que analizarlos todos resultaría demasiado extenso.

En términos generales, dependiendo del tipo de motor los reguladores se pueden dividir en dos grandes grupos: control de motores de corriente alterna y control de motores de corriente continua.

2.1.4.7.1. Regulación de motores AC

Dada la imposibilidad de una regulación de velocidad a través de la tensión de entrada, se necesita un dispositivo electrónico que varíe otros parámetros de la señal. Éste es el variador electrónico de frecuencia.

El dispositivo regula la frecuencia del voltaje de entrada del motor, logrando modificar su velocidad. Sin embargo, simultáneamente con el cambio de frecuencia, se debe variar el voltaje aplicado al motor para evitar una corriente elevada que dañaría el motor.

Los variadores más utilizados utilizan modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) que permite regular la frecuencia de una forma óptima. El dispositivo modifica la señal de entrada de corriente alterna y de algún modo varía la forma en que entrega la energía.

Se explica brevemente las etapas sobre las que trabaja un variador de frecuencia:

1. Rectificación. Convierte la tensión AC en DC.
2. Filtrado. Se filtra la tensión rectificada para reducir la emisión de armónicos.
3. Inversor. Convierte la señal continua en otra de tensión y frecuencia variables.
4. Etapa de control. Se permiten controlar parámetros externos.

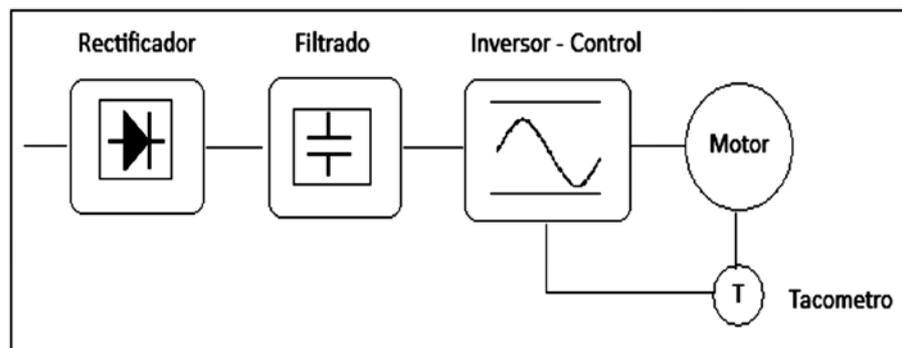


Figura 2.22.- Diagrama de flujo - Variador de frecuencia

Fuente: Jiménez Laos, 2010

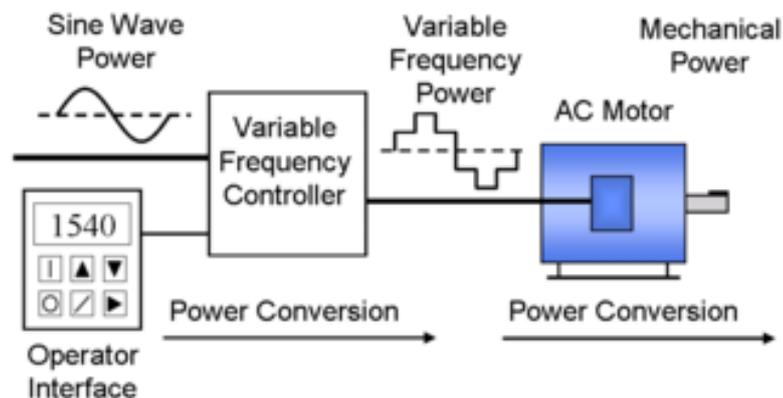


Figura 2.23.- Esquema de un variador de frecuencia

Fuente: Imagen disponible en internet.³⁰

Una breve descripción en cuanto a los elementos electrónicos implicados en el proceso.

- En la primera etapa de rectificación, mediante diodos o tiristores se convierte la señal de entrada a una señal continua (con armónicos).
- La señal circula a través de condensadores y bobinas que la filtran para reducir los armónicos y obtener una señal de continua de mejor calidad.
- En la etapa del inversor, se crea la señal variable mediante IGBT's (Transistor bipolar controlado) que generan pulsos controlados de

³⁰ Imagen tomada de: <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/1196088>

tensión de duración variable, y así se obtiene una corriente prácticamente senoidal para alimentar el motor.

- Los equipos de última generación incorporan IGBT's gestionados por microprocesador que consigue optimizar el control.

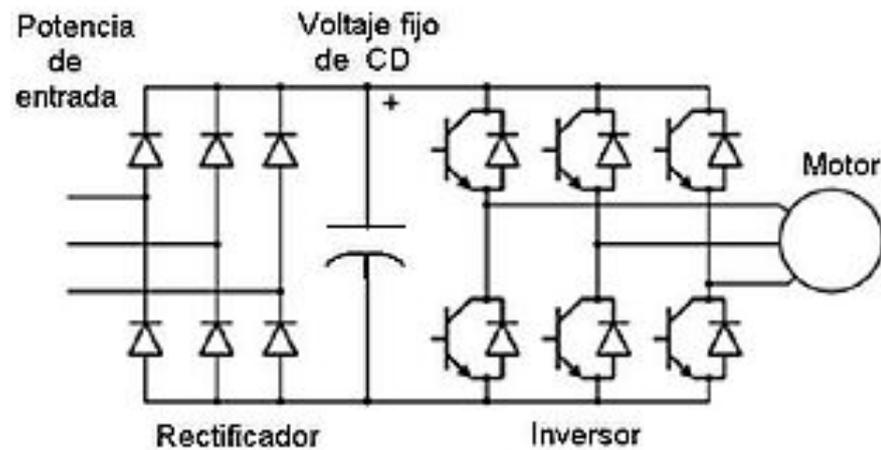


Figura 2.24.- Variador de frecuencia con Modulación (PWM).

Fuente: Jiménez Laos, 2010

A modo resumen, el control de la velocidad de los motores AC requieren un dispositivo que regule de forma precisa los niveles de frecuencia de la señal que alimenta el motor. Dicha señal tiene que ser lo más lineal posible sin armónicos ni oscilaciones.

2.1.4.7.2. Regulación de motores DC

En motores de corriente continua, la velocidad de giro es proporcional a tensión de inducido, lo que indica que al variar tensión o intensidad de entrada se puede controlar su velocidad.

Según la magnitud que se va a variar, existen las siguientes posibilidades de control.

- Tensión. Variar su nivel de la entrada al devanado inducido.
- Intensidad. Variar el flujo de corriente del inductor.

El método de regulación más utilizado es el de tensión. Dentro de los de ellos, el control electrónico es el que mejor se adecua a un sistema en el que el aprovechamiento de energía es primordial. Por ejemplo, utilizando un reóstato, se desperdicia energía y en consecuencia disminuye la eficiencia global del sistema.

El procedimiento de control consiste en variar el voltaje de alimentación del motor, manteniendo constante su excitación. Se opera la señal de corriente continua con transistores de potencia que realizan la conmutación en tiempos ínfimos. El dispositivo encargado de hacerlo, se le denomina convertidor continuo-continuo. Existen complejos modelos matemáticos que permiten llevar la regulación de los puntos óptimos, como los sistemas de control en lazo cerrado. Pero su desarrollo sería demasiado extenso saliendo del alcance del presente proyecto.

Para entender el concepto de regulación de velocidad por variación de la alimentación del motor, se va a describir un circuito electrónico básico, capaz de variar los niveles de tensión de una señal continua, y se va a hacer una breve reseña sobre los otros tipos más desarrollados. Se trata de un convertidor CC-CC elevador. Su principio de funcionamiento es derivar una corriente a una bobina, mediante la operación de un conmutador electrónico de alta velocidad, para posteriormente entregarla a la red.

La etapa de funcionamiento en la que trabaja el conversor es la siguiente:

1. Mientras el conmutador está cerrado, la energía se acumula en la bobina, y es el condensador el que mantiene la tensión de salida hacia la carga.
2. Cuando el conmutador abre, la tensión de salida es la suma del valor nominal de entrada más la que aporta la bobina al devolver la energía almacenada.
3. De esta forma consigue elevar la tensión a los niveles de diseño.

El elemento de conmutación es el dispositivo electrónico de potencia IGBT (Transistor bipolar controlado) regulado para que durante un determinado tiempo esté abierto y el resto cerrado. Dicho periodo de tiempo depende de una variable de control del circuito denominada ciclo de trabajo (D), que indica el porcentaje de tiempo en el que el conmutador está cerrado (y la bobina acumula energía). Con la bobina de entrada y el condensador de salida, ya se tiene el filtro necesario para que la corriente de entrada y la tensión de salida tengan un nivel de calidad aceptable, determinando el valor óptimo de estos componentes, se puede limitar la cantidad de rizado que tendrá la componente continua.

El tipo de convertidor explicado tiene ciertos límites en el control de la señal. Aunque siguiendo el mismo concepto y utilizando los mismos componentes se puede montar el convertidor CC-CC reductor, o bien el elevador-reductor, que sería el más versátil.

El elevador-reductor permite variar el ciclo de trabajo D, de 0 a 1, es decir un rango de variación del 100% que teóricamente permite regular la tensión de salida desde 0 a infinito, evidentemente dentro de unos límites de potencia.

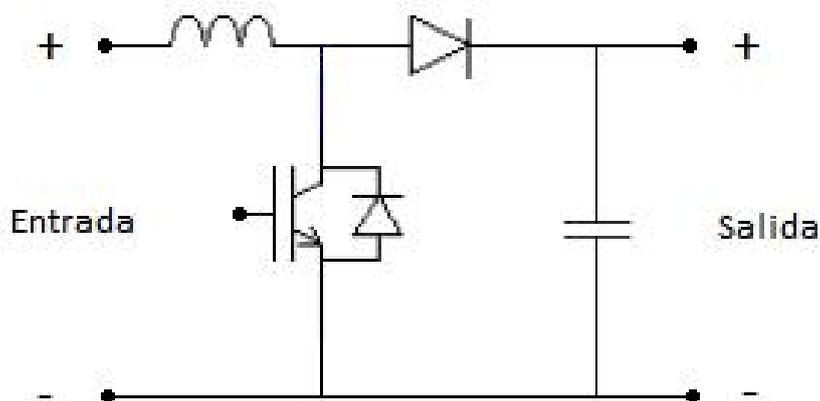


Figura 2.25.- Esquema general de un variador de frecuencia trifásico

Fuente: Jiménez Laos, 2010

2.2. FUNDAMENTOS DEL DISEÑO DE EMBARCACIONES

El diseño naval abarca un sin número de consideraciones y temas a tratar, estos pueden ser: los cálculos de arquitectura naval (ligados a las formas y características intrínsecas del buque), los cálculos ligados a la resistencia al avance y propulsión, el dimensionamiento y escantillonado de los elementos estructurales, los cálculos ligados a los sistemas principales y auxiliares del buque (sistema eléctrico, sistemas de propulsión y gobierno, entre otros, desde una perspectiva de componentes y elementos), los cálculos de los accesorios del casco, la selección de materiales, habitabilidad, entre otros. Todos estos, al ser combinados y al interrelacionar sus variables nos dan como resultado el diseño perfectible de una embarcación que, en última instancia, es la optimización dicha nave.

Nos centraremos en las teorías y formulaciones ligadas al cálculo de elementos de arquitectura naval, la resistencia al avance, estabilidad y nociones básicas para el cálculo del sistema eléctrico. El dimensionamiento de los elementos estructurales está ampliamente desarrollado por las reglas de Clasificación, de las cuales, según el capítulo y de acuerdo con el tema se mencionarán sus lineamientos y formulaciones.

2.2.1. Elementos del diseño de Arquitectura Naval

El cálculo de arquitectura naval parte por definir el buque, embarcación o flotador como concepto, y para ello se debe establecer los requisitos de diseño. Teniendo en cuenta esto, tenemos que elegir una embarcación que responda a las limitantes planteadas en los capítulos anteriores, los cuales nos han llevado a considerar los siguientes puntos:

- Menor resistencia al avance
- Mayor estabilidad
- Estructuración ligera
- Superficie de captación solar

- Acomodación de pasajeros.
- Medios de reserva y gestión eléctrica.
- Sistemas y medios complementarios.

Al revisar los diseños disponibles y embarcaciones actuales se ha elegido un catamarán para ser el prototipo que responda a los requerimientos que hemos planteado. La selección del tipo, formas y otros se verán con mayor detalle en el siguiente capítulo.

2.2.1.1. Dimensiones Principales

La selección de las dimensiones principales puede ser definida mediante varios métodos como el método geométrico – similar, regresión lineal, estadístico – matemático o una combinación de ellas.

En nuestro caso usaremos una combinación del método de regresión lineal con el método geométrico - similar a partir de una serie sistemática elegida. Para ello, debemos tener un banco de datos preliminares y luego evaluar si cumplen con los objetivos planteados, para luego ser ajustados de ser necesario.

La regresión geométrica consiste en establecer a partir de una data de catamaranes disponibles, una función lineal que relacione las dimensiones principales a partir de la eslora deseada.

Con estas proporciones podemos dimensionar preliminarmente y ajustarlas a una serie sistemática elegida. A modo de ejemplo, realizaremos un cálculo rápido con los siguientes datos presentados en las siguientes tablas.

Tabla 2.3.- Data para el método de regresión lineal

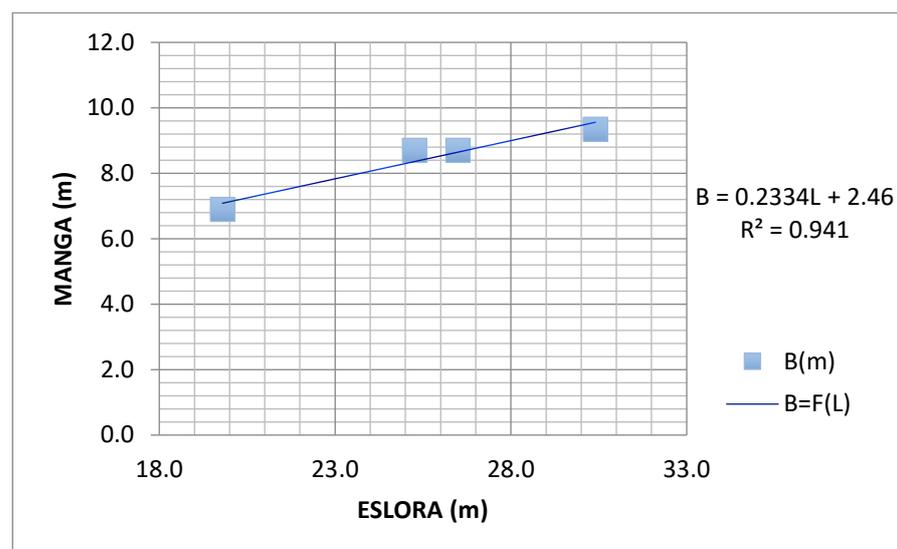
Nombre	L (m)	B(m)	T (m)
Lagilagi	19.8	6.9	1.0
Mackinac Express	25.3	8.7	2.1
Payar	26.5	8.7	2.0
Athena	30.4	9.4	2.0
Promedio	25.49	8.41	1.78

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.4.- Proporciones y relaciones

Nombre	L/B	B/T	L/T
Lagilagi	2.9	6.9	19.8
Mackinac Express	2.9	4.1	12.0
Payar	3.0	4.4	13.3
Athena	3.3	4.7	15.2
Promedio	3.0	5.0	15.1

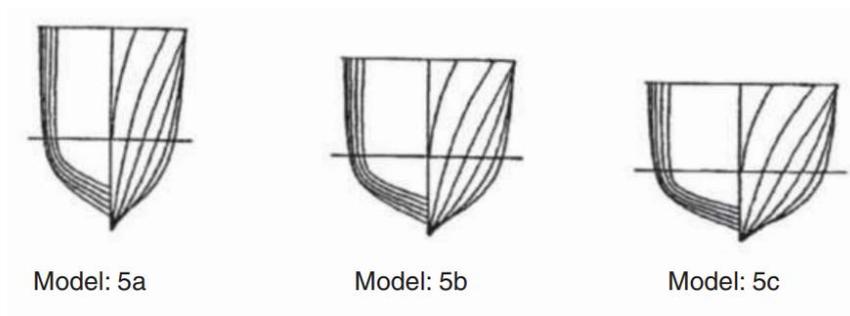
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2.26.- Regresión Lineal - B: f (L)**

Fuente: Elaboración propia

La serie sistemática Southampton es una serie de formas de casco tipo catamarán, del tipo semidesplazamiento de alta velocidad, desarrollada por la Universidad de Southampton. Estas formas de casco son adecuadas para buques veloces de semidesplazamiento y otras aplicaciones similares a nuestro proyecto.

La Figura 2.27 muestra las características de los semicascos usados en esta serie y los datos que se obtuvieron.



Model	$L(m)$	L/B	B/T	$L/\nabla^{1/3}$	C_B	C_P	C_M	$S(m^2)$	$LCB \%L$
3b	1.6	7.0	2.0	6.27	0.397	0.693	0.565	0.434	-6.4
4a	1.6	10.4	1.5	7.40	0.397	0.693	0.565	0.348	-6.4
4b	1.6	9.0	2.0	7.41	0.397	0.693	0.565	0.338	-6.4
4c	1.6	8.0	2.5	7.39	0.397	0.693	0.565	0.340	-6.4
5a	1.6	12.8	1.5	8.51	0.397	0.693	0.565	0.282	-6.4
5b	1.6	11.0	2.0	8.50	0.397	0.693	0.565	0.276	-6.4
5c	1.6	9.9	2.5	8.49	0.397	0.693	0.565	0.277	-6.4
6a	1.6	15.1	1.5	9.50	0.397	0.693	0.565	0.240	-6.4
6b	1.6	13.1	2.0	9.50	0.397	0.693	0.565	0.233	-6.4
6c	1.6	11.7	2.5	9.50	0.397	0.693	0.565	0.234	-6.4

Figura 2.27.- Características de los modelos de la serie Southampton

Fuente: F.Molland (2011)³¹

La serie cubrió el siguiente rango de velocidades y parámetros del semicasco, como se muestran a continuación:

- Velocidad: Fr: 0.20–1.0.

³¹ Tomado del libro: Ship resistance and propulsión, F. Molland (2011), pág. 224.

- Parámetro del semicasco: CB: 0.40 (ajustado);
- $L/\nabla^{1/3}$: 6.3–9.5;
- B/T: 1.5, 2.0, 2.5;
- LCB: 6.4% aft;
- $SC/L = 0.20, 0.30, 0.40, 0.50$.

Para darnos una idea general, se muestra esquemáticamente algunas distancias y proporciones geométricas que las series sistemáticas toman en cuenta para los cálculos de propulsión y resistencia al avance.

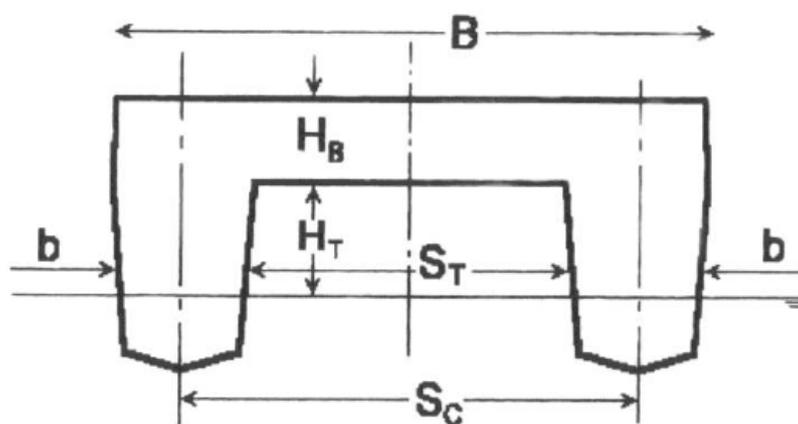


Figura 2.28.- Esquema de proporciones para Series Sistemáticas

Fuente: Imagen disponible en internet.³²

Dónde:

- b: manga del semicasco (m)
- SC: separación entre las líneas de crujía de los semicascos (m).
- ST: separación entre casco (m)
- HT: Altura hacia la plataforma (m)
- HB: Altura de la plataforma (m)
- B: Manga del buque, catamarán (m)

³² Tomado de: https://www.researchgate.net/figure/Basic-Catamaran-Dimensions_fig1_229034772

2.2.1.2. Acomodación y espacios

Generalmente, los espacios asignados obedecen a criterios de diseño basados en la experiencia, el confort y la construcción de cada tipo de buque.

La acomodación de una embarcación de pasajeros debe poseer y definir zonas como: el área asignada a pasajeros, su ubicación, salidas, distribución y complementos, pasillos y servicios, baños y complementos, Tripulación, áreas para recepción y/o similares, además de espacios complementarios como cocinas, salas de estar, entre otros.

Los espacios son definidos según la duración del viaje, viajes cortos o largos deben tener al menos espacios públicos como: bares, restaurantes, u otros, que permitan que el pasajero pueda moverse y, evitar malestares por permanecer prolongadamente en una sola posición, por lo que pasadizos y servicios comunes deben ser provistos de ser necesarios. Cuando se establece y asigna espacios, se puede seguir un estándar recomendado, ver proyectos similares y establecer alguna medida o elegir una, en base a nuestros propios requisitos y criterios.

Tabla 2.5.- Áreas de Pasaje – Buque tipo PAX.

ÁREAS PARA PASAJE

Pasaje sentado	1,5-2 m ² /PAX.
Camarote doble de lujo	30 m ² .
Camarote doble	15 m ² .
Camarote cuádruple	15 m ² .
Pasillos y servicios	10 % área total PAX.
Espacios públicos	4-5 % área total PAX.
Tripulación	12 m ² /tripulante.

Fuente: Proyecto básico del buque mercante, pág. 530.

Para poder definir algunos espacios tomaremos como referencia algunas de las áreas para pasaje de un buque de pasajeros tipo PAX y de uno tipo catamarán. De este modo, podemos tener un criterio acorde a los estándares internacionales.

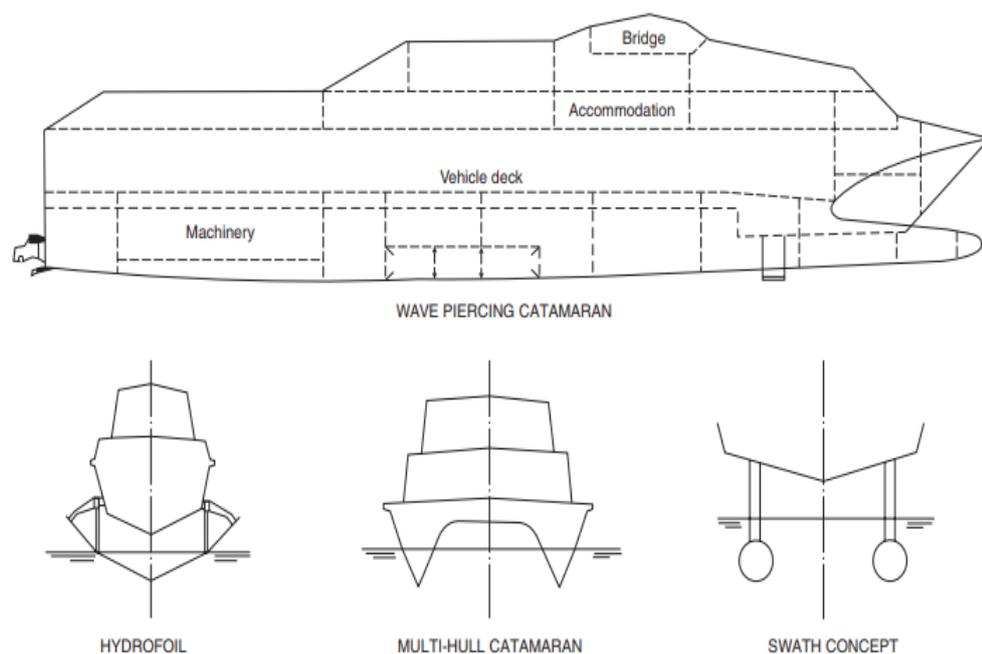


Figura 2.29.- Áreas de Pasaje – Buque tipo catamarán

Fuente: Ship Construction, pág. 27.

2.2.1.3. Disposición general

La disposición general representa la acomodación y la asignación de espacios en los planos fundamentales del buque. La disposición general de una embarcación se presenta en un plano típico, que suele llamarse, arreglo general.

Generalmente se representa la cubierta principal e intermedia (si las tuviese), una vista transversal de popa y/o proa, vistas de elevación y otras según crea conveniente. El propósito de estas es representar el espacio asignado al proyecto y definir con claridad la acomodación.

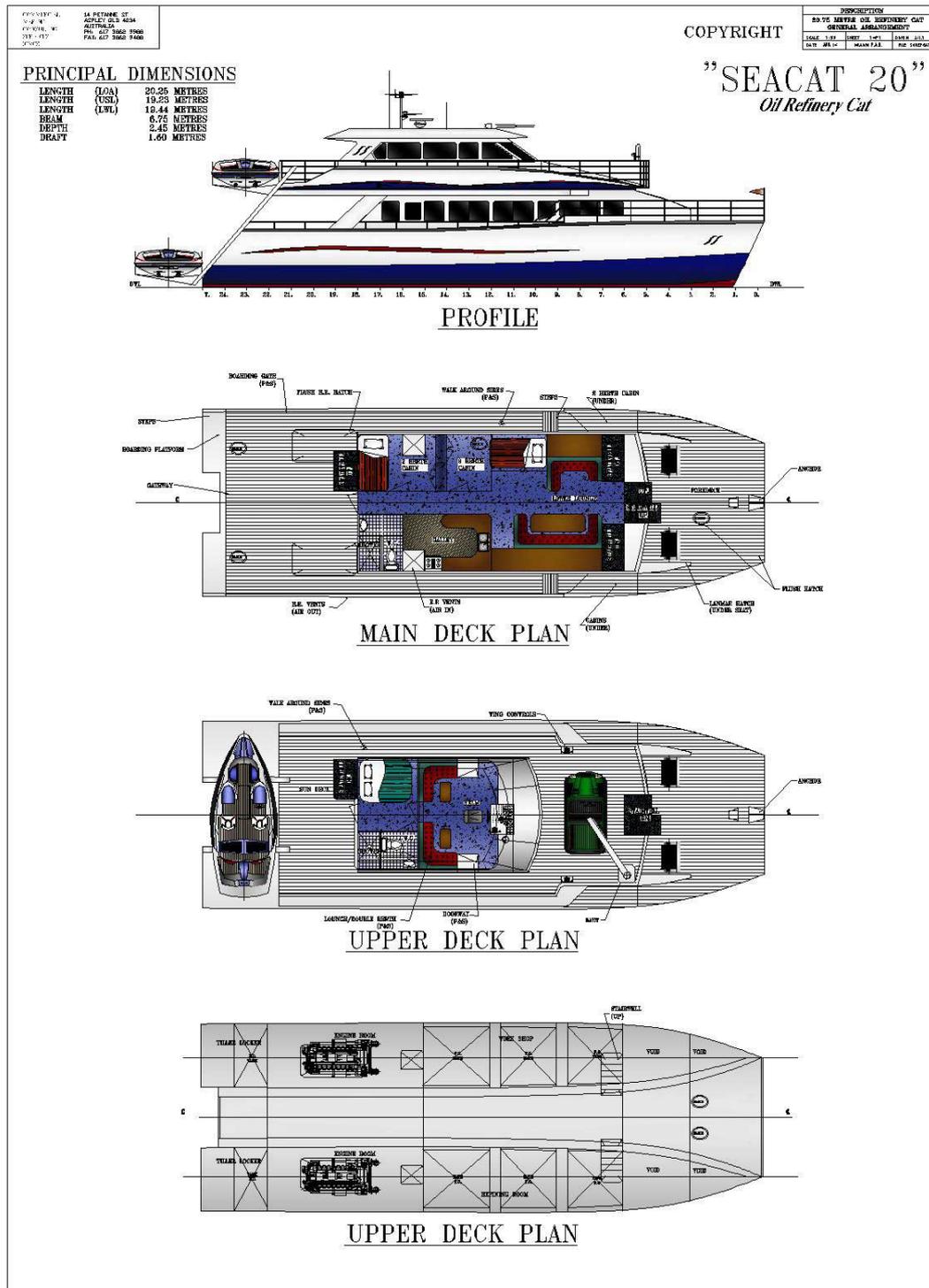


Figura 2.30.- Disposición general – SEACAT 20

Fuente: Imagen disponible en internet.³³

³³ Imagen tomada de: https://seaspeeddesign.com/boats/oil_reprocessing_cat.html

2.2.1.4. Líneas de Formas en Catamaranes

La característica fundamental de los cascos de un catamarán es que pueden hacerse más finos y esbeltos que los de un monocasco de la misma eslora o del mismo desplazamiento, esto permite aprovechar sus ventajas en lo que resistencia al avance se refiere.

La finura de los cascos evita que la resistencia por formación de olas crezca mucho con la velocidad y facilita el que la embarcación pueda alcanzar altas velocidades, y disminuya la resistencia al avance. En un monocasco, debido principalmente al cumplimiento de los criterios de estabilidad, se goza de menos libertad para escoger las dimensiones y el resto de los parámetros de forma, de manera que la embarcación pueda superar la barrera hidrodinámica que supone la resistencia por formación de olas. Mientras en un monocasco la relación eslora-manga no es mayor de cinco o seis a uno, en un catamarán rápido normalmente está entre nueve y once a uno. Esta relación es aún mayor en embarcaciones de vela de dos cascos, con relaciones de hasta veinte o veinticinco a uno en multicascos de regatas, esto hace que sea muy preferida. La figura 2.31, muestra las diversas formas de secciones de catamaranes: asimétricas, simétricas, de fondo plano, redondo y elíptico.

En general, las formas de un catamarán se dividen en simétricas y asimétricas. La simetría o asimetría de un casco se refiere a la división del volumen de carena por el plano teórico de crujía. Dentro de las formas asimétricas están las que se conocen como partidas (Split out) que se obtienen al dividir por la línea de crujía el casco de un monocasco de alta velocidad y separar transversalmente las dos mitades una cierta distancia.

A velocidades bajas, números de Froude de hasta 0.20, el uso de catamaranes no es por sus ventajas hidrodinámicas, si no por otros motivos, como una gran área de cubierta, una buena estabilidad o un espacio central protegido para tareas como investigación oceanográfica o submarina. Por ser un barco lento, predomina la resistencia de fricción lo que no perjudica su comportamiento en

aguas tranquilas. Generalmente, no es usual que los catamaranes se muevan en esta gama de velocidades, pero su uso es preferible por otro tipo de ventajas mejorando la estabilidad, la acomodación, un menor calado, entre otros.

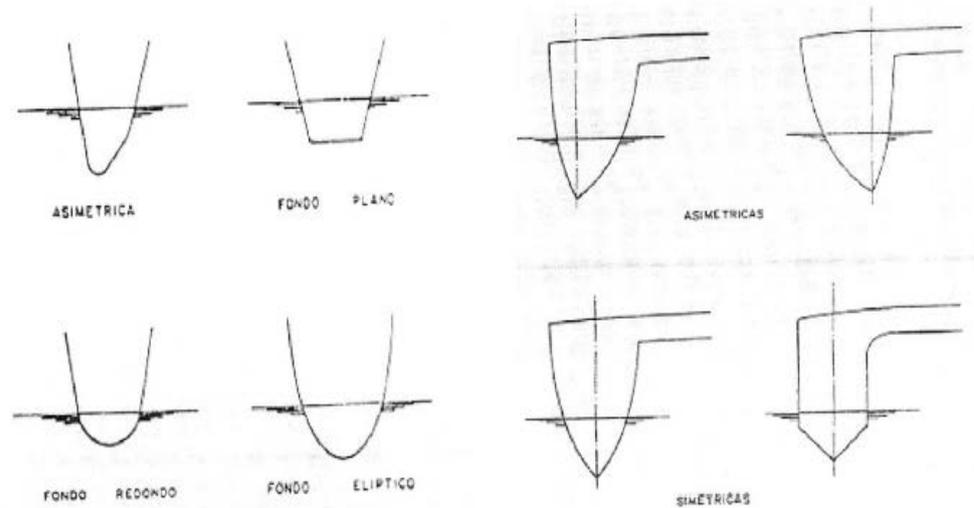


Figura 2.31.- Formas de secciones de catamaranes.

Fuente: María Martín Martínez³⁴

Un fenómeno típico en los catamaranes es la interferencia de las olas debido a la separación entre cascos. La interferencia debida a las olas nace de la superposición de los sistemas de olas generados por cada uno de los cascos y puede modificar el valor, en gran medida, el valor de la resistencia por formación de olas del buque, especialmente en la zona de velocidad alta en la que esta clase de resistencia es grande. Para velocidades correspondientes a números de Froude entre 0.2 y 0.4, la interferencia de los sistemas de olas es muy importante. Por consiguiente, es la zona de velocidades en la que, en la elección de la separación entre cascos, deben tenerse en cuenta especialmente los criterios hidrodinámicos.

³⁴ Tomado de: Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos. Pág. 26

Para altas velocidades, una mala elección de la separación de los cascos puede hacer navegar la embarcación con un máximo de la resistencia por formación de olas. Para evitar cualquier tipo de interferencia se suelen utilizar cascos asimétricos, en los que se ha eliminado casi completamente la curvatura longitudinal del costado interior, haciendo más difícil el aumento de la resistencia. Aunque la resistencia por formación de olas aumenta con la velocidad, la interferencia de los sistemas de olas pierde importancia. Además, la embarcación empieza a generar una cierta sustentación dinámica, por lo que las formas deben ser las adecuadas para permitir el planeo del buque, si se quiere.

Las formas simétricas son las adecuadas para disminuir la resistencia al avance, a razón de que se necesitan líneas que ayuden a crear sustentación dinámica quedando entonces la discusión entre formas redondas o con codillo, estas son más notorias en embarcaciones de planeo. En un monocasco unas formas u otras dependen del número de Froude, en el catamarán no está tan claro, pues muchas desventajas de la forma redonda desaparecen por la unión de los cascos.

Cuando el catamarán planea completamente las formas pueden ser cualquiera de las citadas, simétricas o asimétricas, con la única condición de que deben ser adecuadas para el planeo. Las formas asimétricas para barcos que se muevan a altas velocidades suelen ser las divididas. Al planear completamente, el agua solo toca el fondo y no toca los costados, la superficie mojada es la misma que tendría el barco sin partir y se elimina el inconveniente de las formas asimétricas.

Las formas que tienen curvatura longitudinal en los costados interiores y los costados exteriores planos, para las separaciones más frecuentes, presentan una resistencia al avance muy superior a la de las formas simétricas o asimétricas con costados planos en el interior. Esto es debido a la gran perturbación que se crea en la superficie del agua en la zona entre los dos cascos. Además, al

estrecharse el paso del fluido entre los cuerpos, la velocidad del agua entre los cascos aumenta, haciéndose mayor la resistencia de fricción.³⁵

En nuestro caso, una vez elegida la forma (entendiendo las repercusiones que tendrá), el tipo y al comparar varias series sistemáticas con la finalidad de ajustarla a los parámetros deseados y así, elegir nuestra nueva forma, se procede a realizar el plano de líneas de forma de la embarcación.

2.2.1.5. Plano de Líneas de forma

Las líneas de forma representan la proyección de todas las secciones o planos de corte que se han realizado al casco; si se corta el casco con un plano horizontal, se obtiene una línea de agua; si se corta con un plano transversal, se obtiene una sección transversa; si se corta con un plano paralelo a crujía se obtiene una vertical o longitudinal.

La proyección de todas las secciones análogas sobre un mismo plano paralelo a las mismas, y se hace coincidir finalmente con el dibujo, obtendremos todas las líneas en su verdadera forma. El conjunto es el plano fundamental de buque (plano de líneas de agua, secciones transversales y elevación). Generalmente, las secciones son equidistantes y se representan líneas adicionales dentro de los planos fundamentales para ayudar a definir con mayor precisión el casco.

En la figura abajo se muestra el plano de secciones transversales (designado como "*Línes Plan*"), el plano de elevación ("*Side View*") y el modelo en 3 D, para poder darnos una idea de la representación de las líneas de forma de un catamarán.

Cada buque puede diseñarse a partir de una serie sistemática de formas o una nueva y experimental forma, como en el caso de embarcaciones que son diseñadas para la investigación, prototipo o como el presente trabajo.

³⁵ Tomado de Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos, María Martín Martínez (2016) - pág. 26, 27.

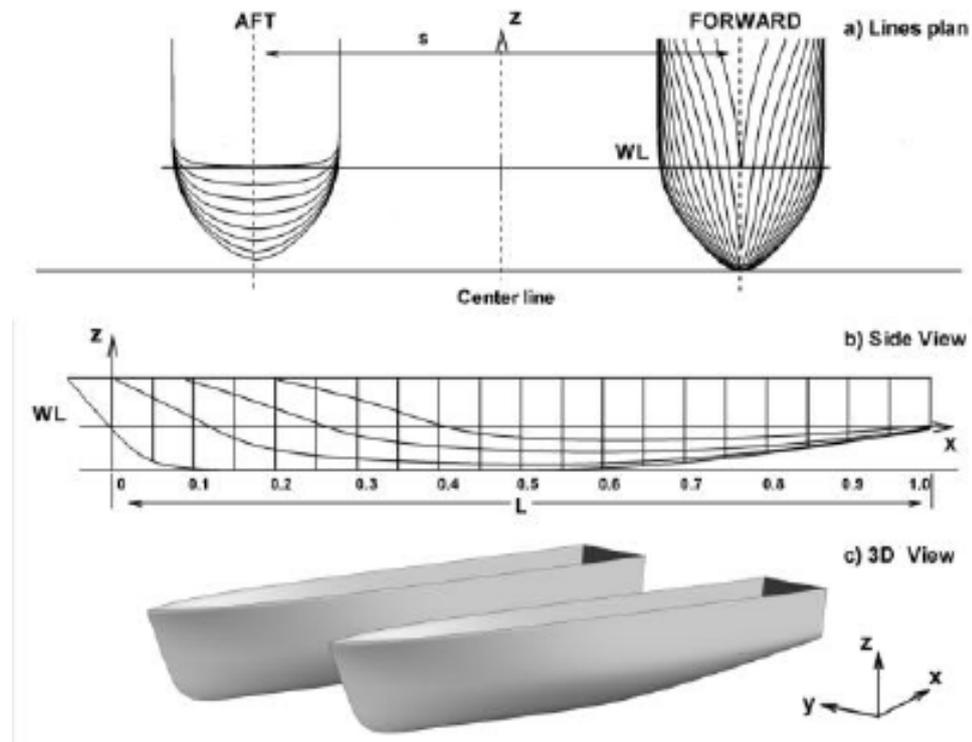


Figura 2.32.- Líneas de Forma – Plano de secciones transversales

Fuente: Imagen disponible en Internet.³⁶

2.2.1.6. Propiedades de carena

Las propiedades de carena se definen como las características intrínsecas de un cuerpo sumergido que dependen únicamente de la forma del cuerpo, como: el desplazamiento, volumen, centro de empuje, entre otras. Estas características están representadas mediante las curvas hidrostáticas y las curvas cruzadas de estabilidad.

2.2.1.6.1. Curvas Hidrostáticas

Las curvas hidrostáticas describen las características de un buque para diferentes niveles de flotación paralelas, estas flotaciones pueden ser rectas o

³⁶ Tomado de: CFD simulation for sea keeping of delft catamaran in regular head and oblique waves - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/Lines-Plan-of-Delft-catamaran_fig1_263889264 [accessed 14 Apr, 2018]

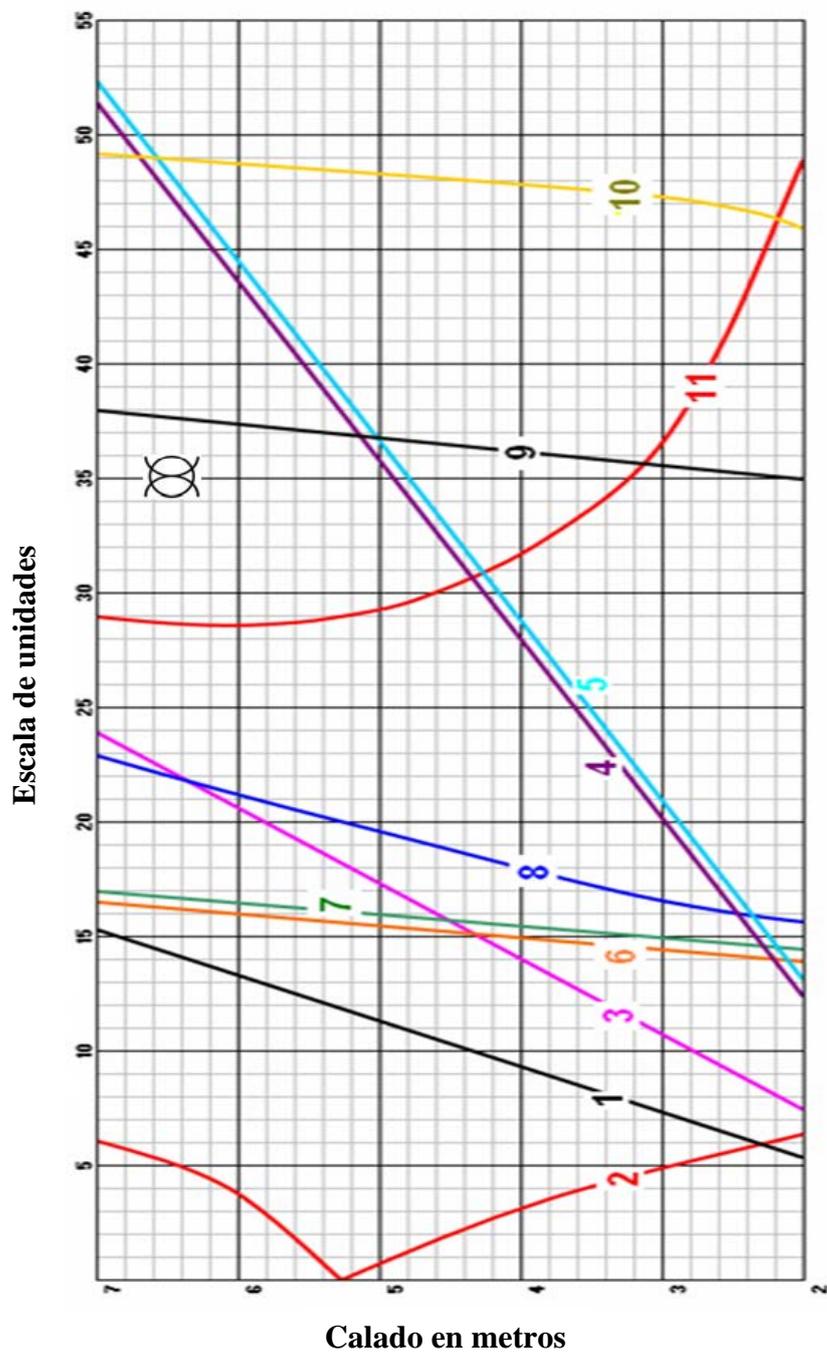
inclinadas, generalmente se representan y se usan flotaciones paralelas rectas, conocidas como atributos de carenas derechas.

Las curvas hidrostáticas muestran algunos atributos, como:

- **Volumen de carena.** - Al variar el calado (profundidad a la que se encuentra el cuerpo sumergido, en nuestro caso el buque) se tendrá un nuevo volumen de carena, generalmente se expresa en m^3 , de acuerdo al sistema de unidades.
- **Desplazamiento.** - Es el peso del buque expresado en ton, se calcula multiplicando la densidad del líquido en el cual se encuentra flotando el buque por su respectivo volumen de carena; si el desplazamiento es calculado con la densidad del agua dulce, el desplazamiento recibe el nombre de desplazamiento en agua dulce; si es calculado con agua salada, recibe el nombre desplazamiento en agua salada.
- **Área de flotación.** - para cada calado existirá una flotación, la cual tendrá un área. Esta curva muestra el área de flotación en m^2 .
- **Posición del centro de carena.** - Para cada flotación se tendrá un centro de carena. Este centro está definido desde la sección media (LCB), desde la línea base (KB) y desde la línea de crujía (que casi siempre, al ser simétrico un buque desde línea de crujía, no se acostumbra a ponerla).
- **Posición del centro de Flotación (LCF).** - es el lugar geométrico para cada área o plano de flotación sobre el cual la embarcación trima o se inclina, generalmente se define con respecto a la sección media.
- **Toneladas por centímetro de aumento de inmersión (TPC).** - Es el peso que hay que aumentar (o quitar) al buque para que aumente (o disminuya) en 1 cm.

- **Coefficientes de fineza.** - Para cada calado o flotación se tendrá los respectivos coeficientes de block, prismático, flotación y de sección maestra. Son adimensionales y se usan para describir el perfil, la fineza y la forma de un buque.
- **Momento de asiento unitario (MTC).** - Es el momento necesario para hacer trimar al buque en 1 cm.
- **Posición del metacentro transversal (KM).** - Es el lugar geométrico del giro transversal de un buque. Generalmente se define con respecto a la quilla o la línea base. Si el giro se analiza desde la vista de longitudinal, el lugar geométrico del giro longitudinal recibe el nombre de metacentro longitudinal (KML).

Las curvas hidrostáticas tienen como principal distintivo un eje de escalas, un eje de calados (profundidad) y varias curvas de propiedades (identificadas). La Figura 2.33 nos muestra un ejemplo de este tipo de gráfica.



1	Altura del centro de carena sobre la LC (1cm=0,25 mt)	6	Área de flotación (1cm = 100 m2)
2	Corrección al desplazamiento para 1 cm de asiento (1cm = 0,05 ton)	7	Toneladas por centímetro de inmersión (1cm = 1 ton/cm)
3	Área sumergida sección maestra (1cm=5m2)	8	Momento de asiento unitario (1cm = 5tons/cm)
4	Desplazamiento en agua dulce (1cm=200 tons)	9	Coefficiente prismático (1cm = 0,02)
5	Desplazamiento en agua salada (1cm=200 tons)	10	Coefficiente de sección maestra (1cm = 0,02)
		11	Altura del metacentro transversal sobre LC (1cm = 0,25 mt)

Figura 2.33.- Curvas Hidrostáticas de un buque

Fuente: Elementos de Arquitectura Naval, Buenos Aires, 1986

2.2.1.6.2. Curvas cruzadas

Las curvas cruzadas nos permiten hallar el brazo adrizante del buque, para un desplazamiento y un ángulo dado. Este brazo adrizante, es usado para el cálculo de estabilidad del buque, cuando se tenga definido el Centro de gravedad del buque. Este conjunto de curvas describe la estabilidad de un buque al ser inclinado un ángulo (escora), relacionando para un desplazamiento fijo un denominado brazo adrizante (GZ), al tener varios desplazamientos y varias inclinaciones se tendrá, varios brazos, los cuales formarán una serie de curvas, denominadas “Curvas Cruzadas”.

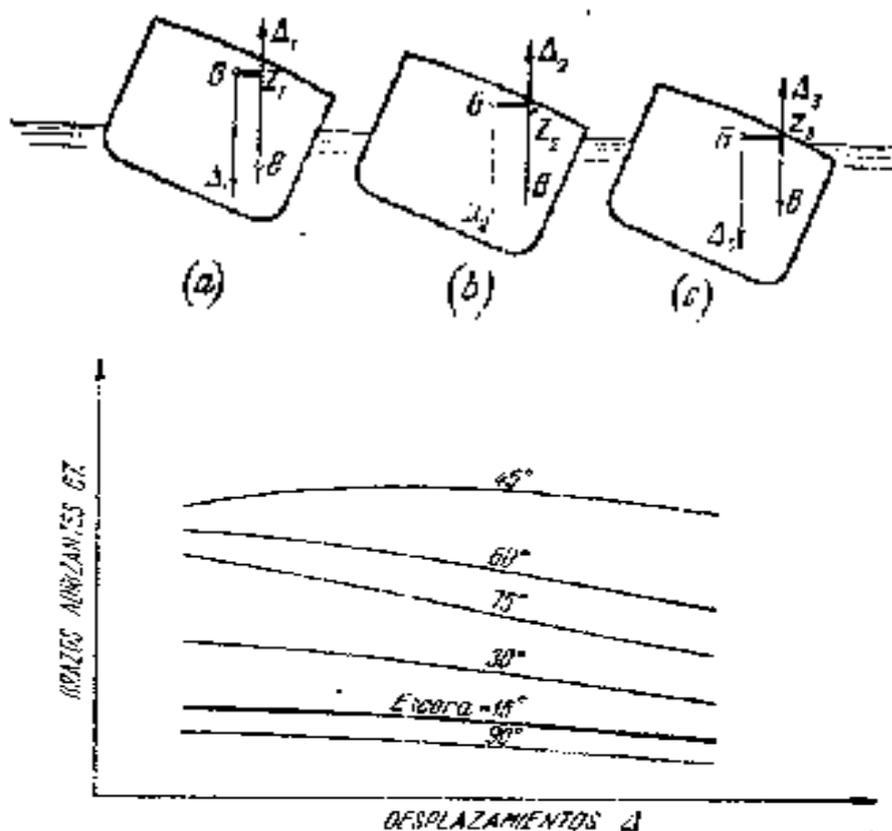


Figura 2.34.- Inclinaciones Transversales - Curvas Cruzadas

Fuente: Mandelli, Antonio (1986)³⁷

³⁷ Elementos de Arquitectura Naval, Librería Editorial Alsina, Buenos Aires, pág. 50-51.

2.2.1.7. Subdivisión Estanca y Esloras Inundables

Compartimentado es la subdivisión del buque en compartimientos estancos por medio de mamparos estancos al agua, longitudinales y transversales, y es desarrollada a fin de garantizar que el buque, al sufrir una avería, se mantenga a flote. Normalmente los cálculos son a través de métodos reconocidos y son reguladas a través de normativas, o a través del cálculo de las esloras inundables, aceptados en cada país abanderado.

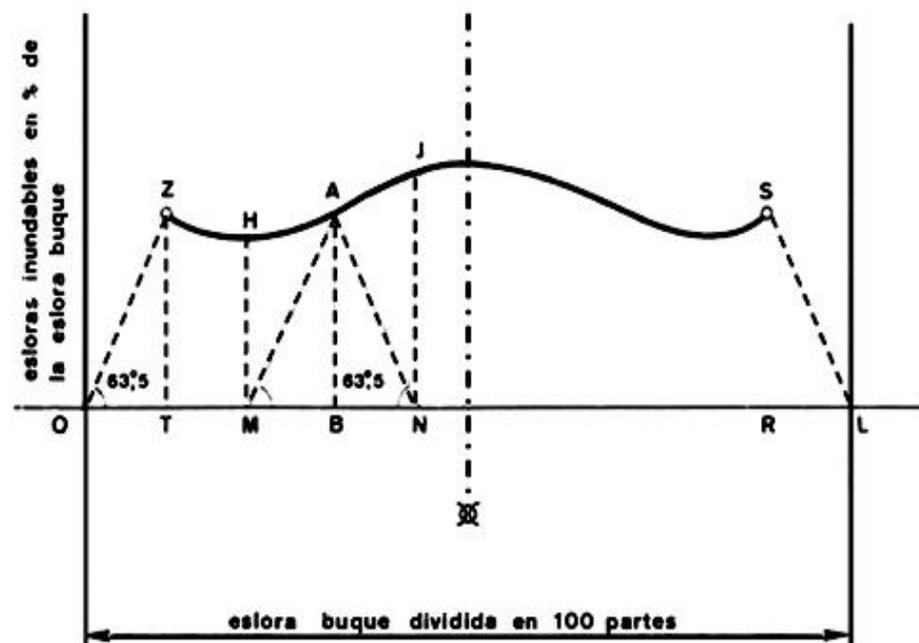


Figura 2.35.- Esquema de Esloras Inundables

Fuente: Imagen disponible de internet³⁸

La curva de esloras inundables es la curva envolvente de las ordenadas representativas de las esloras inundables, en los distintos puntos de la eslora de un buque. Tomando una serie de flotaciones tangentes a la “línea margen” en las zonas de proa, media y popa del buque, teniendo en cuenta sus formas en estas zonas: podremos calcular la longitud o trozo de eslora con centro en un

³⁸ Tomado de: <http://estabilidaddelbuque2.blogspot.pe/2011/12/compartimentacion-estanca-estabilidad-y.html>

punto determinado de dicha eslora, que puede ser inundado sin que la flotación debida a esta inundación llegue a ser mayor que la de la línea margen en la zona considerada del buque.

Hoy en día, los cálculos han sido facilitados a través de software y programas computacionales que permiten realizar el análisis de esloras inundables para cualquier tipo de buque, acortando los tiempos de diseño.

2.2.1.8. Francobordo

El francobordo se define como la diferencia entre el puntal y el calado máximo, en la sección media. Es una medida de reserva de flotabilidad, y se reconoce fácilmente por la ubicación del disco de Plinsom.

El francobordo es asignado de acuerdo con los convenios de líneas de máxima carga, a cargo de la autoridad del país abanderado o autoridad correspondiente.

2.2.2. Estimación de la Resistencia al Avance y Propulsores

El cálculo propulsivo y la selección de la planta propulsora será definido una vez que se estime la potencia propulsora o potencia del buque. Esta parte de calcular aproximadamente la resistencia al avance y los propulsores del buque. Debe estimar las diferentes pérdidas a lo largo del sistema propulsivo y garantizar condiciones de operación aceptable.

Las pérdidas más comunes que se estiman son las pérdidas por rozamiento, pérdidas en el casco, pérdidas en las hélices, entre otras.

2.2.2.1. Estimación de la Potencia Propulsora

La potencia propulsora debe estimarse a partir de la predicción de la resistencia al avance, el cual una vez estimado, es afectado por una serie de eficiencias dando como resultado la curva de potencia del buque. El cálculo de la resistencia al avance siempre es validado en un canal de experiencias hidrodinámicas y ensayos a escala. Para este caso, se ha realizado una

aproximación teórica a través de las series sistemáticas y métodos de aproximación numérica.

La mayoría de los métodos de cálculo disponibles evalúan la resistencia al avance en condiciones de aguas profundas. Para el caso de navegación en aguas de profundidad limitada (poco calado o aguas someras) la velocidad del buque es afectada por la disminución de la profundidad del río, traduciéndose en un incremento en la potencia necesaria para su desplazamiento.

La metodología que se aplicará para obtener la curva de potencia de la embarcación fluvial será:

- Estimar de la resistencia en aguas profundas.
- Calcular del incremento de la resistencia en aguas poco profundas.
- Estimar las eficiencias y pérdidas
- Obtener la curva de potencia estimada del buque.

Para estimar la resistencia en agua profundas debemos hacer uso de los métodos de predicción de potencia y para el incremento de la resistencia por aguas rasas podemos estimar basándonos en los trabajos de modelos numéricos que aproximan el incremento a entre un 27-33%. Si los métodos estadísticos de una serie sistemática base no se ajustan a un nuestro prototipo, se puede realizar un ajuste con otras series, dependiendo de la factibilidad y del rango de aplicación.

2.2.2.2. Predicción de Resistencia en Catamaranes

Los métodos de predicción de resistencia al avance en catamaranes han tenido un amplio desarrollo durante los años 90 y la primera década del siglo XXI. Dentro de los métodos de predicción de la resistencia pueden encontrarse diferentes tipos dependiendo del tipo de catamarán estudiado.

La mayoría de estos métodos dividen la resistencia en dos componentes, resistencia por fricción y resistencia por formación de olas. La resistencia por

fricción se obtiene por la fórmula ITTC-57 y la resistencia por formación de olas queda determinada mediante expresiones que relacionan las dimensiones del casco. Además, establecen coeficientes para la corrección del factor de forma en la determinación del coeficiente de resistencia total.

Tabla 2.6.- Métodos de predicción de resistencia en catamaranes

Método	Tipo de Catamarán	Método de obtención	Rango de Aplicación
Insel and Molland's method (1992)	Semidesplazamiento	Serie sistemática	-
Milward's method (1992)	-	Serie sistemática	$0,2 < F_n < 1,0$
Molland et al. Method (1994)	Desplazamiento	Serie sistemática	$0,2 < F_n < 1,0$
Armstrong method (2000)	Desplazamiento	Regresión estadística	$0,5 < F_n < 1,0$
Método VWS (1995)	Planeo; Codillos rectos	Regresión estadística	$0,8 < F_n < 1,4$
Método Hanhirova (1995)	Planeo de alta velocidad	Regresión estadística	-
Método Pham (2001)	Codillos rectos	Regresión estadística	$0,2 < F_n < 1,0$
Método Sahoo (2002)	Semidesplazamiento	Regresión estadística y serie sistemática	$0,4 < F_n < 1,4$
Método Sahoo (2004)	Pantoque redondeado	Regresión estadística y serie sistemática	$0,2 < F_n < 1,0$
Método Sahoo (2007)	Semidesplazamiento	Regresión estadística	$0,2 < F_n < 1,0$

Fuente: María Martín Martínez (2016)³⁹

³⁹ Tomado de: "Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos"- María Martín Martínez (2016) - Pág. 40.

En la mayoría de los métodos se establece el coeficiente de resistencia total mediante la siguiente expresión:

$$C_T = (1 + \gamma k)C_F + \tau C_{WMONO} \quad (2.1)$$

Siendo:

- τ el cociente entre la resistencia por formación de olas del buque catamarán y monocasco:

$$\tau = \frac{C_{WCAT}}{C_{WMONO}} \quad (2.2)$$

- γ un parámetro dependiente únicamente de la relación L/B.

El coeficiente de resistencia queda determinado por diferentes expresiones dependiendo del método y del tipo de buque. Existen metodologías para la estimación de la resistencia al avance donde la determinación de la resistencia al avance del monocasco, C_{WMONO} , no viene dada por ninguna ecuación. En estos casos se introduce directamente el coeficiente de resistencia por formación de olas del catamarán, C_{WCAT} , en la ecuación anterior, como se muestra a continuación:

$$\tau C_{WMONO} = C_{WCAT} \quad (2.3)$$

$$C_T = (1 + \gamma k)C_F + C_{WCAT} \quad (2.4)$$

2.2.2.3. Método de Armstrong, factor de forma del monocasco

La tesis de Armstrong examina los métodos de predicción de resistencia para los catamaranes rápidos recientemente diseñados. Armstrong propone los factores de forma del mono-casco presentados paramétricamente.

Tabla 2.7.- Factor de forma del monocasco, Armstrong (2000).

Parámetro	Ecuación	Validez
$(1 + k)$	$0,65 + 350(Fn)^{-0,67} \left(\frac{B}{T}\right)^{0,15} \left(\frac{L}{B}\right)^{-1,5} \left(\frac{L}{\frac{1}{\sqrt{3}}}\right)^{-1,5}$	$0,5 < Fn < 1,0$
$(1 + k)_{modelo}$	$1,45 - 0,139 \left(\frac{L}{\frac{1}{\sqrt{3}}}\right)^{0,6} \left(\frac{B}{T}\right)^{-0,1}$	$6 < \frac{L}{\frac{1}{\sqrt{3}}} < 8$ $12 < \frac{L}{B} < 15$ $1,5 < \frac{B}{T} < 2,5$ $3 \cdot 10^6 < Rn < 5 \cdot 10^6$
$(1 + k)_{buque}$	$1,72 - f \left(\frac{L}{\frac{1}{\sqrt{3}}}\right)^g \left(\frac{B}{T}\right)^{-0,1}$	$6,5 < \frac{L}{\frac{1}{\sqrt{3}}} < 9,5$ $1,5 < \frac{B}{T} < 2,5$ $0,6 < Fn < 1,0$ $10^9 < Rn < 2 \cdot 10^9$
f	$-2,25Fn^2 + 4,47Fn - 1,61$	$Fn < 1,0$
f	0,61	$Fn > 1,0$
g	$0,76 - 1,09f$	

Fuente: María Martín Martínez (2016)⁴⁰

2.2.2.4. Factor de Forma para Catamaranes

Al no disponer de una ecuación para el factor de forma en los catamaranes $(1 + \gamma k)$, es necesario establecer un modelo de regresión a partir de los datos que se muestra a continuación:

⁴⁰ Tomado de: “Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos”- María Martín Martínez (2016) - Pág. 42

Tabla 2.8.- Factor de forma de catamaranes

$L/\nabla^{1/3}$	B/T	$s/L = 0,2$	$s/L = 0,3$	$s/L = 0,4$	$s/L = 0,5$
		$1 + \gamma \cdot k$	$1 + \gamma \cdot k$	$1 + \gamma \cdot k$	$1 + \gamma \cdot k$
8,5	1,5	1,44	1,43	1,44	1,47
8,5	2,0	1,41	1,45	1,4	1,38
8,5	2,5	1,41	1,43	1,42	1,44
Promedio	-	1,42	1,44	1,42	1,43
9,5	1,5	1,48	1,44	1,46	1,48
9,5	2,0	1,42	1,40	1,47	1,44
9,5	2,5	1,40	1,40	1,45	1,44
Promedio	-	1,41	1,41	1,46	1,45

Fuente: María Martín Martínez (2016)⁴¹

Para cada número de Froude estudiado, el factor de forma del catamarán será función de las diferentes características geométricas y del factor de forma del monocasco. Utilizando múltiples análisis de regresión se encuentra una ecuación general, y unos coeficientes de regresión, que se muestran a continuación:

$$(1 + \gamma k) = f\left(\frac{B}{T}; \frac{L}{\nabla^{1/3}}; \frac{S}{L}; (1 + k)\right) \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} (1 + \gamma k) = & a_0 + a_1 \frac{B}{T} + a_2 \frac{L}{\nabla^{1/3}} + a_3 \frac{S}{L} + a_4(1 + k) + a_5 \frac{B}{T} \frac{L}{\nabla^{1/3}} + a_6 \frac{B}{T} \frac{S}{L} + \\ & a_7 \frac{L}{\nabla^{1/3}} \frac{S}{L} + a_8 \frac{B}{T} (1 + k) + a_9 \frac{L}{\nabla^{1/3}} (1 + k) + a_{10} \frac{S}{L} (1 + k) + a_{11} \frac{B}{T} \frac{L}{\nabla^{1/3}} \frac{S}{L} + \\ & a_{12} \frac{B}{T} \frac{L}{\nabla^{1/3}} (1 + k) + a_{13} \frac{B}{T} \frac{S}{L} (1 + k) + a_{14} \frac{L}{\nabla^{1/3}} \frac{S}{L} (1 + k) \end{aligned} \quad (2.6)$$

⁴¹ Tomado de: “Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos”- María Martín Martínez (2016) - Pág. 43

Tabla 2.9.- Coeficientes de regresión para ecuación del factor de forma

a_0	0	a_8	-2,506
a_1	0,258	a_9	-2,432
a_2	2,505	a_{10}	100,173
a_3	-150,791	a_{11}	-1,636
a_4	4,932	a_{12}	1,417
a_5	-1,446	a_{13}	-43,355
a_6	68,628	a_{14}	-2,927
a_7	6,549		

Fuente: María Martín Martínez (2016)⁴²

2.2.2.5. Serie de catamaranes de pantoque redondeado de Sahoo, Browne y Salas (2004)

Los autores amplían en el trabajo realizado por Schwetz y Sahoo (2002) trabajando de manera más profunda sobre una serie sistemática de catamaranes de pantoque redondeado y comparando con el análisis CFD. Para producir la serie de monocascos se utiliza un procedimiento de transformación paramétrico.

Las siguientes tablas ilustran los parámetros geométricos de la serie de monocascos desarrollada. Para cada modelo se muestran las características hidrostáticas y parámetros relevantes para el análisis de regresión.

⁴² Tomado de: “Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos”- María Martín Martínez (2016) - Pág. 43

Tabla 2.10- Parámetros Geométricos

Modelo	1	2	3	4	5	6	7
L/B	15,00	15,00	15,00	15,00	12,50	12,50	10,00
B/T	1,50	1,50	2,50	2,50	1,50	2,50	2,50
C _B	0,40	0,45	0,50	0,40	0,45	0,45	0,45
L/∇ ^{1/3}	9,45	9,08	10,40	11,20	8,04	9,54	8,22

Fuente: María Martín Martínez (2016)⁴³

Tabla 2.11.- Hidrostáticas de la serie sistemática

M	L (m)	B (m)	T (m)	Δ (t) (Max.)	i_E (deg)	β (deg)	WSA (m²)	LCB (m)	LCF (m)
1	50,00	3,33	2,22	151,93	5,43	42,99	246,10	22,30	20,27
2	50,00	3,33	2,22	170,91	7,18	44,32	256,20	22,27	21,54
3	50,00	3,33	1,33	113,90	7,03	24,94	195,89	22,29	21,41
4	50,00	3,33	1,33	91,08	4,00	23,32	181,97	22,27	19,99
5	50,00	4,00	2,67	246,10	8,60	44,11	307,57	22,27	21,54
6	50,00	4,00	1,60	147,69	8,60	30,37	231,71	22,27	21,54
7	50,00	5,00	2,00	230,77	10,71	30,37	289,80	22,27	21,54

Fuente: María Martín Martínez (2016)⁴⁴

Las posiciones de LCB y LCF son respecto al espejo. La serie sistemática de monocascos comprende relaciones de s/L entre 0.2 y 0.4, y un rango del número de Froude entre 0.2 y 1.0. Las cajas de cuadernas de los modelos del estudio están ilustradas en la Figura 2.36.

⁴³ Tomado de: “Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos”- María Martín Martínez (2016) - Pág. 44

⁴⁴ Tomado de: “Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos”- María Martín Martínez (2016) - Pág. 44

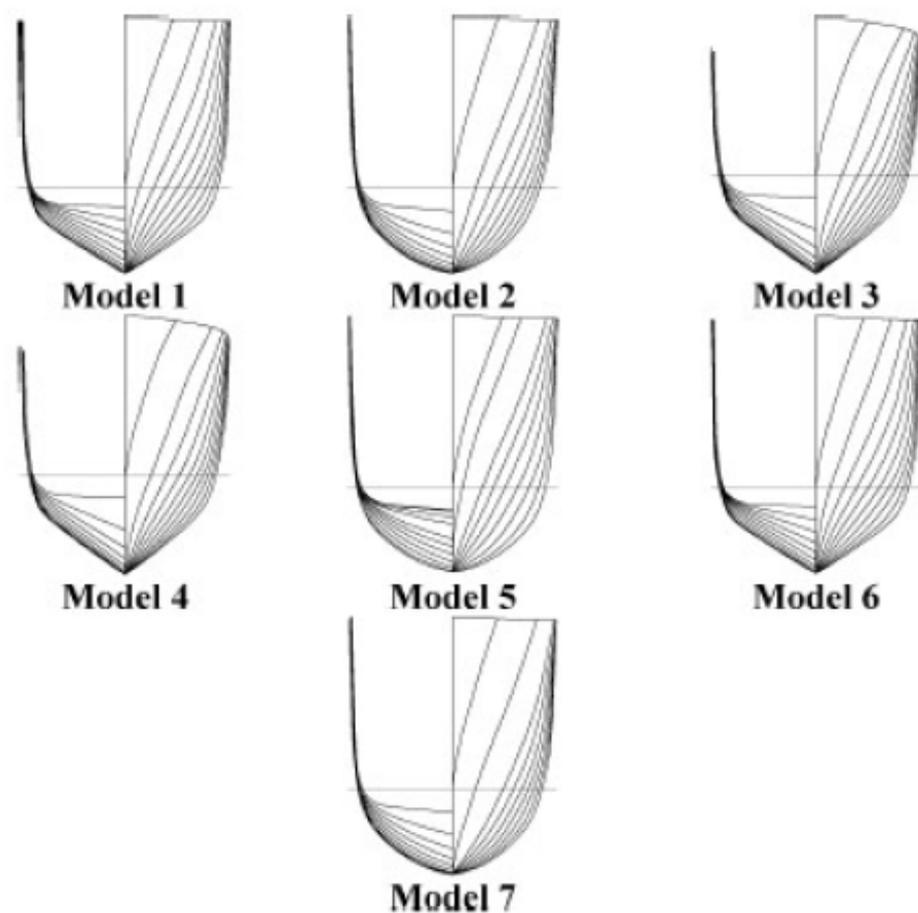


Figura 2.36.- Modelos de cuadernas de varios modelos

Fuente: María Martín Martínez (2016)⁴⁵

Las ecuaciones obtenidas para calcular el coeficiente de formación de olas para el monocasco y el catamarán son:

$$C_{WMONO} = e^{C_1} \frac{L^{C_2}}{B} C_B^{C_3} \frac{L^{C_4}}{\nabla^{1/3}} i_E^{C_5} \beta^{C_6} \quad (2.7)$$

$$C_{WCAT} = e^{C_1} \frac{L^{C_2}}{B} C_B^{C_3} \frac{L^{C_4}}{\nabla^{1/3}} i_E^{C_5} \beta^{C_6} \frac{S^{C_8}}{B} \quad (2.8)$$

⁴⁵ Tomado de: “Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos”- María Martín Martínez (2016) - Pág. 45

Tabla 2.12.- Coeficientes de regresión para ecuación Cw Mono

Fn	C1	C2	C3	C4	C5	C6	R²
0,2	3,001	-0,159	0,515	-3,666	-0,194	0,000	0,967
0,3	1,221	0,000	0,815	-3,445	0,218	0,000	0,985
0,4	3,180	-0,702	0,377	-3,114	0,390	0,000	1,000
0,5	2,519	0,396	-0,775	-4,175	0,000	-0,41	0,999
0,6	2,031	-0,239	0,000	-3,402	-0,138	-0,091	0,999
0,7	1,130	-0,22	0,000	-3,221	-0,043	-0,081	0,999
0,8	0,600	-0,272	0,000	-3,079	0,000	-0,063	0,999
0,9	-0,216	0,000	-0,228	-3,158	0,173	-0,178	0,999
1,0	-1,086	0,000	-0,396	-2,965	0,300	-0,203	0,998

Fuente: María Martín Martínez (2016)⁴⁶

Tabla 2.13.- Coeficientes de regresión para ecuación Cw Cat

Fn	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	R²
0,2	2,571	0,436	0,000	0,000	-4,124	-0,039	-0,199	0,037	0,995
0,3	0,585	0,000	0,000	0,945	-3,282	0,246	0,087	-0,089	0,989
0,4	3,324	0,000	-0,471	-0,963	-3,523	0,000	-0,688	-0,035	0,984
0,5	2,439	0,379	0,000	-0,600	-4,262	0,000	-0,337	-0,368	0,999
0,6	1,809	-0,110	0,000	0,000	-3,625	-0,061	-0,095	-0,314	0,997
0,7	1,055	0,000	0,082	-0,025	-3,617	0,000	-0,064	-0,181	0,997
0,8	0,603	0,222	0,266	0,000	-3,869	0,000	0,000	-0,069	0,998
0,9	-0,466	0,049	0,162	0,000	-3,322	0,128	0,000	-0,006	0,999
1,0	-1,221	0,000	0,117	0,000	-3,046	0,264	0,000	0,075	0,995

Fuente: María Martín Martínez (2016)⁴⁷

⁴⁶ Tomado de: “Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos”- María Martín Martínez (2016) - Pág. 46

⁴⁷ Tomado de: “Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos”- María Martín Martínez (2016) - Pág. 46

2.2.2.6. Regresión a partir del Método de Molland y al. (1994)

Basado en el estudio de Molland y al, (1994), se establece una ecuación mediante regresión para obtener el coeficiente de resistencia por formación de olas directamente de las características del catamarán.

El CWCAT se obtiene de la ecuación mostrada y los coeficientes de regresión se muestran en la Tabla 2.14.

$$\begin{aligned}
 C_{WCAT} = & b_0 + b_1 \frac{L}{B} + b_2 \frac{B}{T} + b_3 \frac{L}{\sqrt[3]{L}} + b_4 \frac{S}{L} + b_5 \frac{L B}{B T} + b_6 \frac{L L}{B \sqrt[3]{L}} + b_7 \frac{B L}{T \sqrt[3]{L}} + \\
 & b_8 \frac{L S}{B L} + b_9 \frac{B S}{T L} + b_{10} \frac{L S}{\sqrt[3]{L} L} + b_{11} \frac{L B L}{B T \sqrt[3]{L}} + b_{12} \frac{L B S}{B T L} + b_{13} \frac{L L S}{B \sqrt[3]{L} L} + \\
 & b_{14} \frac{B L S}{T \sqrt[3]{L}} + b_{15} \frac{L B L S}{B T \sqrt[3]{L}} \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

Tabla 2.14.- Coeficientes de regresión para ecuación

F_n	b0	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
0,20	0,000	-1,010	-3,482	2,936	0,434	-1,782	0,053	1,169
0,25	0,000	-0,624	-1,430	0,911	14,494	-0,576	0,063	0,573
0,30	0,000	-0,135	-1,171	0,928	-21,610	-0,730	0,012	0,487
0,35	0,000	-1,870	-8,177	5,059	4,144	-2,346	0,095	2,106
0,40	0,000	-1,437	-2,620	2,150	32,489	-0,306	0,082	0,413
0,45	0,000	2,504	10,900	-6,979	10,979	4,132	-0,114	-2,901
0,50	0,000	5,921	19,565	-8,431	39,226	1,270	-0,324	-2,430
0,55	0,000	3,149	26,826	-2,589	111,705	-1,619	-0,237	-2,989
0,60	0,000	1,398	29,096	0,614	107,296	-2,655	-0,191	-3,503
0,65	0,000	0,701	17,120	-0,514	65,457	-0,368	-0,092	-2,409
0,70	0,000	1,602	13,789	-2,218	59,031	0,291	-0,122	-2,024
0,75	0,000	2,173	9,941	-2,585	53,376	0,192	-0,151	-1,356
0,80	0,000	1,811	9,833	-2,216	44,561	0,217	-0,139	-1,497
0,85	0,000	1,841	10,540	-1,971	38,833	-0,315	-0,138	-1,409
0,90	0,000	2,148	13,265	-2,749	33,474	0,104	-0,168	-2,080
0,95	0,000	2,448	13,923	-3,472	31,412	0,402	-0,183	-2,266
1,00	0,000	2,882	14,586	-4,781	7,184	0,961	-0,189	-2,480

F_n	b8	b9	b10	b11	b12	b13	b14	b15
0,20	2,437	8,242	-6,962	0,041	4,230	-0,137	-2,816	-0,092
0,25	1,051	-3,927	-3,763	-0,004	0,905	-0,043	0,120	-0,021
0,30	3,235	12,628	0,754	0,017	-0,351	-0,328	-1,728	0,119
0,35	4,918	21,604	-12,503	0,012	5,082	-0,270	-5,153	0,021
0,40	2,854	-2,519	-11,615	-0,022	2,830	-0,035	-0,280	-0,075
0,45	-0,970	-7,798	10,730	-0,100	-11,150	-0,046	5,288	0,444
0,50	-11,378	-24,067	13,500	0,076	-6,242	0,614	3,816	0,171
0,55	-13,638	-77,986	-5,439	0,244	3,388	1,254	9,134	-0,586
0,60	-9,326	-83,327	-13,326	0,320	6,584	1,134	10,051	-0,797
0,65	-4,015	-38,325	-7,119	0,120	0,620	0,512	5,253	-0,199
0,70	-5,949	-33,130	-2,283	0,079	-0,876	0,572	4,822	-0,136
0,75	-7,233	-26,712	-1,242	0,067	0,184	0,637	3,380	-0,169
0,80	-6,278	-27,259	-1,141	0,074	0,618	0,591	3,702	-0,230
0,85	-5,976	-28,430	-1,758	0,106	2,476	0,556	3,214	-0,330
0,90	-5,934	-32,675	0,171	0,120	1,401	0,559	4,515	-0,338
0,95	-6,845	-36,448	3,349	0,117	-0,169	0,599	5,638	-0,315
1,00	-5,623	-27,406	9,518	0,100	-2,972	0,363	5,129	-0,140

Fuente: María Martín Martínez (2016)⁴⁸

⁴⁸ Tomado de: “Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos”- María Martín Martínez (2016) - Pág. 47- 48

2.2.2.7. Estimación de Potencia Propulsora

La resistencia total puede ser estimada de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$R = \frac{1}{2} * C_T * S * V^2 \quad (2.10)$$

Donde:

- R es la resistencia al avance,
- ρ es la densidad del agua,
- S el área mojada del modelo o buque, según corresponda y
- V es la velocidad del modelo o buque.

Al calcular la resistencia total del buque, la Potencia de Remolque puede ser calculada a través de la siguiente expresión:

$$P = R * \frac{V}{76} \quad (2.11)$$

- R es la resistencia al avance,
- 76 es el coeficiente para expresar la potencia en HP,
- V es la velocidad del modelo o buque.
- P es la potencia de remolque o EHP.

2.2.2.8. Eficiencias y Pérdidas

La Potencia Efectiva de Remolque o EHP, se encuentra afectada por una serie de pérdidas a lo largo de la línea de propulsión lo que implica un incremento de la potencia requerida para poder desarrollar la velocidad deseada en condiciones de navegación. Estas pérdidas introducen el concepto de eficiencia propulsiva y tipos de potencia.

Las diferentes pérdidas a lo largo de línea propulsiva pueden sumar cerca del 50 al 60 %, pero lo más práctico en la fase de diseño preliminar es estimar o suponer una eficiencia global, a fin de evitar cálculos que son afinados en las siguientes etapas del diseño.

Los tipos de potencias pueden clasificarse como:

- Potencia indicada (IHP, Indicated Horsepower) es la potencia desarrollada del motor en los pistones.
- Potencia al freno (BHP, Brake Horsepower) es la potencia del motor, medida en el acoplamiento del motor al eje (por medio de un freno).
- Potencia en el eje (SHP, Shaft Horsepower) es la potencia transmitida a través del eje (medida con un torsiómetro tan cerca de la hélice como sea posible).
- Potencia entregada a la hélice (DHP, Delivered Horsepower) es la potencia entregada a la hélice (descontando las pérdidas en el eje de la anterior).
- Potencia de empuje (THP, Transformed Horsepower) es la potencia transformada por la hélice (se obtiene descontando su rendimiento de la potencia a la hélice).
- Potencia efectiva o de remolque (EHP, Effective Horsepower) es la potencia que realmente se emplea en mover el barco o la potencia que sería necesario emplear para remolcar el barco a la velocidad de proyecto (puede obtenerse descontando de la anterior las pérdidas debidas a la forma del barco, apéndices, etc).

Si se introduce los conceptos de eficiencias por pérdidas, tendríamos las siguientes definiciones:

- Rendimiento del motor (η_{Motor}): El rendimiento del motor nos indica su eficacia en convertir la energía generada en los pistones en potencia mecánica.

$$\eta_{\text{Motor}} = \text{BHP/IHP} \quad (2.12)$$

Para nuestro caso los motores eléctricos poseen un rendimiento entre el 97-98%.

- Rendimiento mecánico de la línea de ejes (η_m): El rendimiento de la línea de transmisión nos indica su eficacia en convertir la energía de la

salida del motor transmitirla a lo largo del eje propulsivo a la hélice. Esta considera los apoyos, cajas de transmisión, chumaceras, bocinas, etc.

$$\eta_m = \text{DHP/BHP} \quad (2.13)$$

El rendimiento mecánico de la línea de ejes posee un valor entre el 90 – 95%, para nuestro caso usaremos un valor del 95%, pues no usaremos un reductor, siendo este reemplazo por un control de velocidad.

- Rendimiento propulsivo (η_p): Este rendimiento nos da idea de eficacia propulsiva del proyecto y se compone de cuatro factores, el rendimiento del casco (η_h), el rendimiento del propulsor (η_b), el rendimiento rotativo relativo (η_{rr}) y el rendimiento mecánico de la línea de ejes (η_m).

$$\eta_p = \eta_h \eta_b \eta_{rr} \eta_m = \frac{EHP}{BHP} \quad (2.14)$$

Al relacionar las pérdidas a lo largo de la línea propulsiva, se obtendrá finalmente la curva de potencia del buque.⁴⁹

2.2.3. Cálculos para Generación Eléctrica

El sistema eléctrico jugará un papel trascendental en la generación de energía, captación, gestión, aplicación y distribución de esta, a fin de garantizar el desempeño de los motores, sistemas y servicios del buque.

La embarcación propuesta debe generar su propia energía, almacenarla y distribuirla de modo que siempre pueda desarrollar su normal operación. La embarcación debe generar y suplir con la demanda de la sala de máquinas, bombas, la iluminación total del buque y otros. Antes de realizar el cálculo de los paneles y de la planta fotovoltaica de generación eléctrica, debemos establecer como calcular la demanda DC y la demanda AC.

⁴⁹ En el capítulo III se desarrollará el cálculo de la curva de potencia.

2.2.3.1. Cálculo de la Demanda Total

La demanda DC y AC, para nuestro caso debe calcularse teniendo en cuenta el caso más crítico, y en caso de embarcaciones solares, el factor de utilización es 1 para casi todos los elementos, salvo las bombas de emergencia, y otros que no funcionen continuamente, salvo cuando se requiera.

La demanda eléctrica DC (E_{DC}) está conformada por todas las cargas DC, considerando su consumo por hora, cantidad y eficiencia, a modo de ejemplo se presenta un cuadro de cargas DC.

Tabla 2.15.- Demanda DC

Demanda Eléctrica DC					
Ítem	P nom. (W)	Efic.	# de Horas	Cant.	Consumo (kW)
Reflectores	250	0.8	5	1	1.6
Instalación WI-Fi	50	0.9	5	1	0.3
Refrigerador	300	0.8	24	2	18.0
Luces de Navegación	20	0.9	5	8	0.9
Equipos Electrónicos de Navegación	60	0.9	5	5	1.7
Tablero de Control de Navegación	60	0.9	5	4	1.3
Alumbrado interior LED	20	0.96	5	20	2.1
Otros	200	1	1	1	0.2
Consumo Total DC					26

Fuente: Elaboración Propia

De modo similar, se debe realizar la demanda AC, la suma de la demanda DC y la demanda AC, nos dará la demanda total. Las cargas AC (E_{AC}) necesitan un inversor, por lo cual se debe considerar su eficiencia y así, determinar la demanda Total o Energía Total, según la siguiente fórmula:

$$Demanda\ Total = \sum Carga_{DC} + \frac{Carga_{AC}}{n_{inversor}} (kWh) \quad (2.15)$$

La Energía o Demanda Total debe viajar previamente por cables, por un regulador de carga y por el banco de baterías, el cual en su conjunto tienen una eficiencia aproximada de 0.92.

$$E_{prom} = \frac{E_{DC} + E_{AC}}{0.92} \text{ kWh} \quad (2.16)$$

Esta energía calculada debe ser captada por los paneles solares para poder cumplir las demandas energéticas.

2.2.3.2. Generación Fotovoltaica

El proceso de generación fotovoltaica se da por medio de los paneles solares que se instalarán en la cubierta superior y el área del puente de mando, correspondiente a la superestructura.

La energía captada por los paneles pasa por un convertidor Boost, que es un convertidor DC a DC, el cual obtiene a su salida una tensión mayor que a su entrada. Este convertidor es pieza fundamental para la optimización de energía mediante el Seguidor del Punto de Máxima Potencia (MPPT)⁵⁰. Este dispositivo optimiza el rendimiento del sistema, adaptando los niveles de tensión de salida del panel fotovoltaico a los que requiere cada elemento que se va a alimentar como nuestro motor y otras demandas de carga. Con esto se puede trabajar a la máxima potencia cumpliendo el objetivo de generar la máxima cantidad de energía a partir de la radiación solar disponible, independientemente de la carga.

La energía se transporta al banco de baterías para su respectivo almacenaje. Los reguladores de carga y descarga son dispositivos que se instalan a la entrada y a la salida del banco de baterías respectivamente. El regulador de carga envía la energía que recibe de los paneles fotovoltaicos al banco de baterías completamente descargados. Durante el proceso de carga, este regulador mide el flujo entrante de energía al banco de baterías. Dándose la

⁵⁰ Fuente: “Solar Electric Boat”, Department of Electronic Engineering, University “Roma Tre”, Roma, Italy.

eventualidad de seguir captando energía y el banco de baterías esté completamente cargado, el flujo de energía se envía directamente a las cargas a través del regulador de descarga. Durante el proceso de descarga, el regulador de descarga mide el flujo de energía y el dispositivo de control compara este flujo con la data de la carga precedente. A través de esta comparación, es posible establecer el tiempo de vida de las baterías y determinar se verdadera energía almacenable.

Las baterías pueden ser cargadas cuando esté en puerto mediante una fuente de entrada externa, esto se utilizará en caso de mal tiempo o de provisión para algún viaje con mayor autonomía de lo previsto.

El sistema de control, al que se hacía mención, tiene como principal función determinar la energía real disponible para la navegación y, para realizar esta tarea, el sistema almacena información del flujo de energía y maneja la carga y descarga de las baterías. Con esta estrategia de manejo, se controla el tiempo de vida del banco de baterías y se limita el número de cargas y descargas.

Finalmente, cuando realice la entregar de la energía solicitada a los motores DC también debe existir un inversor de nueva generación, capaz de convertir la naturaleza de la corriente y regular las cargas AC de la embarcación, destinadas al confort de los pasajeros.

Para dimensionar este sistema debemos tener analizar la superficie de captación, los paneles fotovoltaicos y el índice de radiación solar disponible para garantizar la conversión de energía solar en energía eléctrica

El área requerida parara la instalación de paneles fotovoltaicos depende de la energía demandada por hora, y esta se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$E_{total/hr} = \frac{E_{total}}{\# \text{ hrs de Radiacion solar}} \text{ kW} \quad (2.17)$$

El número de paneles necesarios dependerá de la potencia de salida del panel. Éste puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$\# \text{ Paneles} = \frac{E_{total/hr} \text{ kW}}{P_{salida \text{ del panel}} \text{ W}} \quad (2.18)$$

Para saber si realmente se puede aprovechar la energía disponible solar del medio, debemos saber cuánta energía recibimos del sol y cuanta podemos transformar en el área de los paneles. La energía solar por transformar dependerá del índice de radiación solar de la zona y área destinada a los paneles, esta viene dada por la siguiente expresión:

$$E_{solar \text{ hora}} = I_{rad.solar} \times A_{paneles} \text{ kWh} \quad (2.19)$$

La energía que puede convertir un conjunto de paneles será calculada a través de la siguiente expresión:

$$E_{transf. \text{ por paneles}} = E_{solar \text{ hora}} * n_{paneles} \text{ kW} \quad (2.20)$$

Al considerar la cantidad de horas de radiación solar disponible, se tendrá que el promedio de energía que va a generar el sistema fotovoltaico instalado en la embarcación.

$$E \text{ (kWh)} = P \text{ (kWp)} \cdot At_{sol} \text{ (h)} \quad (2.21)$$

Donde

- P, es la potencia nominal en (kWp) del sistema fotovoltaico y,
- Atsol, es el equivalente de cantidad de horas al día en las que la radiación solar se mantiene en 1000W/m².

2.2.3.3. Autonomía y Reservas

El número de baterías necesarias viene dado por la cantidad de energía solar que debe almacenar para garantizar la autonomía total, para lograrlo debemos determinar la cantidad de energía solar que transformará el panel solar durante el tiempo de navegación.

El tiempo de navegación viene dado por la siguiente expresión:

$$T_{\text{Tiempo de Navegación}} = T_{\text{Autonomía}} + T_{\text{Espera}} \quad (2.22)$$

Donde:

- T. Autonomía, se define como la energía que transforma el sistema fotovoltaico durante el viaje de la embarcación.
- T. Espera, se define como el tiempo mínimo que espera la embarcación en puerto antes de zarpe.

Durante el tiempo de navegación, la embarcación transformará cierta cantidad de energía, una parte será consumida y otra será almacenada en baterías. Para hallar la cantidad de energía de reserva, y así el número de baterías que se requiere, usaremos las siguientes expresiones:

$$E_{\text{baterias}} = E_{\text{Demanda Total}} - E_{\text{solar}} \text{ (kwh)} \quad (2.23)$$

Considerando las eficiencias por pérdidas eléctricas del sistema y los ciclos de descarga profunda, se tiene la siguiente expresión:

$$E_{\text{real bat.}} = \frac{E_{\text{bat.}}}{\eta_{\text{prof. Desc}} \eta_{\text{sistema}}} \text{ kwh} \quad (2.24)$$

Luego, la capacidad de las baterías a seleccionar vendría dada por la siguiente expresión:

$$Cap_{\text{baterias}} = \frac{E_{\text{real bat.}}}{V_{\text{bat.}}} \text{ Ah} \quad (2.25)$$

Al dividir esta capacidad, entre la intensidad de corriente de la batería a escoger, se tendrá el número de baterías para reserva:

$$\#_{\text{baterias}} = \frac{Cap_{\text{baterias}}}{I_{\text{baterias}}} \quad (2.26)$$

2.2.4. Estructuración del Buque

El buque, como toda estructura de ingeniería, está sometido a esfuerzos a ciertos esfuerzos originados por la acción de causas externas o internas y debe, por consiguiente, ser capaz de soportar esos esfuerzos con un margen razonable de seguridad.

Los esfuerzos mencionados son numerosísimos en carácter e importancia, pero pueden clasificarse, en primera estancia, en dos grandes grupos: los esfuerzos del buque como estructura integral o esfuerzos estructurales, y esfuerzos sobre partes determinadas del buque o esfuerzos locales.

Los esfuerzos estructurales son de dos tipos: esfuerzos longitudinales, los cuales son estudiados a la luz del concepto viga buque, y los esfuerzos transversales, al analizar la sección transversal del buque.

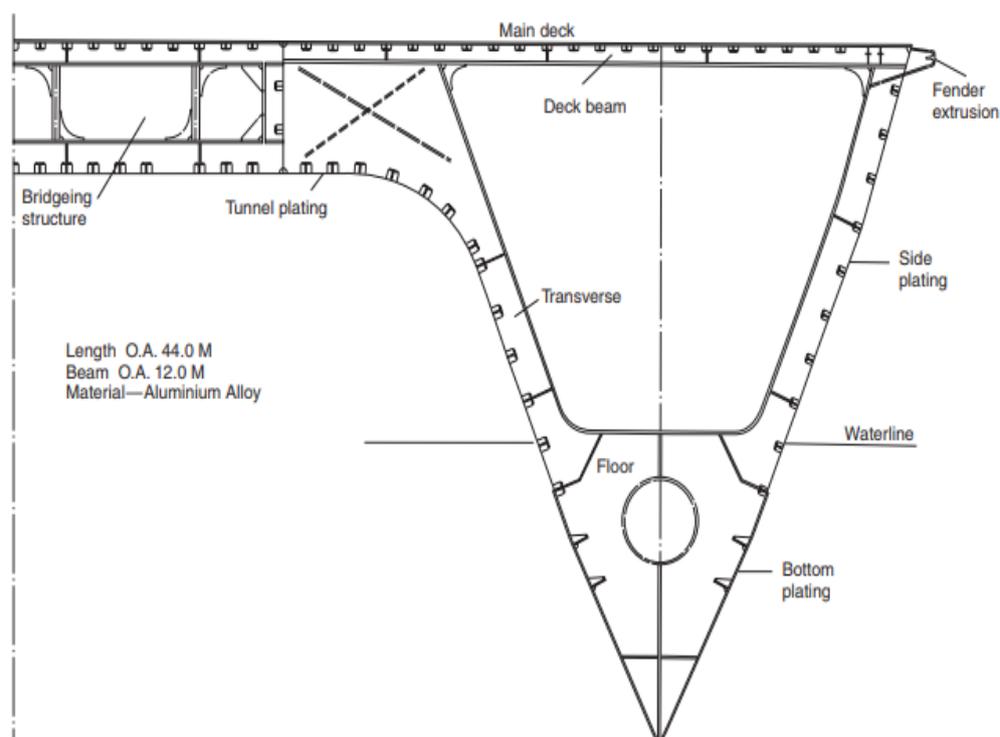


Figura 2.37.- Estructura de cuaderna típica de un Catamarán

Fuente: Ship Construction, Pág. 182

El buque puede ser concebido como una viga flotante, desde el punto de vista del estudio de resistencia. Sin embargo, mientras las vigas en tierra generalmente se apoyan en dos o más puntos; un buque lo hace en toda su extensión, ya que es soportada por el agua. Es frecuente, al referirse al buque en tales condiciones, considerarlo como una viga formada por todos aquellos elementos que se extienden de proa a popa de modo continuo, tales como el forro del casco, las cubiertas, los refuerzos longitudinales de fondo y cubiertas, etc. Los elementos transversales desempeñan en la viga-buque, en realidad, el papel de elementos de conexión entre aquellos. Tal es el caso de las cuadernas, baos, entre otros.

Nos centraremos en detallar el comportamiento estructural de la viga buque, entendiendo el comportamiento de los elementos, sin dar paso a las formulaciones matemáticas, debido a que las reglas de clasificación desarrollan esto con mayor amplitud, las cuales serán citadas cuando sean requeridas.

2.2.4.1. Comportamiento Estructural de la Viga-buque

Supongamos que un buque, por ejemplo, un carguero o cualquier otro buque con sala de máquinas en su centro, cargado en sus bodegas y flotando en aguas tranquilas Figura 2.38 (a). Imaginémoslo por un instante dividido idealmente en trozos (punteados) de proa popa y analicemos independientemente uno de esos trozos, por ejemplo, el rayado en la Figura 2.38.

Las fuerzas actuantes sobre este trozo serán, evidentemente: a) peso propio (compuesto, a su vez, por el peso del casco, superestructura, máquinas, etc., comprendidos en el mismo); b) el peso de la carga, combustible y agua contenidos en dicho trozo, y c) el empuje, igual, por el principio de Arquímedes, al peso del agua desalojada por el volumen de cada trozo.

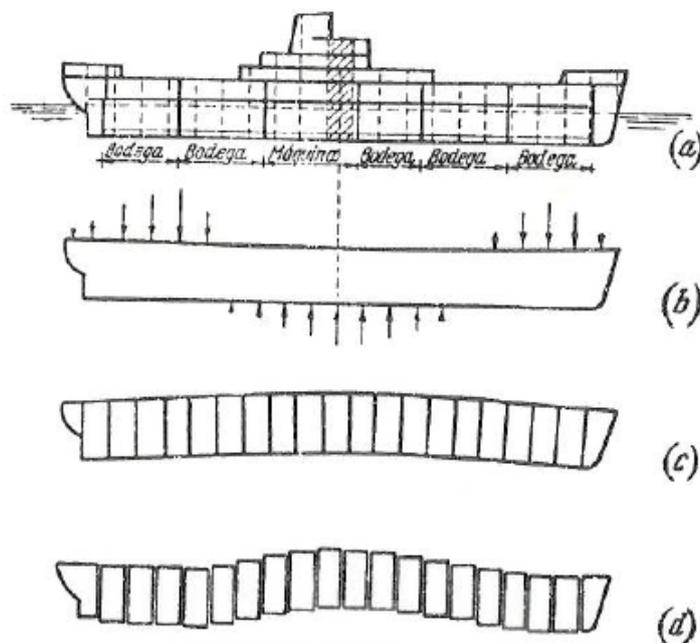


Figura 2.38.- Esquema del modelamiento Viga - Buque

Fuente: Elementos de Arquitectura Naval, pág. 173

Como ese trozo no se halla de por sí en equilibrio, ya que no flota libremente, pues forma parte del total del buque, no habrá razón para que la suma de pesos a) y b) sean igual al empuje c). Por tanto, existirá una resultante hacia arriba o hacia abajo actuante sobre cada trozo de la viga-buque. Repitiendo de razonamiento para cada uno de los trozos en que se ha imaginado subdividido el buque, se obtendrá en cada caso una cierta resultante parcial.

Es fácil ver que la zona central del Buque los empujes que actúan sobre cada trozo son grandes debido a la forma llena de la carena (forma) en esa zona, en tanto que los pesos, principalmente máquinas y alojamiento, son relativamente livianos con relación al volumen que ocupan dentro del casco. Por tanto, en esta zona las resultantes parciales estarán dirigidas hacia arriba. En los extremos de proa y popa se produce el caso inverso, ya que, debido a la forma de la carena, los empujes son menores, en tanto los pesos, principalmente carga en la bodega, son considerables con respecto al volumen ocupado. En consecuencia, en los extremos resultantes parcial están dirigidas hacia abajo.

La Viga-buque, considerada aisladamente, estará, pues, sometida a las fuerzas mencionadas, tal como se indica en la Figura 2.38. Estas fuerzas originarán tensiones internas perfectamente determinables por el método de resistencia de materiales. Así, en el caso considerado momentos flectores y esfuerzos de corte a lo largo de la viga-buque que tratarán de deformarla, como se indican en c) y d), respectivamente. El momento flector, según puede demostrarse, alcanzará su máximo valor en el centro del buque, en tanto que el esfuerzo de corte, nulo en el centro, será máximo en puntos situados aproximadamente un cuarto de la eslora desde los extremos. Las estructuras longitudinales continuas, mencionadas anteriormente, que forman la viga-buque, deberán ser, pues, calculadas de modo para poder resistir las tensiones de flexión y corte analizadas.

Cuando el buque navega en la mar la superficie de este no es horizontal, como en agua tranquilas, sino que se ve alterada por la presencia de olas. Esta presencia de olas genera dos condiciones estructurales en el buque, denominado quebranto y arrufo.

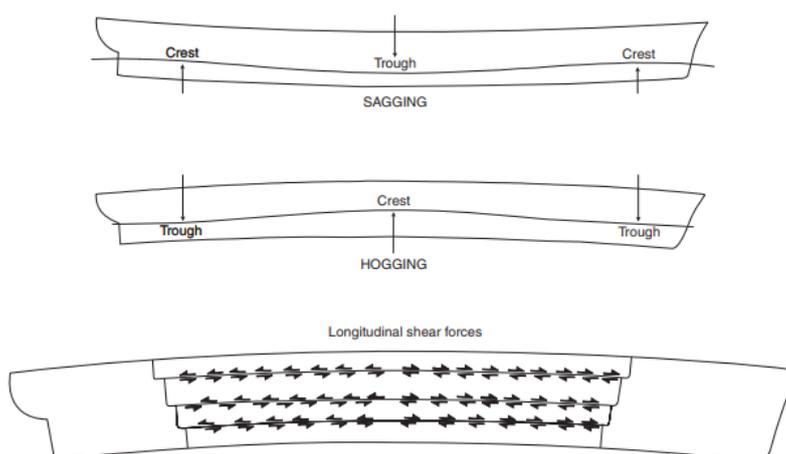


Figura 2.39.- Esquema de Quebranto y Arrufo

Fuente: Ship Construction, pág. 59

La condición de Quebranto o “Hogging” se da cuando el buque se encuentra con reflexiones sobre una cresta de la ola (Figura 2.40 a), es evidente que el agua alcanza en la parte central una altura mayor que la correspondiente en la flotación en aguas tranquilas, ocurriendo el inverso en los extremos, ya que suponemos que el desplazamiento, y por tanto el calado medio, son los mismos que en la condición analizada en aguas tranquilas. Por tanto, aumentarán los empujes en los trozos de la parte central del buque y disminuirán en los extremos. Esto hará, ya que los pesos no han variado, en el centro del buque sea más acentuada la diferencia a favor de los empujes y en los y en los extremos en favor el peso que en la condición que en la condición de aguas tranquilas.

La distribución de los resultantes parciales será, pues, similar a la de aquel caso, con fuerzas de mayor intensidad, dando la distribución indicada en la Figura 2.40 b. La viga-buque tenderá a flexionarse del modo indicado del croquis pequeño, produciéndose, por tanto, tensiones de tracción en la cubierta superior y de compresión en el fondo.

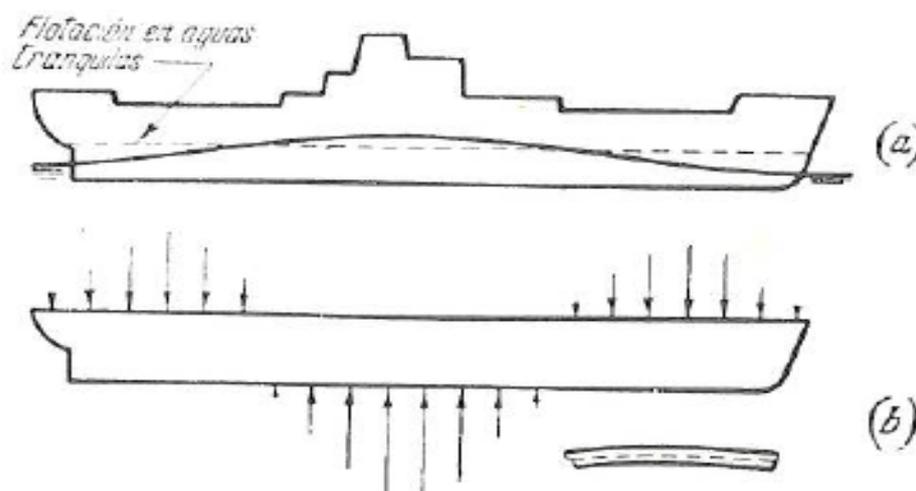


Figura 2.40.- Condición del buque en Quebranto

Fuente: Elementos de Arquitectura Naval, pág. 175

La condición de Arrufo o “Sagging” se da cuando el buque se encuentra con su sección media en el seno de una ola (Figura 2.41 a), el agua alcanzará en el centro un nivel más bajo y en los extremos más alto en la flotación en aguas tranquilas.

Por tanto, es evidente que en la parte central del buque disminuirán los empujes, y en los extremos, en cambio, aumentarán. La distribución de fuerzas correspondientes a aguas tranquilas, por tanto, teniendo en cuenta que los pesos han permanecidos invariables, se invertirá, ya que ahora en el centro de los pesos superarán a los empujes y en los extremos a la inversa.

Se obtendrá, pues, la distribución de resultantes parciales mostrada en la Figura 2.41 b, la cual tenderá a flexionar la viga-buque del modo indicado en el croquis pequeño, produciendo, en consecuencia, tensiones de compresión en la cubierta superior y de tracción en el fondo.

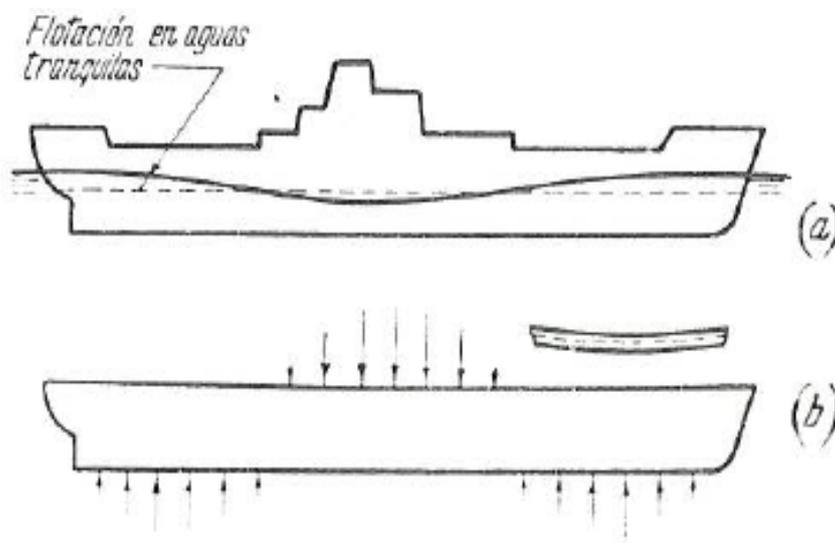


Figura 2.41.- Condición del buque en Arrufo

Fuente: Elementos de Arquitectura Naval, pág. 175

2.2.4.2. Deformaciones transversales

Las principales fuerzas transversales se deben a:

- **Presión de agua.** - La presión hidrostática actúa sobre la obra viva distribuyéndose como se indica la Figura 2.42. El fondo y costados tiene hacer “hundido” según la línea punteada y deben, por tanto, ser calculados de modo que, en conjunto con los elementos que los sostienen (cuadernas, longitudinales el fondo, etc.), resistan dicha presión. Esta presión es, no obstante, comparativamente moderada en buques de superficie. En submarinos, en cambio, se convierte en fuerza primordial.

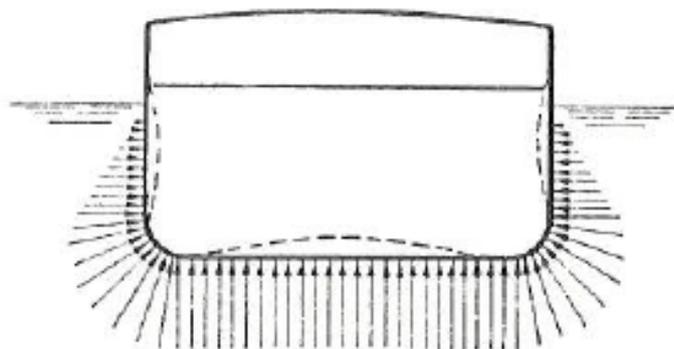


Figura 2.42.- Distribución de Presión Hidrostática

Fuente: Elementos de Arquitectura Naval, pág. 177

- **Deformación transversal por esfuerzo inercia.** - Al rolar un buque hacia una banda, la parte superior de la obra muerta y la superestructura tienden hacer “arrancadas” por la fuerza de Inercia debida a la aceleración tangencial el movimiento oscilatorio de rolado. Los “marcos” formados por las cuadernas y baos respectivos tienden a deformarse según la línea punta de la Figura 2.43, y los esfuerzos así generados deben ser absorbido por aquellos elementos estructurales y sus conexiones.

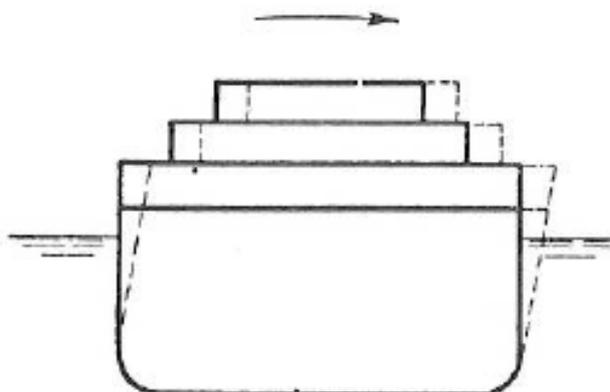


Figura 2.43.- Deformación Transversal

Fuente: Elementos de Arquitectura Naval, pág. 177

2.2.4.3. Esfuerzos Locales

Los esfuerzos locales, son estudiados y modelados particularmente, su influencia global afecta a zonas limitada del buque por lo que se debe estudiar caso por caso, como:

- **Cargas concentradas.** - Grandes pesos de sala de máquinas, superestructuras, piezas de artillería, cargas de impacto, etc.
El uso de estas supone reforzar las zonas de influencia de los esfuerzos, evitando deformaciones locales.
- **Cargas externas concentradas.** - Presión en los picaderos y puntales cuando la embarcación entra a dique, presión en el fondo por varadura, explosiones u otras.
- **Impactos con el agua.** - durante la navegación la proa, por efecto del cabeceo, adquiere un movimiento vertical de ascenso - descenso. Este movimiento en mal tiempo, o a grandes velocidades causa un golpe constante originando esfuerzos cíclicos, por lo cual la proa debe ser reforzada.
- **Esfuerzos dinámicos locales.** - Todos los pesos del buque, adquieren durante los movimientos en la mar, cierta aceleración y, en consecuencia, son solicitados por fuerzas de inercia.

- **Otros.** - Pandeos de chapas en cubiertas o en el fondo, pandeo de puntales y otros, debido a esfuerzos estructurales en condición de quebranto y arrufo.

2.2.4.4. Condiciones estructurales en aguas tranquilas

Para realizar el modelamiento estructural global de nuestra embarcación, simularemos las condiciones en aguas tranquilas (adecuadas para ríos y buques que realicen navegación interior).

Este análisis supone realizar las condiciones de cargas, empuje y de operación para una flotación paralela sin formación de olas. El análisis debe garantizar que la estructura soporte los esfuerzos con un margen de seguridad. Eso no implica que se dejen de lado las verificaciones de fluencia por esfuerzos longitudinales en la sección media. Se debe tener la seguridad que los elementos en conjunto soporten las solicitaciones.

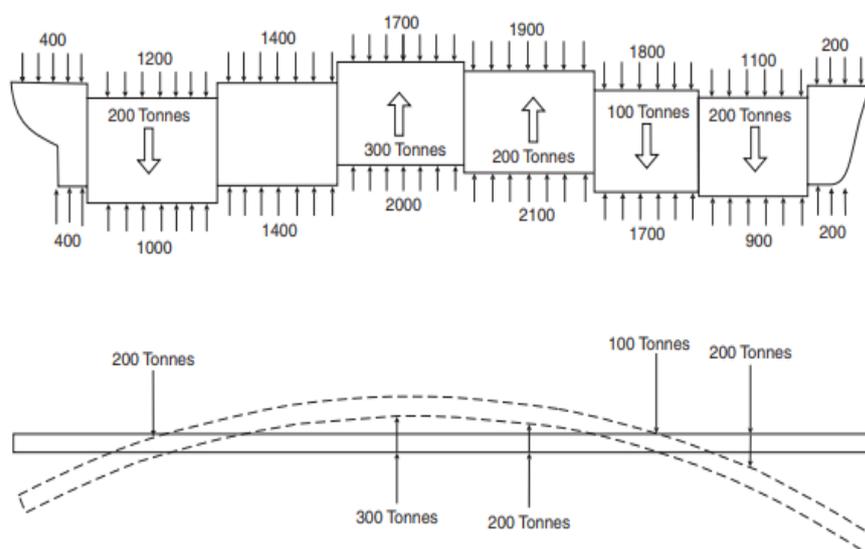


Figura 2.44.- Modelamiento de cargas en la Viga - buque

Fuente: Ship Construction, Pág. 57

2.2.4.5. Reglas de Clasificación

Las normas de clasificación, en base a los modelamientos de la resistencia de materiales, y los estudios realizados para numerosos tipos de embarcaciones, presentan sus propias formulaciones para dimensionar los elementos principales de un buque.

Para nuestro caso usaremos las reglas de clasificación de la Bureau veritas, que nos permitirán estructurar la embarcación se muestran a modo de resumen en las siguientes tablas. La normativa está muy bien desarrollada y toma en consideración los modelamientos de la mecánica clásica y teorías modernas de deformación y comportamiento del buque en navegación restringida.

Esta normativa contempla factores de diseño, criterios para seleccionar y dimensionar perfiles de acuerdo con el material a construir, disposición de refuerzos, entre otros.

A continuación, citamos las fórmulas más representativas de la norma que serán usadas en el escantillonado de los elementos estructurales principales de nuestra embarcación.

Tabla 2.16.- Símbolos de acuerdo con NR 217 B

Símbolo	Descripción
t	Espesor neto de las planchas, en mm.
s	Espaciado de los refuerzos secundarios, en m.
S	Espaciado de los elementos primarios, en m.
ℓ	Vano de los refuerzos secundarios o de los elementos primarios, en m.
η	Coeficiente considerado igual a: $\eta = 1 - s/2 \ell$
p	Presión lateral de diseño, en kN/m ² , definido en [2].
n	Coeficiente de navegación definido en el Cap. 3, Sec. 1, [5.2].
β_b, β_s	Coeficientes de corrección de vano definidos en el Cap 2, Sec. 4, [5.2]
w	Módulo de sección neto de refuerzos secundarios o de elementos primarios, en cm ³ .
A _{sh}	Área seccional a cortante neta, en cm ² .
k	Factor del material definido en el Cap. 2, Sec. 3, [2.4] y Cap. 2, Sec. 3, [3.4]
R _Y	Esfuerzo de fluencia mínimo, en N/mm ² , del material, a ser considerado igual a 235/k N/mm ² , a menos que se especifique de otra forma.
R _{eH}	Esfuerzo de fluencia mínimo, en N/mm ² , del material según es definido en el Cap. 2, Sec. 3, [2]
γ_R	Factor de seguridad parcial que cubra incertidumbres con respecto de la resistencia, definido en el Cap.5, Sec. 1, [1.3].
γ_m	Factor de seguridad parcial que cubra incertidumbres con respecto del material, definido en el Cap. 5, Sec. 1, [1.3].

Fuente: Elaboración Propia⁵¹

⁵¹ Elaborado de acuerdo con NR 217 Part B, Cap. 5 – Sec. 6.

Tabla 2.17.- Coeficientes y Símbolos de acuerdo con NR 217 B

Símbolo	Descripción
E	Módulo de Young, en N/mm ² , se considerará: Para aceros en general: $E = 2,06 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ Para aceros inoxidables: $E = 1,95 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ Para aleaciones de aluminio: $E = 7,0 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$
Ca	Relación de aspecto, igual a: $C_a = 1,21 \sqrt{1 + 0,33 \left(\frac{S}{\ell}\right)^2} - 0,69 \frac{S}{\ell} \leq 1$
Cr	Coeficiente de curvatura: $C_r = 1 - 0,5 \frac{S}{r} \geq 0,5$
r	Radio de curvatura, en m.

Fuente: Elaboración Propia⁵²⁵² Elaborado de acuerdo con NR 217 Part B, Cap. 5 – Sec. 6.

Tabla 2.18.- Presiones de acuerdo con NR 217 B

	Elemento	Referencia
Fondo	Planchas	Sec 2, Tab 1
	Componentes estructurales	Sec 2, Tab 2
Costados	Planchas y componentes estructurales	Sec 3, Tab 1
Cubierta	Planchas y componentes estructurales	Sec 4, Tab 1

Fuente: NR 217 B, pág. 142

Tabla 2.19.- Presiones Laterales de diseño de planchas

Estructura	Componente estructural	Presión lateral de diseño p , en kN/m^2
Fondo sencillo	<i>Planchas del fondo</i>	<ul style="list-style-type: none"> • p_E • $p_C - p_{Em}$
Doble fondo	<i>Planchas del fondo</i>	<ul style="list-style-type: none"> • p_B • $p_B - p_{Em}$
	<i>Planchas del doble fondo</i>	<ul style="list-style-type: none"> • p_B • p_C • p_{FL}

Fuente: NR 217 B⁵³

⁵³ Tomado de Part B, Cap. 5 – Sec. 1-2, Tabla 1, pág. 109

Tabla 2.20.- Presiones laterales de diseño

Estructura	Componente estructural	Presión lateral de diseño p , en kN/m^2
Fondo sencillo	Longitudinales del fondo	<ul style="list-style-type: none"> • P_E • $P_C - P_{Em}$
	Varengas	<ul style="list-style-type: none"> • P_E • $P_{yl} - P_{Em}$ (1)
	Transversales del fondo	
	Vagras	<ul style="list-style-type: none"> • P_E • $P_C - P_{Em}$
Doble fondo	Longitudinales del fondo	<ul style="list-style-type: none"> • P_B • $P_B - P_{Em}$
	Longitudinales del doble fondo	<ul style="list-style-type: none"> • P_C • P_B • P_{FL}
	Varengas	<ul style="list-style-type: none"> • P_E • $P_{yl} - P_{Em}$ (1)
	Transversales del doble fondo	
	Vagras del doble fondo	<ul style="list-style-type: none"> • P_E • $P_C - P_{Em}$
<p>(2) Para carga a granel seca: $p_{yl} = c p_C$ Para otro tipo de carga: $p_{yl} = p_C$</p>		

Fuente: NR 217 B ⁵⁴⁵⁴ Tomado de Part B, Cap. 5 – Sec. 1-2, Tabla 2, pág. 110.

Tabla 2.21.- Presiones laterales de diseño para costado y estructuras superiores

Estructura	Componente estructural	Presión lateral de diseño p , en kN/m^2
Costado simple	Plancha del costado y componentes estructurales	p_E $p_C - p_{Em}$
Doble casco	Plancha del costado y componentes estructurales	p_E $p_B - p_{Em}$
	Plancha del doble casco y elementos estructurales	p_C p_B p_{FL}
	Bulárcamas	p_E $p_C - p_{Em}$

Estructura	Presión lateral p , en kN/m^2
Plancha del trancañil de la cubierta abierta	p_E p_B
Brazola de escotilla	3
Plancha de cubierta, tronco	p_E p_C

Fuente: NR 217 B ⁵⁵

⁵⁵ Tomado de Part B, Cap. 5 – Sec. 3 y 4 - Tabla 1, pág. 117 - 125

Tabla 2.22.- Fórmulas para el cálculo de presiones.

	Ítem	Símbolo	Fórmula
PRESIÓN EXTERNA [kN/m ²]	Presión en los costados y en el fondo	P_E	$Z \leq T_1: P_E = P_{SE} + \gamma_{W2} P_{WE}$ $Z \geq T_1: P_E = \gamma_{W2} P_{WE}$
	Contrapresión de río	P_{Em}	$Z \leq T_1: P_{Em} = P_{SE} + \gamma_{W2} P_{WE}$ $Z > T_1: P_{Em} = \gamma_{W2} P_{WE}$
	Presión de aguas tranquilas de río	P_{SE}	$P_{SE} = 9.81 (T_1 - Z)$
	Presión de ola de río	P_{WE}	De acuerdo con la Tabla 2.21

Fuente: Elaboración Propia⁵⁶

Tabla 2.23.- Formulas para el cálculo de presión en cubiertas expuestas

Ubicación de la cubierta expuesta		p_E , en kN/m ²
Cubierta abierta, tronco		3,75 (n + 0,8)
Cubierta expuesta de la superestructura o caseta de cubierta	Primera capa (no pública)	2,0
	Capas superiores (no pública)	1,5
	Pública	4,0

Fuente: NR 217 B⁵⁷

⁵⁶ Datos tomados de acuerdo con NR 217 B – Part B, Cap. 5, Sec. 6

⁵⁷ Tomado de Part B, Cap. 3, Sec. 4, Tabla 3, pág. 90

Tabla 2.24.- Fórmulas para el cálculo de presión de olas

Figura 2: Presión de aguas tranquilas de río

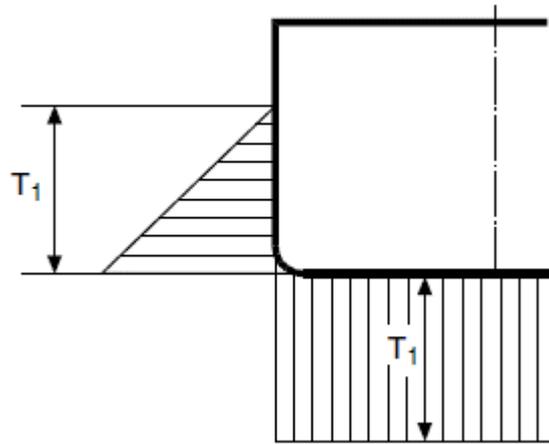


Figura 3: Presión de ola de río

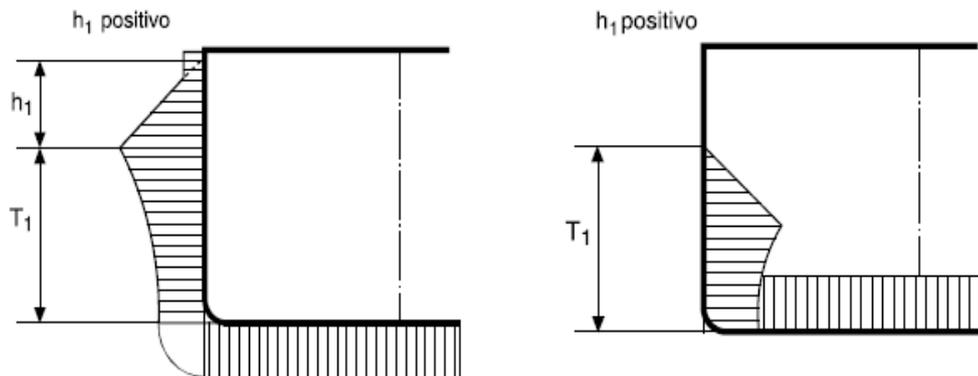


Tabla 2: Presión de ola de río p_{WE} en costados y fondo en condición adrizada

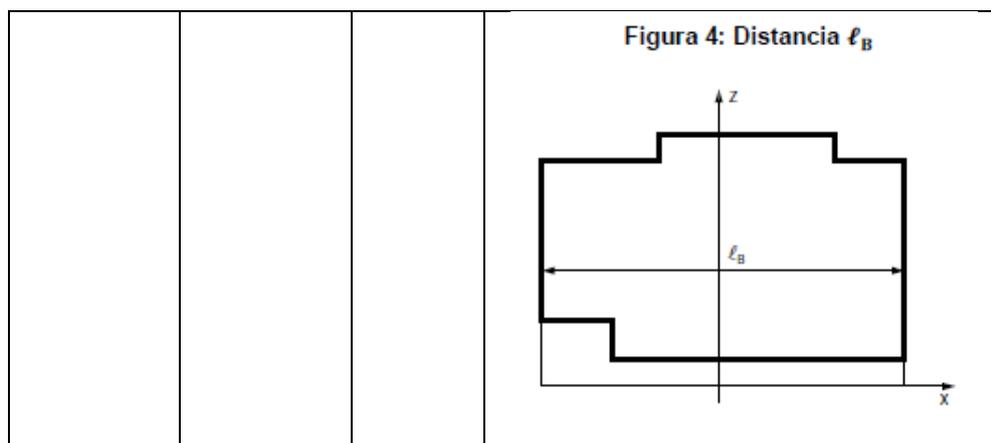
Ubicación	Presión de ola de río p_{WE} , en kN/m^2	
	Cresta (h_1 positivo)	Valle (h_1 negativo)
Fondo y costados por debajo de la línea de flotación ($z \leq T_1$)	$p_{WE} = 9,81 h_1 \left(\frac{0,23(z - T_1)}{T_1} + 1 \right)$	$p_{WE} = -9,81 h_1 \left(\frac{0,23(z - T_1)}{T_1} + 1 \right)$ Sin ser menor que $-9,81 (T_1 - z)$
Costados encima de la línea de flotación	$p_{we} = 9,81 (T_1 + h_1 - z)$ Sin ser menor que <ul style="list-style-type: none"> • $2 + 0,3 n 0,5$ para $H > 0,6$ • $2 + 0,25 n$ para $H \leq 0,6$ 	$p_{WE} = 0,0$
<p>Nota 1: El valor de referencia del movimiento relativo h_1 tiene en cuenta los casos de carga definidos en el Cap 3, Sec 1, [4].</p> <p>Nota 2: La presión de ola de río en el valle de la ola debe ser utilizada únicamente para el cálculo de la contrapresión de río p_{Em}.</p>		

Fuente: NR 217 B ⁵⁸

Tabla 2.25.- Fórmulas para el cálculo de presión en líquidos

	Ítem	Símbolo	Fórmula
CARGAS EN LIQUIDOS [kN/m ²]	Presión en General	P_c, P_b	$P_c = P_s + \gamma_{W2} P_{WE} : \text{carga liq.}$ $P_b = P_s + \gamma_{W2} P_{WE} : \text{lastre}$
	Presión de aguas tranquilas	P_s	Carga Liquida: $P_s = 9.81 \rho_L (Z_L - Z)$ $P_s = 9.81 \rho_L (Z_{TOP} - Z) + 1.15 p_{pv}$ Lastre: $P_s = 9.81 (Z_{TOP} - Z + d_{AP})$
	Presión de Inercia	P_w	$P_w = \rho_L \gamma_{W2} [0,5 a_{x1} \ell_B + a_{z1} (z_{TOP} - z)]$

⁵⁸ Tomado de Part B, Cap. 3, Sec. 4, pág. 90



Fuente: Elaboración Propia⁵⁹

Tabla 2.26.- Fórmulas para el cálculo de presión - Otros

	Ítem	Símbolo	Fórmula
OTROS [kN/m ²]	Presión transmitida hacia acomodación	P	$P = P_S + \gamma_{W2}P_W$
	Presión de aguas tranquilas transmitida a cubierta	P_S	De acuerdo a Tabla 2.25

⁵⁹ Elaborado de acuerdo con NR 217 B – Part B, Cap. 3, Sec. 4, pág. 90

Presión de inercia	$P_{w,z}$	$P_{w,z} = p_s \frac{az_1}{9,81}$
Presión de inundación	P_{FL}	$P_{FL} = 9.81(Z_{Top} - Z)$

Fuente: Elaboración Propia⁶⁰

Tabla 2.27.- Presión de aguas tranquilas transmitida a cubierta

Tipo de compartimento para alojamientos	p_s , en kN/m ²
Grandes áreas (como, restaurantes, salones, salas de cine, áreas de espera, cocina, áreas de servicios, salas de juegos y hobbies, hospitales)	4,0
Cabinas	3,0
Otros compartimentos	2,5

Fuente: NR 217 B ⁶¹

Tabla 2.28.- Fórmulas para el cálculo de planchas del casco

Tabla 4: Espesores netos de las planchas del casco, en mm

Elemento	Arreglo estructural transversal	Arreglo estructural longitudinal
Fondo	$t_1 = 1,85 + 0,03 L k^{0,5} + 3,6 s$ $t_2 = 21 C_a C_r s \sqrt{\frac{Y_R Y_m P}{R_Y}}$ $t_3 = 44,4 s K_{Mz} \sqrt{\frac{R_{eH} L}{E}}$	$t_1 = 1,1 + 0,03 L k^{0,5} + 3,6 s$ $t_2 = 16,4 C_a C_r s \sqrt{\frac{Y_R Y_m P}{R_Y}}$ $t_3 = 25,5 s K_{Mz} \sqrt{\frac{R_{eH} L}{E}}$
Doble fondo	$t_1 = 1,5 + 0,016 L k^{0,5} + 3,6 s$ $t_2 = 21 C_a C_r s \sqrt{\frac{Y_R Y_m P}{R_Y}}$ $t_3 = 44,4 s K_{Mz} \sqrt{\frac{R_{eH} L}{E}}$	$t_1 = 1,5 + 0,016 L k^{0,5} + 3,6 s$ $t_2 = 16,4 C_a C_r s \sqrt{\frac{Y_R Y_m P}{R_Y}}$ $t_3 = 25,5 s K_{Mz} \sqrt{\frac{R_{eH} L}{E}}$
Costado	$t_1 = 1,68 + 0,025 L k^{0,5} + 3,6 s$ $t_2 = 21 C_a C_r s \sqrt{\frac{Y_R Y_m P}{R_Y}}$	$t_1 = 1,25 + 0,02 L k^{0,5} + 3,6 s$ $t_2 = 16,4 C_a C_r s \sqrt{\frac{Y_R Y_m P}{R_Y}}$

⁶⁰ Elaborado de acuerdo con NR 217 B – Part B, Cap. 3 , Sec 4.

⁶¹ Tomado de NR 217 B - Part B, Cap. 3, Sec. 4, Tabla 6, pág. 90

Fuente: NR 217 B⁶²

Tabla 2.29.- Fórmulas para el cálculo de elementos del casco

Componente	w (cm ³)	A _{sh} (cm ²)
Longitudinales del fondo, doble fondo, cubierta y brazola de escotilla	$w = \frac{\gamma_R \gamma_m \beta_b P}{m R_Y (1 - 0,18 \gamma_R \gamma_m K_{MZ})} S \ell^2 10^3$	$A_{sh} = 10 \gamma_R \gamma_m \beta_s \frac{P}{R_Y} \eta S \ell$
Longitudinales de costado y de doble casco Longitudinales del mamparo longitudinal	$w = \beta_b \frac{\gamma_R \gamma_m P}{m R_Y} S \ell^2 10^3$	
Palmejares y vagras del fondo (1)	$w = \frac{\gamma_R \gamma_m \beta_b P}{m R_Y} S \ell^2 10^3$	$A_{sh} = 10 \gamma_R \gamma_m \beta_s \frac{P}{R_Y} S \ell$
Esloras de cubierta (1)	$w = \frac{\gamma_R \gamma_m \beta_b P}{m R_Y} S \ell^2 10^3$	$A_{sh} = 10 \gamma_R \gamma_m \beta_s \frac{P}{R_Y} S \ell$
(1) El vano ℓ deberá ser tomado igual al espaciado de transversales o bulárcamas.		
Nota 1:		
m : Coeficiente de contorno a ser tomado igual para:		
<ul style="list-style-type: none"> • m = 12, en general, para refuerzos secundarios • m = 8, en general, para elementos primarios 		
$K_{MZ} = \sqrt{\frac{K_M}{K_Z}}$		
K _M : Coeficiente definido en la Tab 2		
K _Z : Coeficiente definido en la Tab 3		

Fuente: NR 217 B⁶³

2.2.5. Estabilidad en Buques

La estabilidad en un buque está definida conceptualmente, como la capacidad del buque para volver a su posición inicial al ser apartado de ella por la acción de fuerzas externas. Los buques son diseñados para soportar las condiciones más desfavorables del medio donde navegará y, los riesgos de propios de la

⁶² Tomado de NR 217 B – Part B, Cap. 3, Sec. 4, Tabla 4, pág. 90-91.

⁶³ Tomado de NR 217 B – Part B, Cap. 3, Sec. 4, Tabla 5, pág. 145

actividad que desempeña, como la acción de los vientos, tormentas, olas, movimiento brusco de pesos, movimiento de pasajeros, entre otros.

Para poder cuantificar esta capacidad del buque para mantenerse adrizado, se establecieron los criterios de estabilidad como resultado de numerosos estudios de acuerdo con el tipo de buque, condición de carga y situaciones diversas.

Los siguientes criterios de estabilidad, según la OMI (organización marítima internacional), para embarcaciones de pasajeros son: los criterios relativos a la curva de brazos adrizantes, los relativos a viento y balance intenso y aglomeración de pasajeros.

2.2.5.1. Criterios de Estabilidad

2.2.5.1.1. Criterios relativos a las propiedades de la curva de brazos adrizantes

Los criterios relativos a las propiedades de la curva de brazos adrizantes establecen que para que una embarcación o buque se considere estable debe poder cumplir a cabalidad los siguientes requisitos:

- El área bajo la curva de brazos adrizantes (curva de brazos GZ) no será inferior a 0,055 metro-radián hasta un ángulo de escora $\varphi = 30^\circ$ ni inferior a 0,09 metro-radián hasta $\varphi = 40^\circ$, o hasta el ángulo de inundación descendente φ_f si éste es inferior a 40° . Además, el área bajo la curva de brazos adrizantes (curva de brazos GZ) entre los ángulos de escora de 30° y 40° , o entre 30° y φ_f si este ángulo es inferior a 40° , no será inferior a 0,03 metro-radián.
- El brazo adrizante GZ será como mínimo de 0,2 m a un ángulo de escora igual o superior a 30° .
- El brazo adrizante máximo corresponderá a un ángulo de escora no inferior a 25° . Si esto no es posible, podrán aplicarse, a reserva de lo que apruebe la Administración, criterios basados en un nivel de seguridad equivalente.
- La altura metacéntrica inicial GM_0 no será inferior a 0,15 m.

Cuando el brazo máximo adrizante de un buque ocurre mayor a los 30°, se debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Una altura metacéntrica inicial (GM) de por lo menos 0.15m. (0.49 pies).
- Un máximo brazo adrizante (GZ) de por lo menos 0.20 m (0.66 pies) a un ángulo de escora igual o mayor a los 30°.
- El área bajo la curva de brazos adrizantes debe ser como mínimo 3.15 m-grados (10.3 pies-grados) hasta un ángulo de escora de 30°.
- El área bajo la curva de brazos adrizantes debe ser como mínimo 5.15 m-grados (16.9 pies-grados) hasta un ángulo de escora de 40° o hasta el ángulo de inundación, cual sea el menor.
- El área bajo cada curva de brazos adrizantes entre los ángulos de 30° y 40°, o entre 30° y el ángulo de inundación, si este es menor a 40°, deberá ser no menor que 1.72 m-grados (5.6 pies-grados).

Cuando el brazo máximo adrizante de un buque ocurre antes de los 30°, se debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Una altura metacéntrica inicial (GM) de por lo menos 0.15m. (0.49 pies).
- Un máximo brazo adrizante (GZ) que ocurra a un ángulo de escora no menor a 15°.
- El área bajo la curva de brazos adrizantes debe ser como mínimo 5.15 m-grados (16.9 pies-grados) hasta un ángulo de escora de 40° o hasta el ángulo de inundación, cual sea el menor. (0,09 m-rad).
- El área bajo cada curva de brazos adrizantes entre los ángulos de 30° y 40°, o entre 30° y el ángulo de inundación, si este es menor a 40°, deberá ser no menor que 1.72 m-grados (5.6 pies-grados / 0,03 m-rad)
- El área bajo cada curva de brazos adrizantes hasta el ángulo del máximo brazo adrizante deberá ser no menor que el área determinada por la siguiente ecuación:

$$A = 3.15 + 0.057(30 - Y) \text{ m-grados} \quad (2.27)$$

$$A = 10.3 + 0.187(30 - Y) \text{ pies-grados} \quad (2.28)$$

Donde:

- A, es el área, in m-grados (pies-grados).
- Y, es el ángulo del máximo brazo adrizante, en grados.

2.2.5.1.2. Criterio Meteorológico

Habrá que demostrar la aptitud del buque para resistir los efectos combinados del viento de través y del balance, con referencia a la Figura 2.45, del modo siguiente:

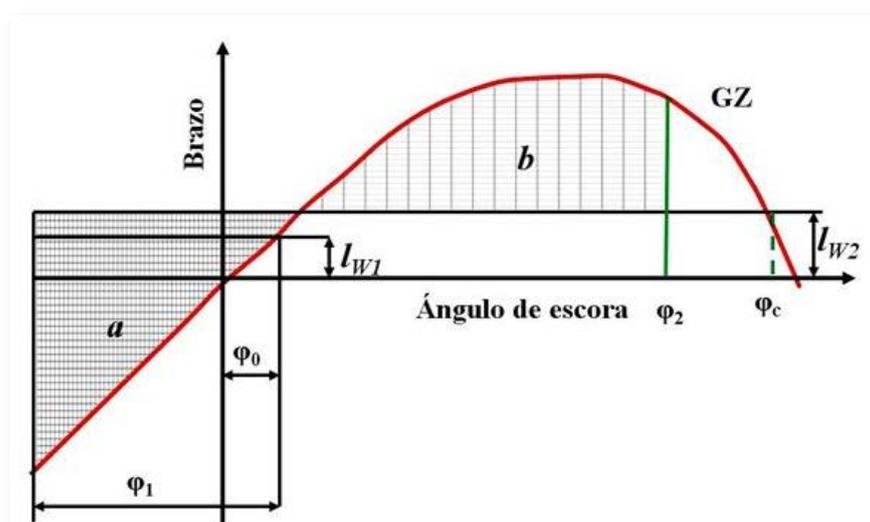


Figura 2.45.- Vientos y balance intenso

Fuente: Imagen disponible en Internet.⁶⁴

Donde los ángulos se definen como:

- φ_0 = ángulo de escora provocado por un viento constante
 - φ_1 = ángulo de balance a barlovento debido a la acción de las olas.
- (Véanse a y b)

⁶⁴ Tomado de: <http://estabilidadbuque.blogspot.com/2012/04/criterios-generales-de-estabilidad-omi.html>

- φ_2 = ángulo de inundación descendente (φ_f), o 50° , o φ_c , tomando de estos valores el menor.
- φ_f = ángulo de escora al que se sumergen las aberturas del casco, superestructuras o casetas que no puedan cerrarse de modo estanco a la intemperie. Al aplicar este criterio no hará falta considerar abiertas las pequeñas aberturas por las que no pueda producirse inundación progresiva.
- φ_c = ángulo de la segunda intersección entre la curva de brazos escorante l_{w2} y la de brazos GZ.

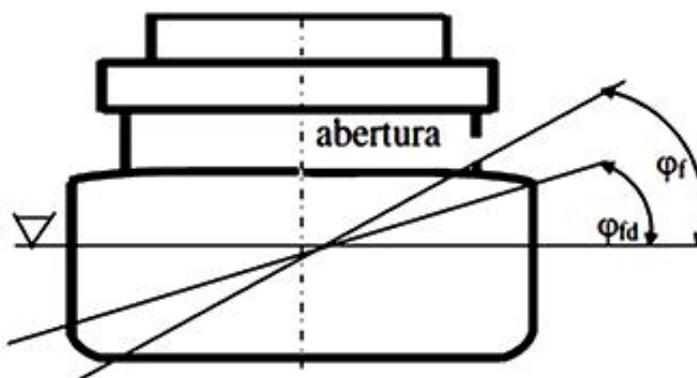


Figura 2.46.- Ángulo de Inundación

Fuente: Imagen disponible en Internet.⁶⁵

El análisis supone someter el buque a la presión de un viento constante que actúe perpendicularmente al plano de crujía, lo que dará como resultado el correspondiente brazo escorante (l_{w1}).

Se supondrá que a partir del ángulo de equilibrio resultante (φ_0), el buque se balancea por la acción de las olas hasta alcanzar un ángulo de balance (φ_1) a barlovento. El ángulo de escora provocado por un viento constante (φ_0) no

⁶⁵ Tomado de: <http://estabilidadbuque.blogspot.com/2012/04/criterios-generales-de-estabilidad-omi.html>

deberá ser superior a 16° o al 80 % del ángulo de inmersión del borde de la cubierta, si este ángulo es menor.

Luego, se someterá al buque a la presión de una ráfaga de viento que dará como resultado el correspondiente brazo escorante (l_{w2}); y en estas circunstancias, el área b debe ser igual o superior al área a, como se indica en la Figura 2.45.

Para nuestra embarcación este criterio pierde fuerza, debido a que no se permite realizar navegación de buques de pasajeros cuando hay presencia de lluvias y Vientos, y no está de acuerdo al perfil operativo de nuestro diseño. Este criterio toma mayor relevancia cuando se trata de buques que realicen navegación en aguas internacionales. Aunque, se tomará los criterios pertinentes de acuerdo con la normativa NR217 D.

2.2.5.2. Buques de Pasaje

Los buques o embarcaciones de pasaje, de acuerdo con OMI y disposiciones compatibles a la normativa NR 217, cumplirán las prescripciones de los Criterios relativos a las propiedades de la curva de brazos adrizantes y Criterio de viento y balance intensos, según aplique.

Además, el ángulo de escora producido por la aglomeración de pasajeros en una banda, tal como se define abajo, no excederá de 10° .

$$E = \frac{n_{pas} \cdot P \cdot d}{D} \cos\varphi \quad (2.29)$$

Donde:

- E , escora del buque.
- P , es peso medio de un solo pasajero.
- d , es la distancia media de los pasajeros a la línea crujía del buque.
- D , es el desplazamiento del buque (mismas unidades que P).

Las consideraciones para el análisis son las siguientes:

- Se supondrá una masa mínima de 75 kg por pasajero, si bien se permitirá aumentar este valor, a reserva de que lo apruebe la Administración. La Administración determinará además la masa y la distribución del equipaje.
- La altura del centro de gravedad de los pasajeros se supondrá igual a 1 m por encima del nivel de cubierta estando los pasajeros de pie. Si es necesario, se tendrán en cuenta la brusca y el arrufo de la cubierta; y 0,3 m por encima de los asientos estando sentados los pasajeros. No será necesario tomar un valor superior a cuatro (4) personas por metro cuadrado (m²).
- El ángulo de escora debido a una maniobra de giro no excederá de 10° si se calcula utilizando la fórmula siguiente:

$$M_R = 0.2 \frac{v_o^2}{Lwl} \Delta \left(KG - \frac{d}{2} \right) \quad (2.30)$$

Donde:

- M_R , momento escorante, en (kNm)
- V_o , velocidad de servicio, en (m/s)
- Lwl , eslora en la flotación del buque, en (m)
- Δ , desplazamiento, en (ton)
- d , calado medio, en (m)
- KG , altura del centro de gravedad sobre la línea de base, en (m).

CAPÍTULO III

CÁLCULOS Y/O APLICACIONES Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

3.1. CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO

3.1.1. Características Principales

De acuerdo con los objetivos del diseño y el alcance desarrollado, se plantea una embarcación que responda a los siguientes requerimientos:

[1]	Clasificación	:	II ●Hull ●MC 5 IN (0,6) (-) Passenger Vessel ⁶⁶
[2]	Pasajeros	:	50 pasajeros
[3]	Velocidad de Crucero	:	6 kn
[4]	Equipo Propulsor	:	DC motor Eléctrico
[5]	Generación Eléctrica	:	Planta Solar Fotovoltaica Baterías, paneles solares, recarga auxiliar y generador de Emergencia
[6]	Vol. Combustible	:	A definir (Emergencia)
[7]	Material Constructivo	:	Aluminio
[8]	Adicionales	:	Acabado de tipo crucero. Materiales y equipamiento de compatibles a normas de clasificación.

⁶⁶ Se ha elegido la notación de clase más accesible y acorde a los requerimientos de cualquier sociedad IACS, sin detrimento a las exigencias del diseño, de modo que pueda ser factible su construcción sin afectar los principios de seguridad, criterios técnicos y adquisición de materiales.

3.1.2. Designación de Clase

La designación elegida como: “II ●Hull ●MC 5 IN (0,6) (-) Passenger Vessel”, es designada de acuerdo con la NR 217 Pt. A, Ch1, Sec. 2. Los tipos de notaciones de clase, respectivamente asignadas a una embarcación, son las siguientes:

- Carácter de construcción;
- Carácter de la clase y del cumplimiento con las Reglas
- Carácter del período de vigencia de la clase
- Carácter del rango de navegación;
- Carácter de los equipos;
- Notaciones de tipo y servicio con características adicionales de servicios, según sea aplicable; y
- Notaciones adicionales de clase (opcional)

A continuación, detallaremos el significado de esta notación, a través de las Tablas 3.1-3.2

Tabla 3.1.- Casco y Maquinaria – Forma de Inspección y Certificación

Componente	Carácter	Requisito de la Regla
Casco	☒	Embarcaciones construidas bajo supervisión de la Sociedad y con certificación de partes y materiales en conformidad con las Reglas.
	☒	Embarcaciones construidas bajo supervisión de otra Sociedad de clasificación y a las que les hayan asignado una clase equivalente a las Reglas de Clase de la Sociedad.
	●	Embarcaciones construidas bajo supervisión de la Sociedad en conformidad con las Reglas pero, por ejemplo, sin inspección de la Sociedad de sus componentes y materiales, los cuales sin embargo han sido considerados aceptables. Es la responsabilidad del Astillero de construcción, del Armador o del Tercero interesado asegurar que los materiales y equipos utilizados en la construcción de la embarcación cumplan satisfactoriamente con los requerimientos de las Reglas. Dependiendo de las condiciones particulares o de notaciones de la embarcación, la inspección de los materiales y componentes por la Sociedad puede ser requerida para servicios esenciales.
	●	En caso de admisión a la clase o clasificación después de la construcción de embarcaciones no clasificadas.
Maquinaria	☒, etc	Los mismos caracteres utilizados por MC.

Fuente: NR 217 Pt. A, Ch. 1, Sec. 2, pág. 23.

Tabla 3.2.- Cumplimiento de las Reglas, período de clase y equipos

Carácter	Descripción
Caracteres de clase y cumplimiento con las Reglas	
I	Para embarcaciones que cumplan con los requerimientos de construcción y escantillado.
II	Para embarcaciones que no cumplan completamente con los requerimientos de construcción y escantillado pero que, sin embargo, sean consideradas aceptables para ser ingresadas en el Registro de embarcaciones.
Caracteres del período de clase (p)	
3 , 5	Estos caracteres, siguiendo el carácter de clase, indican la duración del período de clase en años.
Carácter de equipo	
Z	Cuando las anclas y cables de cadena de la embarcación cumplen con los requerimientos aplicables de las Reglas.
(Z)	El carácter Z es reemplazado por (Z) cuando los equipos de la embarcación no cumplen totalmente con los requerimientos de las Reglas, pero a pesar de esto, son considerados aceptables para el servicio propuesto. Se hará una referencia en el certificado de clase sobre el cumplimiento de los equipos con otras Regulaciones o estándares reconocidos tales como la Directiva Europea o la Resolución 61 de la UNECE.
(-)	Cuando la Sociedad considere que no le corresponde emitir una opinión sobre los equipos con respecto a las condiciones particulares.

Fuente: NR 217 Pt. A, Ch. 1, Sec. 2, pág. 23.

3.2. PERFIL DE MISIÓN Y ENFOQUE CONCEPTUAL

3.2.1. Perfil Operativo

Esta embarcación fluvial tipo Catamarán, denominada E/F Amazon 130 KW⁶⁷, será diseñada para el transporte de pasajeros para cubrir las rutas dentro de la zona de operación desde el puerto de Iquitos hasta la Reserva Pacaya Samiria, distante unos 231 kilómetros, recalando en puertos intermedios, con el confort y seguridad de una embarcación de recreo permitiendo el desarrollo del turismo interno y contacto vivencial.

La alimentación principal de la nave será mediante energía solar, paneles fotovoltaicos, baterías y recarga en puerto. Además, debe contar con un sistema de emergencia que permita alimentar la demanda energética en cualquier condición.

3.2.2. Zona de Operación

Se pretende cubrir la ruta principal Iquitos - Reserva Pacaya Samiria / Reserva Pacaya Samiria –Iquitos. Recorriendo el Amazonas y la reserva en un viaje con un régimen de navegación de 4-5 horas por día.

La zona de operación estará conformada por los puertos intermedios, poblados, zonas de exploración y otros, desde el puerto de Iquitos hasta la reserva, acorde a la autonomía de la embarcación.

3.2.3. Rutas de Operación

El viaje consta de (01) ruta principal y (05) rutas intermedias para permitir en turismo vivencial y tiempo en contacto con la población y naturaleza.

⁶⁷ El tipo de embarcación será detallada en 3.5 y 3.6, en la selección del tipo de embarcación y generación de líneas de forma.

3.2.3.1. Ruta Principal

Constituye la ruta de diseño principal desde Iquitos hacia la reserva Nacional Pacaya - Samiria.

- Terminal Portuario de Iquitos: 3°43'44"S 73°14'24"O
- Reserva nacional Pacaya-Samiria: 5°15'00"S 74°40'00"O
- Distancia geográfica longitudinal: 554,613.3 pies <> 169,046.15 m
- Distancia geográfica planar: 759,886.014 pies <> 231,613.26 m
- Distancia geográfica esferoidal: 759,871.639 pies <> 231,608.88 m



Figura 3.1.- Mapa de la Reserva Pacaya-Samiria en la región de Loreto

Fuente: Vásquez, Urcia, Biot y Sbrizza 2013⁶⁸

⁶⁸ Imágenes y esquemas tomados de :
https://www.openstarts.units.it/dspace/bitstream/10077/8825/1/16_Vasquez_et_al.pdf

3.2.3.2. Rutas Intermedias

Constituyen las rutas secundarias afines al propósito del buque y desarrollan el turismo interno de carácter vivencial.

- Iquitos Nauta / Pueblo de Solterito
- Pueblo Indígena De Solteritos / Rio Marañón / Comunidad 20 de Enero / Pacaya-Samiria
- Rio Ucayali - Comunidad San José
- Poblado de Jaldar - Rio Yarapa / Comunidad de Tapira
- Pueblo de Tamshyacu / Iquitos Nauta

Debemos precisar que la ruta principal constituye el destino final, mientras que las rutas intermedias serán paraderos de un día, los cuales permitirán al turista compartir con los nativos y las comunidades del lugar antes de pasar al siguiente puerto o lugar. Cada puerto, comunidad o poblado de la ruta intermedia se encuentra en una radio de 4 horas de navegación a velocidad de crucero.

3.2.4. Autonomía

La embarcación tendrá una autonomía a través de baterías y medios fotovoltaicos, recarga en puerto y respaldo de Generadores de emergencia, que le permitan desarrollar un tiempo estimado de 24 horas efectivas de navegación, de modo que pueda realizar la ruta principal, inclusive sin el uso de otros medios de respaldo.

La embarcación navegará 4-5 horas/día, en condiciones normales de operación, realizando desembarque de pasajeros en los puertos intermedios y retomando actividades al día siguiente. Durante la navegación no se permitirá descargas de aguas grises o negras, solo se permitirá recarga eléctrica y desembarco de pasajeros. Por ello, los cálculos de autonomía en agua dulce, grises y otros deben considerar esto.

3.2.5. Tripulación

La tripulación consta de 15 tripulantes, que conforman el personal de navegación, de servicio y sobre cubierta.

- **Personal de navegación.** - Conformado por primer piloto, segundo piloto, Ingeniero de Máquinas y un técnico.
- **Personal de servicio.** - Constituido por un cocinero, un ayudante de cocina, 03 Recepcionista (funciones varias), 02 Guía turístico como Traductores y un doctor.
- **Personal de sobre cubierta.** - 03 Marineros de cubierta (funciones varias).

3.2.6. Capacidad de Pasajeros

La acomodación provee el espacio suficiente para transportar 50 personas, además de la tripulación, provisiones y equipaje.

3.2.7. Velocidad de Servicio

La embarcación será diseñada para desarrollar una velocidad mínima de crucero igual a 6 nudos en aguas tranquilas.

3.2.8. Alimentación

La potencia será suministrada por acumuladores, baterías, paneles solares, generadores para servicios y motores eléctricos. Debe contar con un respaldo energético en caso de condiciones desfavorables como medida de seguridad, por lo que se considerará una red de 24V/CC y una de 220V/CA.

3.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

3.3.1. Materiales

La embarcación fluvial puede ser construida en diversos materiales como: acero, aluminio, madera recubierta de fibra de vidrio, resina epoxi, compuestos de fibras con materiales sintéticos, etc. En el caso de embarcaciones solares, debemos elegir uno que proporcione la mejor relación de peso posible.

Para una misma embarcación fluvial de tipo catamarán, se tiene la siguiente relación de pesos según el tipo de material elegido.

Tabla 3.3.- Relación de peso / material elegido

Relación de pesos con el tipo de material elegido⁶⁹				
Tipo de material	Densidad (kg/m³)	Volumen de Material (m³)	Peso (kg)	Relación de Peso (%)
Acero	7850	0.264	2069.6	100%
Aluminio	2700	0.298	798.6	39%
Madera / Fibra	680	1.553	1055.9	51%
PVC - Fibra	1500	0.663	994.9	48%

Fuente: Elaboración Propia.

Como se observa el aluminio presenta una mejor relación de pesos por lo cual será tomado en cuenta para definir nuestra estructuración. La Tabla 3.4 muestra el material seleccionado para cada espacio.

⁶⁹ De acuerdo con un diseño a escala (1/50) para un catamarán estándar.

Tabla 3.4.- Materiales seleccionados

Ítem	Material Designado	Acabado
Casco y estructuras	Aluminio 5083 – H111 ⁷⁰	Recubrimiento Epóxico, acabado mate y/o brillante.
Superestructura y Perfiles		
Superestructura Mamparos exteriores		
Superestructura Mamparos interiores	Fibra de Vidrio, Cuero, Madera (tornillo, cedro, drywall, etc.)	Ebanistería de lujo, confort de crucero.
Superestructura Acomodación		

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.2. Servicios Generales

3.3.2.1. Ventilación y Aire Acondicionado

Para los espacios cerrados para pasajeros (Sala de pasajeros, descanso, etc.), excepto pañoles o espacio bajo cubierta principal, se instalará, de ser factible, un sistema climatizador, para el control de temperatura de 21-23°C y 90% H.R. o un sistema de ventiladores.

3.3.2.2. Aislamiento Térmico y Acústico

- El aislamiento será incombustible, no producirá humos tóxicos.
- Se dispondrá en las áreas de pasajeros y sala de máquinas y áreas que colinden al exterior.
- El aislamiento térmico será de lana de vidrio recubierto con panel acústico.

⁷⁰ Propiedades mecánicas ver en los anexos.

- Los cielos falsos tendrán paneles de material absorbente de ruido (como la marca DAMPA o similar).
- Se requerirá material aislante para circuitos, maquinarias y uniones de cañerías.

3.3.3. Accesorios de Cubierta

3.3.3.1. Bitas y Cornamusas

- Se instalarán por lo menos 8 bitas dobles, cuatro por banda de 114.3 mm de diámetro nominal, para el amarre a puerto.
- Las cornamusas (mínimo 06) serán instaladas para trincar defensas del casco al costado.

3.3.3.2. Pasamanos y Barandas

- Barandas de aluminio de 0.9 m de alto (min) alrededor de cubierta.
- Se dispondrán barandas en pasadizos, escaleras y accesos.

3.3.3.3. Escotillas de Cubierta

- Las escotillas serán con cierre hermético y de tipo estanco.
- Todas las escotillas serán abisagradas.
- Los espacios de maquinaria principal, auxiliar y espacios interiores en áreas de tránsito serán de tapas rasantes.
- Las escotillas serán ubicadas de acuerdo a la disposición general, con un tamaño estándar.

3.3.3.4. Ventanas y Claraboyas

- Se dispondrán de ventanas a lo largo de todo el buque de acuerdo a la disposición general, para ofrecer una vista panorámica.
- Las ventanas destinadas a los pasajeros serán abatibles y/o en corrediza de acuerdo a la disposición general.
- Se instalarán claraboyas de 200 mm de diámetro, según sea necesario.

3.3.3.5. Mástil Principal

- Se construirá en aluminio, se colocará en el techo del puente de mando.
- Poseerá las antenas, radares, luces de posición, drizas para la bandera del buque.
- El mástil principal no será demasiado grande, para evitar el factor de sombra en los paneles de la cubierta de superestructura.

3.3.4. Equipos de Comunicación y Navegación

3.3.4.1. Girocompás y Compas Magnético

- Se instalará un girocompás con doble repetidor azimutal en el techo de la cubierta y un repetidor análogo en la consola de puente de mando.⁷¹
- En el puente irá un compás magnético, con iluminación propia con regulación (dimmer).⁷²
- Los dispositivos se ubicarán en puente de mando.

3.3.4.2. Anemómetro

- En el puente de Gobierno se instalará un anemómetro con indicador de velocidad y dirección del viento.⁷³
- Los modelos, rango de operación, detalles de instalación y otros serán de acuerdo a la necesidad del buque.

3.3.4.3. Corredera

- Corredora para medir velocidad hasta 93 km/50 nudos/58 mph, con indicación de distancia total o parcial. Variación de velocidad y pantalla LCD.

⁷¹ Similar al modelo Anschutz STD-20, RAYTHEON.

⁷² Similar al modelo Merkur SF, C. PLATH.

⁷³ Similar al ST 60 modelo A 22.012 Plus, RAYTHEON.

3.3.4.4. Radares

- Se instalará un radar principal, ecosonda con pantalla multifunción de alta definición, con alcance de 12 millas.
- Como respaldo se instalará un radar adicional, y potencia de transmisión de 1.5 kW, de similar alcance.

3.3.4.5. Navegador GPS

- Navegador instalado en el puente de mando con interfase amigable de 24 VCC.

3.3.4.6. Radio VHF/ HF/ VHF Portátil

- Equipo transceptor VHF waterproof, con scanner de alta prioridad, función dual y triescucha simultánea, con antena canales de acceso directo.
- La radio portátil VHF poseerá por lo menos 16 canales.
- Radio HF, transceptor HF/SBB de 150 Watts de potencia.

3.3.4.7. Fax Meteorológico

- Se instalará un fax meteorológico para recibir cartas meteorológicas en el puente de mando.

3.3.5. Equipos de Salvataje e Incendio

El equipamiento mínimo deseable para salvataje estará conformado por:

- 06 botes inflables salvavidas de 12 personas cada una, con tela de poliuretano, de tipo RFD o similar.
- 70 chalecos salvavidas (55 adultos y 15 niños)
- 12 cohetes de Señales

- 06 aros salvavidas, con rabiza flotante blanca, señal fumígena, luces de encendido automático con estándar SOLAS.

El equipamiento contraincendios constará de extintores, un sistema de rociadores y detectores de humo en los pasillos y acomodaciones, además de sistema de alarmas.

Los rociadores de agua y detectores de humo estarán a lo largo de las acomodaciones y pasillos.

Se colocará extintores PQS en los siguientes lugares:

- Sala de Máquinas: 02 unidades PQS 10 libras.
- Pasillo de Cocina: 02 unidades PQS 5 libras.
- Pasillo de acomodaciones Cubierta Principales: 02 unidades PQS 5 libras.
- Puente de gobierno: 01 unidad PQS 5 libras.

3.4. CONSIDERACIONES ESPECIALES

3.4.1. Limitantes Propulsivas

Entre las principales se debe considerar:

- Calado restringido en época vaciante de 4 pies (1.2 m), en malos pasos.
- Trayecto sinuoso de la ruta.
- Maniobrabilidad Restringida.

3.4.2. Limitantes Energéticas

La autonomía será provista por los paneles solares, teniéndose en especial consideración:

- El índice de radiación
- Angulo de incidencia
- Clima

- Horas disponibles de radiación solar
- Almacenamiento de energía - baterías
- Motor eléctrico por seleccionar

3.5. DIMENSIONES PRINCIPALES

Un proyecto naval implica el diseño del casco desde la perspectiva del arquitecto naval, considerando los espacios necesarios para los pasajeros, acomodación, maquinarias, estabilidad, resistencia al avance y otros con la arquitectura de las formas. Es por ello que, no solo la elección de las dimensiones principales tiene considerable importancia, también lo son las líneas de forma y las implicaciones de estas en el buque.

El estudio del casco a partir de las dimensiones principales propone determinar las líneas de forma, las características hidrostáticas, brazos adrizantes, compartimentado (esloras inundables y espacios de acomodación) y resistencia al avance de la embarcación para garantizar que el nuevo proyecto cumpla con los objetivos de diseño, es decir los requerimientos. Para poder determinar las dimensiones adecuadas que cumplan con los requerimientos planteados, debemos determinar los espacios necesarios para los pasajeros, los espacios disponibles para ubicar los paneles solares, los espacios complementarios para acomodación y los sistemas del buque como variables importantes.

El siguiente cuadro nos da una idea del proceso a seguir para determinar las dimensiones principales.

Tabla 3.5.- Proceso para la selección de las dimensiones principales

ETAPA	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	PARÁMETROS OBJETIVOS
1	Cálculo de área de Cubierta	Acomodación
		Energía Solar
		Otros espacios
2	Eslora	Volumen Requerido
		Hidrodinámica
3	Manga del Patín	Tamaño del motor
		Potencia
		Velocidad
4	Manga del Buque	Fenómenos de Interacción entre cascos
		Resistencia Estructural
5	Volumen necesario de los patines	Cámara de Maquinas
		Tanques Varios
		Baterías
6	Puntal	Cámara de Máquinas
		Tanques Varios
		Propulsión
7	Pesos	Rosca
		Pasajeros
		Carga
		Otras cargas
8	Coeficientes de Forma	Cb, Cp, Cm, Cf, etc.
9	Calado	Profundidad de río
		Creciente/vacante
DIMENSIONES PRINCIPALES INICIALES		

Fuente: Elaboración Propia.

3.5.1. Requisitos de Diseño

Antes de empezar a calcular, veamos rápidamente los requisitos de nuestra embarcación, tomando como base los modelos de embarcaciones solares más representativas, las restricciones del medio y una evaluación rápida de la potencia requerida para catamaranes similares.⁷⁴

Tabla 3.6.- Requerimientos del diseño

REQUERIMIENTOS DE LA EMBARCACIÓN	
Construcción de la nave, buque o embarcación	
Tipo de Nave	Catamarán / embarcación ligera
Material de construcción	Aluminio/fibra de vidrio /madera/otros
Acabado/otros	estándar de Pasajeros
Prestaciones	
Aforo	50 pasajeros
Tripulación	15
Velocidad de crucero	8-10 km/hr /6 kn
Velocidad Máxima	12-15 km/hr/9 kn
Autonomía Máxima	50 km / 5 hrs diarias
Dimensiones	
Eslora	> 22 m
Manga	> 8 m
Puntal	> 1.5 m
Calado en Rosca	< 0.8 m
Caldo a máxima carga	< 1.2 m
Datos para el sistema de Energía Solar	
Generador solar promedio	> 60 kWp
Consumo Promedio Total	< 320 kWh
Tensión de trabajo	12-24-72/350 V – CC/CA
Banco de baterías	1.5 Cap. consumo Máximo/ Reserva
Propulsión	2 motores Eléctricos de > 60 kW - DC
Generador de Emergencia	2 generadores Diésel de > 50 kW

Fuente: Elaboración Propia.

⁷⁴ Los datos presentados, recogen varias observaciones de los modelos actuales de catamaranes solares como el Planet Solar, Ecosol, Solemar y otros de características similares.

Además, debemos tener en cuenta algunas consideraciones constructivas y tecnológicas, como las siguientes:

- La cubierta superior de la embarcación que protegerá a los pasajeros y a la tripulación de la intemperie (sol y lluvia) será el alojamiento de los paneles solares fotovoltaicos.
- Las baterías de acumuladores se ubicarán en la parte inferior de la embarcación dentro del casco, de modo que puedan quedar apartadas del área donde viajan los pasajeros.
- Los motores irán alojados dentro del casco, quedando integrados en el interior de la embarcación.
- Las baterías serán de tipo estacionario de descarga con ciclo profundo. Para su elección se buscará un tipo de acumulador que tenga bajos niveles de mantenimiento y una buena relación peso/potencia. Se descartarán las tecnologías ambientalmente negativas.
- Los motores contarán con un sistema electrónico de regulación, que permite variar su velocidad y ofrezcan la posibilidad de invertir el sentido de giro.
- En caso de necesidad, es decir con tiempo nublado y con uso prolongado de la embarcación, las baterías podrán ser cargadas mediante un cargador conectado a la red eléctrica, mientras que la embarcación se encuentra en el puerto.
- Si por algún motivo las fuentes eléctricas de energía se agotasen, dispone de un sistema de propulsión de emergencia mediante generadores eléctricos diésel.

3.5.1.1. Área de Pasajeros Requerida

El área de pasajeros requerida será calculada tomando como referencia, el área mínima de un pasajero sentado típico de los buques de pasaje PAX, se tiene:

$$A_{PR} = \#_{pasajeros} \times A_{min/pasajero} (m^2) \quad (3.1)$$

$$A_{PR} = 50 \times 1.5 m^2$$

$$A_{PR} = 75 \text{ m}^2$$

Por ser una embarcación de pasaje la embarcación debe tener:

- Espacios Públicos, alrededor del 10% del área total
- Pasillos y servicios, alrededor del 4 – 5 % del área total

Entonces, el área designada para los espacios públicos, pasillos y servicios será del 15% del área total de la cubierta.

Si consideramos el área total de la cubierta como un cuadrilátero de dimensiones L y B, siendo L la eslora y, B la manga total de la embarcación.

$$A_{TC} = L \times B \text{ m}^2 \quad (3.2)$$

Siendo, el área disponible para toda la acomodación la diferencia entre el área total de la cubierta, con el área para pasajeros y los espacios públicos, pasillos y servicios. Entonces el área disponible que nos quedaría sería:

$$A_{TC \text{ disponible}} = 85 \% L \times B - 75 \text{ m}^2 \quad (3.3)$$

Los camarotes, y espacios para la tripulación como alojamientos no están considerados dentro del perfil de misión.

3.5.1.2. Área de Captación Solar Requerida

Preliminarmente, debemos garantizar que la cubierta de la superestructura sea capaz de tener un área suficiente para captar la energía solar. Aunque no existe una formula específica, desarrollada para este cálculo, podemos inferirla.

Siendo A_{TCS} , el área de la cubierta de la superestructura de la misma dimensión que el área de la cubierta principal (A_{TC}), y el índice de radiación solar en promedio en la zona geográfica de las rutas, que corresponde con la ubicación del puerto de Iquitos y la reserva Nacional de Pacaya-Samiria (con un índice de radiación solar promedio anual de 4.56 kWh/m²/día y 4.6 kWh/m²/día respectivamente), de 4.58 kWh/m²/día, podemos relacionar preliminarmente,

la cantidad de energía producida, y la potencia aproximada de la planta a instalar para una embarcación solar parecida, a través de la siguiente expresión:

$$E \text{ (kWh)} = P \text{ (kWp)} \cdot A_{t_{sol}}(h) \quad (3.4)$$

$$E \text{ (kWh)} = 60 \times 4.58 = 274.8 \text{ kWh}$$

Considerando un panel solar con 345 W, y el tiempo de captación solar disponible de al menos 4 horas.

$$\text{Número de Paneles} = \frac{274 \text{ kWh}}{345 \text{ W} \times 4h} \approx 200 \text{ Paneles} \quad (3.5)$$

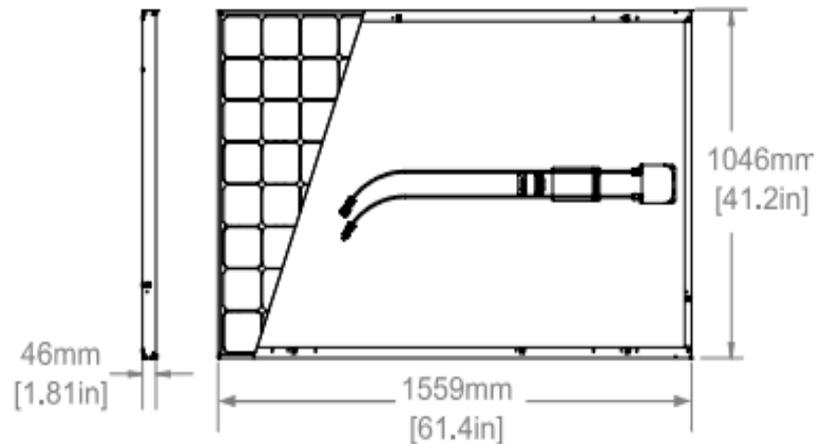


Figura 3.2.- Panel solar fotovoltaico - SUNPOWER X21-345

Fuente: Imagen disponible en Internet.

Entonces, el área que ocupa cada panel será:

$$A_{panel} = 1.559 \times 1.046 = 1.63 \text{ m}^2 \quad (3.6)$$

Por tanto, el área necesaria preliminarmente, para la instalación de una planta solar que genere al menos 60kWp será:

$$A_{Total \text{ de paneles}} = 1.63 \text{ m}^2 \times 200 = 326 \text{ m}^2 \quad (3.7)$$

Si el área total de la cubierta principal es igual, al menos, área de la cubierta de la superestructura, entonces:

$$A_{TCS} = A_{TC} = L \times B \text{ m}^2 \quad (3.8)$$

$$A_{TC} = 326 \text{ m}^2$$

$$L \times B = 326 \text{ m}^2$$

Entonces, el área disponible para el resto de las acomodaciones en la cubierta principal queda expresada como:

$$A_{TC \text{ disponible}} = 85 \% L \times B - 75 \text{ m}^2 \quad (3.9)$$

$$A_{TC \text{ disponible}} = 202 \text{ m}^2$$

Siendo el área para espacios públicos⁷⁵, alrededor del 10% del área total (32.6 m²) y el área para pasillos y servicios, alrededor del 4 – 5 % del área total (13-16.3 m²).

3.5.1.3. Espacios complementarios

Las dimensiones principales, cubiertas y niveles deben garantizar los siguientes espacios, afín de dotar de un confort adecuado a la tripulación y pasajeros:

- Área de Pasajeros: 1.5 m² /por persona
- Área de Recepción: 4.4 m²
- Área de Cocina: 6.4 m²
- Área de Baños: 5 m² /por persona y lavamanos
- Pasadizos: 1 m.
- Escaleras: 0.45 m² , con pasos de 0.25 m

⁷⁵ El área de espacios públicos está condicionada por el tiempo de viaje y el perfil de la misión. Para embarcaciones pequeñas y de recorrido menor a 1 día, no es una prioridad.

Estos espacios complementarios serán tomados en cuenta en la elaboración del plano de disposición general.

3.5.2. Relaciones Geométricas

De acuerdo con la base de datos encontrada de varios catamaranes⁷⁶, se tiene siguiente tabla.

Tabla 3.7.- Base de datos para Regresión Lineal

DATA REPRESENTATIVA				
NOMBRE	Lpp	B	D	T
Masterpiece	11.4	4.5	1.9	0.6
Athena	27.1	9.1	3.65	1.47
Peralta	32.6	10	2.86	1.4
Seastreak New Jersey	37.9	10.45	3.77	1.56
Salacia	41	11.9	4.37	1.75
Catalina Jet	39.7	11.9	4.11	1.65
Klondike Express II	36.3	10.35	3.38	1.8
Voyager III	30.1	9.22	3.0	1.25
Aurora	34	9.95	3.6	1.88
CB1	32.3	12	3.5	1.79
Yankee Freedom II	25.7	9.1	3.3	1.74
Damen Fast Ferry 3007	31.3	7.7	2.4	1.4
Damen Fast Ferry 3207	33.64	7.6	2.4	1.65
Incat Crowther	26.8	8.75	----	1.12
Bahía Cádiz Cuatro	25.8	8	2.7	
MS Tûranor Planet Solar	31	15	---	----

Fuente: Elaboración Propia.⁷⁷

⁷⁶ La data presentada es la más parecida a nuestro proyecto, tanto en perfil de misión como en relaciones geométricas.

⁷⁷ Datos tomados de “Diseño de un catamarán para aguas abrigadas”, Roque Velasco Sopranis, ETSIN (2010)

La lista presentada muestra embarcaciones similares que se dedican al transporte de pasajeros, de los cuales, las últimas han sido diseñadas para ríos y transporte en aguas restringidas. La gran mayoría usan motores diésel o combinados, con velocidades de operación > 18 kn, a excepción del MS Tûranor Planet Solar⁷⁸, que realiza navegación internacional y es completamente solar.

Como se observa en la Tabla 3.8, las relaciones geométricas se mantienen dentro de un rango $2 < L_{pp}/B < 4.5$, $2.2 < B/D < 3.5$ y $5 < B/T < 7.9$.

Tabla 3.8.- Relaciones geométricas

RELACIONES GEOMETRICAS			
NOMBRE	L_{pp}/B	B/D	B/T
Masterpiece	2.533	2.368	7.5
Athena	2.978	2.493	6.19
Peralta	3.26	3.497	7.143
Seastreak New Jersey	3.627	2.772	6.699
Salacia	3.445	2.723	6.8
Catalina Jet	3.336	2.895	7.212
Klondike Express II	3.507	3.062	5.75
Voyager III	3.265	3.073	7.376
Aurora	3.417	2.764	5.293
CB1	2.692	3.429	6.704
Yankee Freedom II	2.824	2.758	5.23
Damen Fast Ferry 3007	4.065	3.208	5.5
Damen Fast Ferry 3207	4.426	3.167	4.606
Incat Crowther	3.063		7.813
Bahía Cádiz Cuatro	3.225	2.963	
MS Tûranor Planet Solar	2.067		

Fuente: Elaboración Propia⁷⁹

⁷⁸ Esta embarcación será nuestro modelo para delimitar las dimensiones principales, planta energética, potencia, etc.

⁷⁹ Datos tomados de “Diseño de un catamarán para aguas abrigadas”, Roque Velasco Sopranis, ETSIN (2010)

3.5.2.1. Regresiones lineales

Las regresiones lineales realizadas nos muestran las relaciones obtenidas para eslora/manga y manga/ puntal como se muestra en la Figura 3.3.

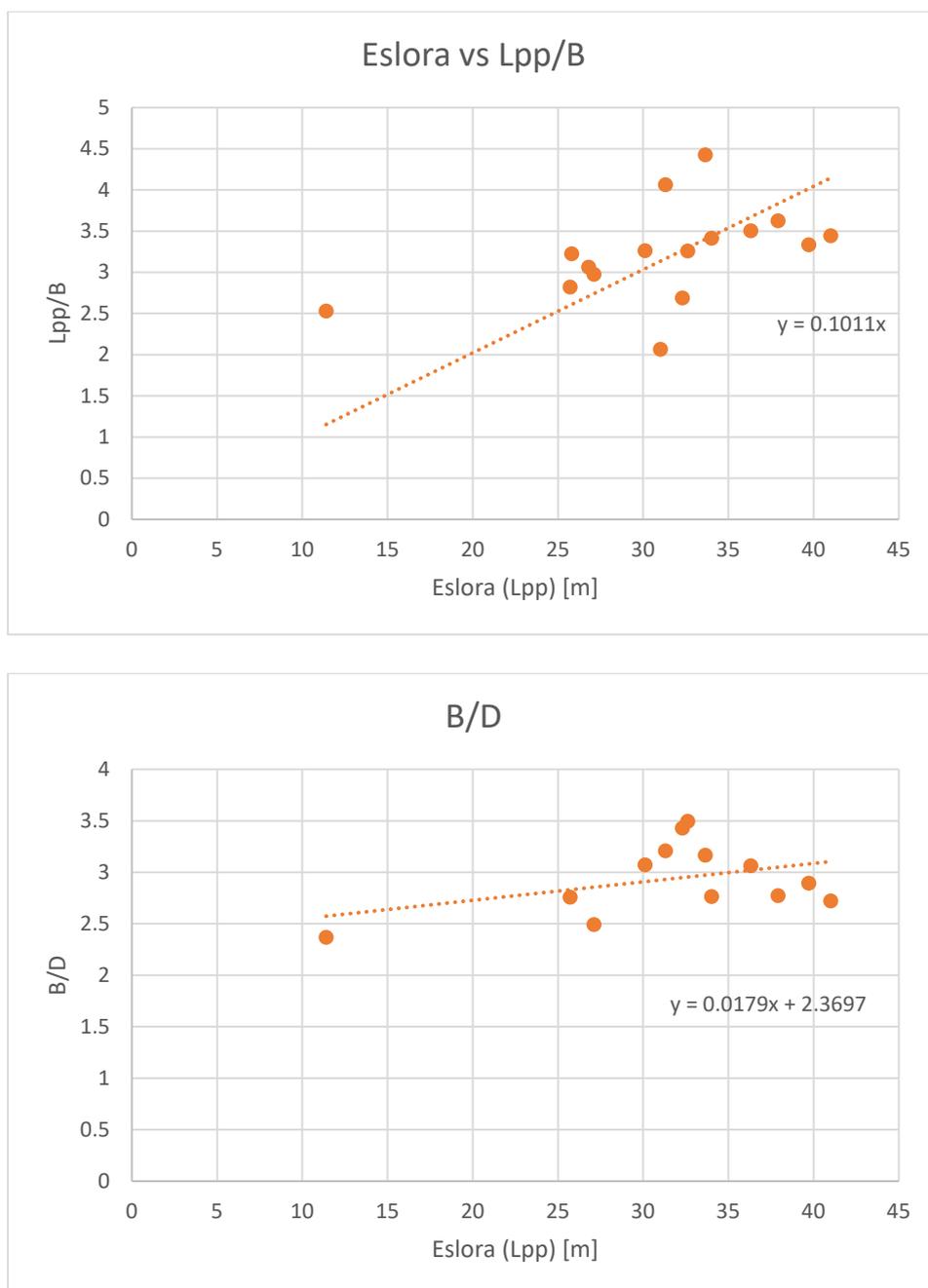


Figura 3.3.- Regresión Lineal

Fuente: Elaboración Propia

De este modo, para una eslora de 30 m, se tendría que optar por una manga de al menos 10 m, con un puntal de casi 3 m, aunque estas medidas tendríamos que ajustarlas a las series y ver si satisfacen los objetivos que nos hemos propuesto.

3.5.2.2. Relaciones Geométricas de la Serie

Se ha seleccionado una serie geométrica con cascos simétricos, debido a que presentan mejores resultados hidrodinámicos:

- En algunos casos se ha conseguido con cascos asimétricos que el incremento de resistencia al avance debido a las interferencias entre cascos fuera menor que en el caso de cascos simétricos, pero aún no se conoce con certeza como debe ser el diseño para conseguir este efecto.
- La fabricación de cascos simétricos es mucho más fácil y barata, ya que de un único molde podemos sacar los dos patines, obteniendo un ahorro en tiempo.
- La mayoría de los autores recomiendan trabajar con cascos simétricos, ya que el estudio de los fenómenos de interferencia se encuentra mucho más avanzado, y desarrollado para este tipo.
- Los cascos asimétricos presentan menores interferencias, pero por lo general requieren de amplias cubiertas. Esta situación hace que la manga de estos buques sea muy grande lo que minimiza el efecto de la interferencia entre los cascos, pero complica su operatividad en ciertos puertos y con mayores complicaciones en trayectos sinuosos.⁸⁰

Una de las series con mejores resultados hidrodinámicos es la estudiada por los investigadores Sahoo, Browne y Salas (2004), similar a la estudiada por

⁸⁰ De acuerdo con los trabajos de E.O.Tuck, L. Lazauskas : “Optimum Hull Spacing of family of Multihulls” (1998) y Zaraphonitis, G., Spanos, D., Papanikolaou, A.: “Numerical and Experimental study on the water resistance of fast displacement asymmetric catamarans”, Hamburg: Hamburg University (2001).

Molland y con formas muy parecidas a las desarrolladas por la universidad de Southampton.

Tabla 3.9.- Relaciones geométricas - Serie Sahoo, Browne y Salas

Modelo	1	2	3	4	5	6	7
L/B	15,00	15,00	15,00	15,00	12,50	12,50	10,00
B/T	1,50	1,50	2,50	2,50	1,50	2,50	2,50
C_B	0,40	0,45	0,50	0,40	0,45	0,45	0,45
$L/\nabla^{1/3}$	9,45	9,08	10,40	11,20	8,04	9,54	8,22

Fuente: María Martín Martínez (2016)

Además, cubre un rango de $0.2 < Fr < 1.0$, $0.2 < S/L < 1.0$ y un coeficiente de bloque aproximado al nuestro.

Al relacionar los resultados de la regresión lineal y ajustarlas con las relaciones geométricas de la serie, las dimensiones preliminares de nuestra embarcación estarían dentro del rango que muestra la Tabla 3.10.

Tabla 3.10.- Rango de relaciones geométricas preliminares

RANGO DE RELACIONES GEOMETRICAS	
CARACTERÍSTICA	RANGO
Eslora	<27-34>
Manga Total	<9.5-12>
Puntal	<2.2-3.4>
Manga del patín (b)	> 2.2
L/b	> 11.9
b/T	> 2.1
C_b	<0.35 – 0.5>
$L/\nabla^{1/3}$	> 8.8
S/L	<0.2,0.4>

Fuente: Elaboración Propia.

3.5.3. Cálculo de los Patines

Para poder definir las dimensiones principales, debemos establecer las dimensiones del patín o monocasco del catamarán, con estos datos podemos seleccionar las dimensiones y garantizar los espacios asignados.

Los requisitos para el dimensionado del patín o monocasco son:

- Dar empuje suficiente a las cargas y espacios para pasajeros ubicados en la cubierta principal y superestructura.
- Ofrecer una resistencia al avance suficientemente baja para poder alcanzar una velocidad adecuada.
- Tener un comportamiento hidrodinámico adecuado.
- Tener un volumen suficiente para alojar los motores, generadores tanques, entre otros.

3.5.3.1. Eslora

Para determina la eslora de la embarcación, consideremos el límite hidrodinámico de la serie para embarcaciones de desplazamiento y semidesplazamiento, a través del número de Froude:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} < 0.4 \quad (3.10)$$

Donde:

- V, es la velocidad en m/s
- L, es la eslora de la embarcación.

La mayoría de las embarcaciones similares posee esloras entre 28 – 34 m, si consideramos una eslora promedio de 30 m, el número de Froude seria:

$$Fr = \frac{10 \cdot 0.514}{\sqrt{9.81 \cdot 30}} = 0.3 < 0.4 \quad (3.11)$$

De este modo, tendríamos una eslora de 30 m que permitiría al casco desarrollar velocidades mayores, sin salir del rango de aplicación de la serie sistemática.

Al considerar el rango de velocidades disponible de nuestra embarcación (de 6-10 kn), el número de Froude tendría el siguiente rango:

$$0.18 < Fr = \frac{V \cdot 0.514}{\sqrt{9.81 \cdot 30}} < 0.3 \quad (3.12)$$

3.5.3.2. Manga del patín

La ventaja del catamarán frente al monocasco, en lo que a resistencia al avance se refiere, se muestra al poder repartir su obra viva en dos cascos diferentes, estos pueden ser mucho más esbeltos y ofrecer así menor resistencia al avance que el monocasco de capacidad equivalente, por otro lado, la estabilidad transversal también mejora enormemente, por eso, se deben diseñar los patines tan estrechos o delgados como sea posible.

La limitación principal es que en el interior de este casco ha de haber suficiente espacio para las distintas zonas y equipos que en él se alojaran. En este proyecto estas zonas serán: cámara de máquinas y tanques. Los tanques se pueden adaptar fácilmente a cualquier espacio que sobre dentro de los cascos. Sin embargo, en la cámara de máquinas, el motor principal debe entrar en la posición adecuada, y esto obliga a tener manga suficiente para el motor y haya un espacio suficiente para que los técnicos de mantenimiento y operarios de máquinas puedan acceder a sus diferentes partes. Se debe conocer, o al menos referenciar, cuáles pueden ser las dimensiones del motor a instalar y sus complementos.

En la Tabla 3.11, se puede observar que los motores eléctricos son de dimensiones pequeñas, generalmente tienen dimensiones que varían entre 1.4

– 1.5 m de largo, 0.7 - 0.9 m de ancho y 1 – 1.1 m de alto⁸¹, para potencias entre 100-150 kW.

Los tanques de agua dulce, aguas grises y aguas negras generalmente son menores a 5 m³, y no mayores a 1.5 m en sentido transversal.

Los generadores de emergencia que tendrá la embarcación poseen dimensiones entre 0.8 – 0.9 m de ancho, para potencias menores a 200 kW, mientras que los tanques de combustible, usados para emergencia, no serán mayores a 1m³.

Tabla 3.11.- Dimensiones típicas de posibles equipos a instalar

DIMENSIONES DE EQUIPOS			
EQUIPO	LARGO	ANCHO	ALTO
Dc motor Size 250 [121-436 kW]	1.42	0.765	1.03
	1.52	0.765	1.03
Dc motor Size 280 [170-510 kW]	1.50	0.825	1.09
	1.61	0.825	1.09
Generador Cat [85-190 kW]	2.26	0.820	1.20
	2.35	0.970	1.50

Fuente: Elaboración Propia.

Ahora, hay que considerar que por cada monocasco debe pasar al menos una persona, la distancia prudencial de refuerzos, revestimientos, entre otros que puedan colocarse.

Para tener una distancia prudencial, consideramos 1 m para ambos lados, de este modo la manga del patín debe ser de al menos 2.5 m.

⁸¹ De acuerdo con el catálogo de proveedores de Motores eléctricos “Dc motors Siemens”, disponible en internet.

3.5.3.3. Manga Total

Esta dimensión va a depender de la distancia entre patines y del área disponible para los paneles fotovoltaicos, este es el factor clave en el diseño de nuestro catamarán.

La presencia de un casco en las proximidades del otro produce una serie de interferencias entre ambos que suelen traducirse en un incremento en la resistencia al avance del conjunto. La mayoría de los estudios consultados se centran en analizar cual debe de ser la separación entre patines que minimice la mencionada interferencia. Estos estudios nos han indicado que dichas interferencias dependen de las formas del casco, de la separación entre patines y de la velocidad del catamarán. Por estos motivos la distancia óptima es distinta para cada proyecto, y no existen fórmulas que determinen con exactitud esta medida para nuestro proyecto.

Los autores consultados, sobre de la distancia a la cual se deben situar los patines, afirman que para relaciones de $\frac{S}{L}$ mayores que 0.6 parece que las interferencias entre patines disminuyen notablemente.

En nuestro caso, dado que $L = 30$ m, esta relación daría $S = 18$ m, valor que se considera desmesuradamente grande, para una embarcación típica. Considerando que nuestra serie abarca valores de monocascos que comprenden relaciones de $\frac{S}{L}$ entre 0.2 y 0.4, y un rango del número de Froude entre 0.2 y 1, para nuestro caso, la separación entre casco tendría un rango de 6 - 12 m,

Otros autores⁸², hablan de que como mínimo la anchura del túnel entre patines debe ser 1.25 veces la manga del patín. En este caso esto supone un túnel de 3.125 m y una distancia entre crujías $S=5.625$ m, muy parecida a los catamaranes construidos. Debemos tener presente que el valor que se presenta

⁸² De acuerdo con H.B. Moraes, J.M.Vasconcellos y R.G. La Torre: "Wave resistance for high speed catamaran". Ocean engineering - 2004

es un valor mínimo, y que de todos los estudios se deduce que a mayor distancia entre patines menores interferencias.

Ahora, recordando que el área para captación solar es el área de la cubierta de la superestructura, y está definida por:

$$\begin{aligned} A_{TCS} &= L \times B \text{ m}^2 & (3.12) \\ A_{TCS} &= 326 \text{ m}^2 \\ L \times B &= 326 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

La manga total sería aproximadamente de 10.86 m, para una eslora de 30 m, solo tendríamos que agregar algunas distancias propias de la instalación de los paneles, estructuras de soporte y otros, que no harán variar mucho las dimensiones.

En conclusión, dado que el mínimo de distancia recomendada es la misma que poseen los diseños de los ejemplos significativos, y que una distancia mayor reduciría con toda seguridad la resistencia al avance. Se adoptará una distancia entre patines $S = 10$ m, lo cual significa que el catamarán de proyecto tendrá una manga total inicial de $B = 10 + 2.5 = 12.5$ m, suficiente para alojar la cubierta de pasaje, paneles y acomodaciones.

3.5.3.4. Fenómenos Hidrodinámicos

El fenómeno de Splash ocurre cuando la separación entre cascos es pequeña y la velocidad del buque alta. El flujo en el interior del túnel puede sufrir un bloqueo que produce un rápido ascenso del nivel de agua (fenómeno de splash).

El peligro de este fenómeno es que puede llegar a golpear la cubierta. Aunque para nuestro caso, este fenómeno no debe ocurrir con total seguridad, debido a que el Fr para nuestra embarcación es menor a 0.4, siendo este fenómeno de mayor importancia en embarcaciones de planeo.

El número de Froude al cual ocurriría es fenómeno (Frb) puede calcularse según la siguiente expresión:

$$F_{rb} = \sqrt{\frac{10}{\frac{L}{b} \left(\left(\frac{S}{S-C_{pb}} \right)^2 - 1 \right)}} = 1.3 \quad (3.13)$$

Donde:

- L, es la eslora de la embarcación.
- b, es la manga del patín.
- S, Distancia entre las crujías de ambos cascos.
- Cp, es el coeficiente prismático.

Al reemplazar, estos valores con los hasta ahora obtenidos y estimando un Cp de 0.72 (típico), se obtienen un Frb igual a 1.3. Este valor afirma que para el rango de velocidades ($0.2 < Fr < 0.4$), la separación de casco elegida, eslora y manga del patín no ocurrirá este fenómeno.

3.5.3.5. Volumen mínimo del Patín

Para hallar la altura aproximada del patín, debemos considerar la altura de los equipos a instalar y los espacios que ocuparan los refuerzos.

La altura de la Cámara de Maquinas vendrá dada por la suma de la altura del motor más la altura de la bancada, más la altura que hay que dejar por encima del motor para conexiones y otros.

De la Tabla 3.11, expuesta con anterioridad, se puede ver que las alturas de los motores y equipos son similares para todos ellos. Se considerará un valor de referencia de 1.2 m, además, la altura de la bancada tendrá un valor referencial de 0.4 m y para la parte superior la altura será de al menos 0.5 m para alojar todos los conductos que sean necesarios. Al realizar una suma y considerado un valor de 0.2 m como holgura, el puntal del patín será de al menos 2.3 m.

3.5.4. Puntal

La altura del puntal de la embarcación será la misma que la del patín, pero debemos de definir una altura mínima para la plataforma que unirá los dos monocasos la cual será de al menos 0.8 m.

La superestructura será de un nivel, por lo que la altura tendrá mayor libertad, pues no representará un limitante.

3.5.5. Desplazamiento

De acuerdo con la Norma NR217, parte B, Ch. 3, Sec. 2 podemos referenciar el desplazamiento de nuestra embarcación⁸³, de acuerdo con la Tabla 3.12.

Este desplazamiento preliminar nos ayudará a acotar por exceso el peso de nuestra embarcación. Lógicamente, este debe ser corroborado y revisado durante toda la fase de diseño, con la finalidad de realizar el cálculo lo más preciso y confiable posible.

Tabla 3.12.- Peso Estimado de acuerdo con NR 217

Ítem	Formula	Peso (Ton)
Casco*	$D < 3.7 \text{ m} ; W_{casco} = 0.15LBD$	51.00
Superestructura	$W_{Superestructura} = 0.01LBD$	9.375
Maquinaria*	$W_{Maquinaria} = 0.005LBD$	1.725
Instalaciones*	$W_{Instalaciones} = 0.01LBD$	3.450
Otros	5%	3.2775
Total aproximado		68.8275
*Al tratarse de un catamarán, la manga B, será dos veces la manga del patín, únicamente para esta fórmula.		

Fuente: Elaboración Propia.

⁸³ Aunque el rango de aplicación es para embarcaciones con L mayores o iguales a 35 m (aplicadas a embarcaciones de mayor porte y por ende mayor escantillonado), el uso de esta fórmula solo es referencial a fin de poder evaluar por exceso el peso que podría tener nuestra embarcación.

3.5.6. Coefficientes de Forma

Similar al desplazamiento, estimaremos de forma aproximada los coeficientes de forma para el monocasco.

3.5.6.1. Coefficiente de Block

Dadas las formas aproximadas de las cuadernas de la serie a usar, el coeficiente de block promedio a usar será 0.45.

3.5.6.2. Coefficiente de Prismático

De acuerdo con el estudio realizado por Saunder,⁸⁴ se puede aproximar el coeficiente prismático según la siguiente gráfica:

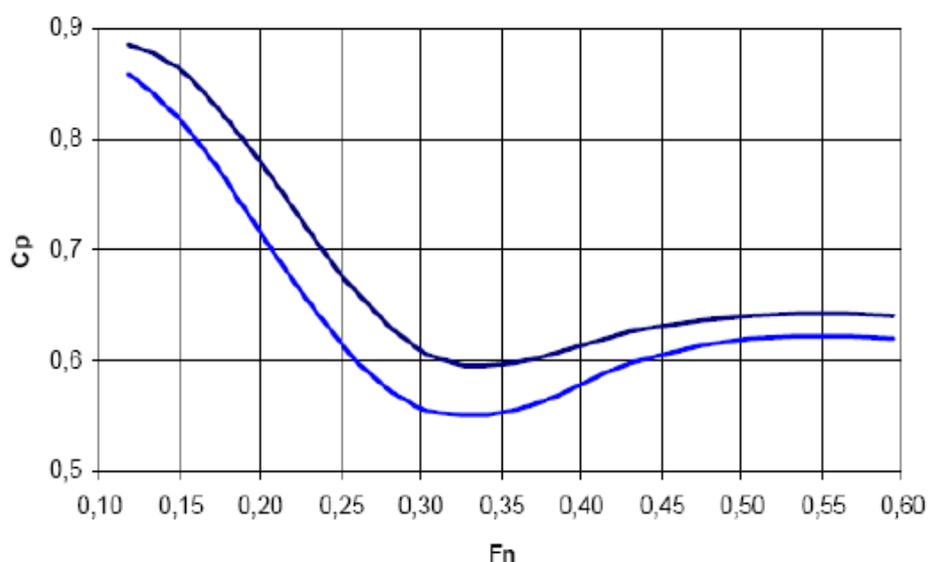


Figura 3.4.- Coeficiente Prismático

Fuente: Saunder

Las líneas delimitan una zona hidrodinámicamente adecuada para el patín. Para nuestra embarcación, es aconsejable tomar un coeficiente prismático promedio entre $0.2 < \text{Froude} < 0.3$, cercano al 0.7.

⁸⁴Tomado de Saunders, H. "Hydrodynamics in Ship Design, Vol II, SNAME"- Nueva York - 1957

3.5.6.3. Coeficiente de Sección media

Conociendo C_b y C_p se puede calcular fácilmente el valor aproximado del C_M como:

$$C_M = \frac{C_b}{C_p} = \frac{0.45}{0.7} = 0.64 \quad (3.14)$$

3.5.6.4. Coeficiente de Flotación

Este coeficiente se puede estimar en función del C_b . El valor aproximado puede ser expresado a través de la siguiente fórmula:

$$C_f = \frac{1}{3} + \frac{2}{3}C_b = 0.63 \quad (3.15)$$

3.5.7. Calado

Una primera aproximación del Coeficiente de Block nos permite determinar el calado de nuestra embarcación. Para ello se usará la siguiente formula:

$$T = \frac{\Delta}{2\rho LbC_b} = \frac{68.8275}{2 \times 1 \times 30 \times 2.5 \times 0.45} = 1.02 \text{ m} \quad (3.16)$$

La manga de los patines está multiplicada por 2, porque el desplazamiento está repartido entre los dos patines.

3.5.8. Resumen

Al evaluar los datos de embarcaciones de pasajeros similares, los requisitos mínimos para el área de pasajeros, el área disponible en cubierta para los paneles fotovoltaicos, maquinaria en general, coeficientes de forma, volumen y espacio necesario se tiene las siguientes dimensiones principales y relaciones geométricas.

Tabla 3.13.- Dimensiones preliminares elegidas

DIMENSIONES ELEGIDAS	
CARACTERÍSTICA	VALOR
Eslora	30.00
Manga Total	12.5
Puntal	2.3
Manga del patín (b)	2.5
L/b	12
b/T	2.27
C_b	0.45
$L/\nabla^{1/3}$	8.9
S/L	1/3

Fuente: Elaboración Propia

3.6. LINEAS DE FORMAS

3.6.1. Tipo de Casco adoptado

La selección de la embarcación de tipo catamarán considera:

- La relación velocidad/potencia de un catamarán es mucho mejor que la de los buques convencionales, lo que permite alcanzar mayores velocidades con una potencia instalada menor. El ahorro energético en relación con un monocasco equivalente es considerable.
- El catamarán resulta mucho más estable que el buque tradicional, lo que implica menor movimiento a bordo y menos embarques de agua. Esto se traduce en una mejora del confort a bordo.
- El catamarán consigue una buena compartimentación y reserva de flotabilidad, lo cual mejora la seguridad del buque. Una cuestión importante a la hora de transportar pasaje.

- Por sus dimensiones y relación Eslora/Manga, ofrece una plataforma muy adecuada para instalar la zona de habilitación.
- Presenta una excelente maniobrabilidad, lo que facilita las labores de atraque y desatraque, reduciendo el tiempo de cada viaje y equipos extra como hélices de proa.
- Al tener unas formas más finas, la formación de olas es menor.

Estas ventajas (especialmente en seguridad y relación velocidad/potencia) son las que hacen del catamarán, un buque ideal para el transporte de pasaje.

Dentro de la gran diversidad de formas disponibles y estudiadas, encontramos la serie de Sahoo, Browne y Salas. Esta serie sistemática es una de las más estudiadas y con mayores variaciones de forma, siendo esta, la razón principal para elegirla. Entonces, para obtener una nueva forma, a partir de serie base, adoptaremos las líneas de forma base, a las cuales modificaremos según convenga.

3.6.2. Generación y Derivación de Formas

3.6.2.1. Modelo base

Como habíamos mencionado anteriormente, la serie Sahoo, Browne y Salas, presenta variaciones en la sección maestra y las cuadernas transversales. Estas variaciones incluyen separaciones de casco, coeficientes de forma manteniendo un coeficiente de block, variaciones en el centro de empuje, centro de flotación, diferentes ángulos de ataque en proa, entre otras, como se mostró en la Tabla 3.9.

Nuestro modelo base, será una combinación entre C2, C5 y C7, por poseer una popa con mayor volumen (ideal para la ubicación de los motores y elementos de propulsión y gobierno), un mejor ángulo de entrada por proa, coeficientes de forma adecuados para garantizar el empuje necesario y una mejor distribución de presiones por formación de olas longitudinales, debido a un

amplio rango de separaciones entre cascos lo que se traduce en una menor resistencia al avance.



Figura 3.5 Cuadernas C2, C5 y C7

Fuente: Sahoo, Browne y Salas (2004)

Las características combinadas de los modelos elegidos nos permiten ajustar, a partir de los modelos de cuadernas encontradas, una nueva distribución de formas y generar un nuevo modelo, acorde a nuestros objetivos y características deseadas.

3.6.2.2. Separación entre Cascos

La separación deseada entre cascos es de 10 m, por tanto, se necesitará una plataforma central plana y que provea una transición suave hacia el casco, de modo que facilite la construcción y distribuya mejor los esfuerzos.

La transición entre el casco y la plataforma central plana tiene un radio máximo de 0.4 m, que va disminuyendo y ajustándose hacia proa y popa de acuerdo con el ángulo formado entre la línea transversal del monocasco y la superficie plana de la plataforma central.

3.6.2.3. Forma Generada del Modelo

Al ajustar los parámetros de las formas de la serie y las transiciones de las superficies con el uso de programas como el Rhino 5.0 y Maxsurf, se ha obtenido una nueva forma generada la cual se presenta en el plano de líneas de forma TMC-002-17 Líneas de forma, adjunta en los anexos.

Este proceso iterativo nos ha dado como resultado las siguientes líneas de que combinan el diseño de una proa fina y pantoque redondo.

- Astilla muerta entre 8° y 12° , que permite disminuir la resistencia al avance, área de la superficie mojada en comparación con las típicas formas en U de las embarcaciones actuales.
- Coeficiente prismático entre 0.6-0.7 (monocasco), disminuyendo la resistencia de viscosa, influyendo en una disminución de la resistencia de presión por fricción.
- Espejo de popa levantada, que permite una mejor inmersión de la hélice en condiciones de operación.
- Ángulo de proa entre 8° y 12° , favorece la formación de flujo a lo largo de la eslora de la embarcación disminuyendo la formación de olas transversales.
- Una separación desde líneas de crujía de los monocascos de 10 m, que disminuye la interferencia de olas.

3.6.3. Dimensiones y Características Principales

De acuerdo con los ajustes realizados, y la nueva forma generada de nuestra embarcación presenta las siguientes dimensiones y características principales, las cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.14.- Dimensiones y características principales

DIMENSIONES Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES		
Construcción		
Tipo de Casco	Embarcación Fluvial	Catamarán
Dimensiones		
Eslora	30.00	m
Manga	12.50	m
Puntal	02.30	m
Calado (aprox.)	1.10	m
Prestaciones		
Aforo	50	Pasajeros
Tripulación	15	Tripulantes
Velocidad de Crucero	6-7	Nudos (kn)
Velocidad Máxima	8-9.5	Nudos (kn)
Autonomía		
Paneles fotovoltaicos	12.5 horas – 6 kn / 5 horas- 9.5 kn	
Generador Emergencia	Hasta 240 km	
Sistema de Energía		
Generador solar	83.5	kWp
Tensión de Trabajo	24/72	V
Banco de baterías	334 Ah – 72 v	30 unidades
Propulsión	130	kW
Generador de Emergencia	2 generadores de 90	kW

Fuente: Elaboración Propia.

3.7. DISPOSICIÓN GENERAL

3.7.1. Subdivisión Estanca

La subdivisión estanca proporciona la ubicación de los mamparos estancos a fin de garantizar que la nave se encuentre a flote en caso de producirse una avería. Para nuestro caso usaremos el cálculo de esloras inundables y las disposiciones de la norma NR 217 Pt. B, Ch 2, Sec. 1.

3.7.1.1. Número de Mamparos Mínimos

De acuerdo con la normativa, se necesitan por lo menos:

- (01) mamparo de Colisión
- (01) mamparo de pique de popa
- (01) mamparo de para la cámara de máquinas a popa
- (01) mamparo de para la sala auxiliar de máquinas o compartimentos destinados para componentes eléctricos.

3.7.1.2. Ubicación del mamparo de colisión

La ubicación del mamparo de colisión viene dada por la siguiente ecuación:

$$0.04L_{wl} \leq d_c \leq 0.04L_{wl} + 2 \quad (3.17)$$

Para nuestro caso, la eslora de flotación (L_{wl}) será aproximadamente el 96% L .

Al reemplazar los valores, la ubicación del mamparo será:

$$1.152 \leq d_c \leq 3.152 \quad (3.18)$$

La ubicación del mamparo de colisión será de 3 m.

3.7.1.3. Longitud máxima de compartimentos

La longitud máxima de los compartimentos será definida por el cálculo de esloras inundables. Este estudio permite asignar la distribución de mamparos transversales bajo la cubierta principal, y de esta forma los espacios.

La longitud máxima de los compartimentos ha considerado lo siguiente:

- Reglamento internacional SOLAS 74, aplicándose los criterios y definiciones para buques de pasaje.
- Espacios necesarios para sala de máquinas, sala de bombas, entre otros.
- Subdivisión y el análisis de las esloras inundables para compartimentos de banda a banda, la subdivisión longitudinal no está contemplada en las normas anteriores.

3.7.1.4. Esloras inundables

De acuerdo con la normativa vigente, debemos asegurar que la embarcación presente una subdivisión adecuada. Para ello, realizaremos el cálculo de esloras inundables con ayuda del software Maxsurf, cuyos datos se muestran en la Tabla 3.15.

La tabla muestra la eslora máxima admisible para la posición dada, que garantiza en caso de avería de un compartimento de banda a banda, la flotación del buque quede comprometida hasta la línea margen (76 mm por debajo de la cubierta principal).

La longitud del máximo compartimento, en el punto de análisis, se muestra para cada posición de las cuadernas, y están referenciadas desde la sección maestra del modelo, desde el espejo de popa a proa.

Tabla 3.15.- Esloras Inundables obtenidas

ESLORAS INUNDABLES - SOLAS 74 CRITERIO DE LINEA MARGEN							
ITEM	POSICIÓN (SM) ⁸⁵	RANGO DE OPERACIÓN CRITICA (Condición de Máxima Carga)					
Desplazamiento (Ton.)		55.0	55.0	60	60	70	70
Permeabilidad %		100	85	100	85	100	85
FR1	-14.8	0	0	0	0	0	0
FR2	-12.8	4	4	4	4	4	4
FR3	-10.8	8	8	8	8	8	8
FR4	-8.8	10.67	12	10.46	12	10.05	11.69
FR5	-6.8	13.44	15.56	13.16	15.25	12.58	14.69
FR6	-4.8	16.53	19.33	16.12	18.89	15.45	18.11
FR7	-2.8	19.8	23.19	19.43	22.7	18.69	21.67
FR8	-0.8	23.17	27.05	22.31	26.52	22.05	25.17
FR9	1.2	20.15	25.23	20.02	24.52	19.04	23.41
FR10	3.2	16.78	21.4	16.6	20.68	15.7	19.66
FR11	5.2	13.66	17.56	13.28	16.84	12.88	15.9
FR12	7.2	10.98	13.73	10.67	12.99	10.3	12.15
FR13	9.2	8.75	12	8.65	12	8.44	11.17
FR14	11.2	8	8	8	8	8	8
FR15	12.2	6	6	6	6	6	6
FR16	13.2	4	4	4	4	4	4
FR17	14.2	2	2	2	2	2	2

Fuente: Elaboración Propia.

3.7.2. Espacios del Buque

Por la especial configuración del catamarán, con dos cascos simétricos, la mayoría de los espacios y de los tanques serán simétricos respecto crujía. Por este motivo, se describirán agrupados, sin distinguir entre los de babor o estribor. Comenzando desde la popa.

⁸⁵ La sección media se encuentra a mitad de la eslora de Flotación, el sentido +/- corresponde a la ubicación del punto de análisis para el cálculo, a proa o hacia proa de la sección media. Los datos mostrados han sido calculados mediante el software Maxsurf Bentley.

3.7.2.1. Bajo Cubierta Principal

3.7.2.1.1. Servomotor

Los locales del servo y otros componentes de la unidad de gobierno están situados sobre el espejo de popa de cada casco, a popa de la cámara de máquinas. Limitan con ésta a través de un mamparo situado a 4 m de popa. En este local se dispone el servo con toda su maquinaria necesaria. El acceso a este espacio será a través de escotillas situadas en popa.

3.7.2.1.2. Cámara de Máquinas

La cámara de máquinas o sala de máquinas se encontrará desde el mamparo de la unidad de gobierno hasta un mamparo ubicado en la C5 a 10 m del espejo de popa. En este local se dispone el motor con toda su maquinaria necesaria. El acceso a este espacio será a través de escotillas y puertas estancas.

3.7.2.1.3. Planta Eléctrica

El espacio para la planta eléctrica bajo cubierta debe alojar los acumuladores, paneles de distribución eléctrica y generadores de emergencia, generalmente recibe el nombre de sala auxiliar de máquinas. Los espacios destinados para la generación de energía sobre cubierta serán dados por el área disponible para los paneles.

3.7.2.1.4. Espacio para acumuladores

Las baterías se ubicarán desde la C5-C7, con una longitud de 4 m.

3.7.2.2. Sobre Cubierta Principal

3.7.2.2.1. Área de pasajeros

El área de pasajeros se encontrará sobre la cubierta principal desde la C6 - C11, con un área de 90 m².

3.7.2.2.2. Habilitación en general

La superestructura provee de un salón principal sobre la cubierta principal desde la C4 - C11, con un área de 124 m², de los cuales 90 m² son asignados para los pasajeros. Los espacios para tránsito y otros, dentro del salón principal son 34 m².

Los pañoles para cargas, almacenes, maletas, y otros similares, se encuentran distribuidos desde la C2 – C5, y bajo los asientos de cada pasajero.

3.7.2.2.3. Baños

El espacio asignado para los baños se encuentra en popa desde el mamparo de superestructura hasta el mamparo de división ubicado en C2, a 4 m del espejo de popa. El área total asignada es de 18 m² para varones y mujeres, con suficiente capacidad para alojar 2 inodoros, un lavamanos y una ducha por cada espacio.

3.7.2.2.4. Puente de Gobierno

El puente de gobierno debe encontrarse en proa, y situada de modo que permita la visibilidad para las maniobras de gobierno, atraque y navegación.

Contará con un espacio de 28 m², con capacidad suficiente para los instrumentos de navegación, monitores, silla para el capitán y accesos.

3.7.2.2.5. Accesos al buque y pasillos

Los pasillos en cualquier área del buque son de al menos 1m de ancho. Además, todos los accesos al buque serán a través de una pequeña rampa móvil de pequeña inclinación y antideslizante.

3.7.2.2.6. Equipos de Salvamento

Los equipos de salvamento serán distribuidos en toda la superestructura, de modo que facilite el rápido acceso a ellos.

3.7.2.2.7. Zona y equipos de amarre y fondeo

Para el amarre se dispondrán bitas a babor y estribor tanto en proa como en popa. Dado el tamaño de la embarcación y su maniobrabilidad no harán falta winches o similares. El espacio en proa y en popa, así como en las bandas, permite la instalación de las bitas y otros accesorios.

3.7.2.2.8. Tanques

El espacio de tanques para agua dulce, aguas grises y residuos oleosos se encuentra distribuido desde la C10 hasta el mamparo de colisión, para separar los espacios entre el área de tanques y el área de residuos, se ha colocado un mamparo. El espacio asignado para los tanques de combustible se encuentra dentro de la sala auxiliar de máquinas.

El volumen de los tanques de agua dulce será de 1 m³ por banda, el volumen de aguas grises será de 1.5 m³, 0.75 por banda, mientras que el volumen de aguas negras y de sentina será de al menos 0.8 m³, para cada uno.⁸⁶

3.7.2.3. Sobre Cubierta de Superestructura

3.7.2.3.1. Superficie para paneles Fotovoltaicos

El espacio para los paneles fotovoltaicos se ubicará en toda el área disponible sobre la cubierta de superestructura, con un área de 405 m².

3.7.2.3.2. Cubierta del Puente de Gobierno

Sobre el techo de esta caseta, se colocarán los mástiles y los palos que sujetan las luces reglamentarias, el radar y el equipo de telecomunicaciones.

⁸⁶ El cálculo completo se muestra en el cálculo de capacidades y volúmenes.

3.7.3. Disposición General Adoptada

3.7.3.1. Compartimentado Adoptado

La Tabla 3.16 muestra el compartimentado adoptado de acuerdo con la subdivisión estanca y el análisis de esloras inundables.

Tabla 3.16.- Compartimentado adoptado

MAMPARO	UBICACIÓN	OBSERVACIÓN
Espejo de popa	Mamparo - C0	---
Pique de popa	Mamp. – C2	Mamp. Estanco
Sala de Maquinas	Mamp. – C5	Mamp. Estanco/ Puerta Estanca
Sala Aux. Máquinas	Mamp. – C7	Mamp. Estanco/ Puerta Estanca
Área de Baterías	Mamp. – C10	Mamp. Estanco
Área de Tanques	Mamp. – C12	Mamp. Estanco
Pique de proa	Mamp. – C13.5	Mamp. de colisión

Fuente: Elaboración Propia.

3.7.3.2. Plano de Disposición General

Los espacios, áreas y zonas destinadas para los pasajeros y la tripulación se pueden apreciar en el plano TMC-18-001 Disposición General.⁸⁷

Considerando los espacios asignados, y el compartimentado elegido de acuerdo con la subdivisión estanca, los espacios sobre cubierta principal y en el puente de mando se muestran en la siguiente tabla.

⁸⁷ El plano de Disposición General se muestra en los Anexos.

Tabla 3.17.- Asignación de Espacios.

ESPACIO DESIGNADO	UBICACIÓN	ÁREA	OBSERVACIÓN
Área de recepción	C2 – C4	12.2 m ²	12.2 m ²
Zona de Abordaje	C5 - C6	2,2 m ²	Ambas Bandas
Pasadizos Lat.	-----	1.00 m	Ancho Long.
Área de carga	C6 – C11	17.1 m ²	Bajo las mesas
Área de pasajeros	C6 – C11	90.0 m ²	50 pasajeros
Área de Almacén	C2 – C7	50.0 m ²	Bajo cubierta/pañol
Escaleras	C12 – C13	0.45 m ²	Área de peldaño
Salón Principal	C4 – C11	124.0 m ²	Pasajeros, pasadizo
Área de Paneles	C0 – C14	456.3 m ²	270 paneles
Pte. De Mando	C11 – C 13.5	28.00 m ²	----
Área de Baños	C0 – C2	18.0 m ²	Varones y Mujeres

Fuente: Elaboración Propia

3.8. CÁLCULOS DE ARQUITECTURA NAVAL

3.8.1. Características Hidrostáticas

Las características hidrostáticas para los diferentes calados y para un asiento igual a 0, se muestran en la siguiente tabla y en el plano TMC-18-003 Curvas Hidrostáticas.

Los valores fueron obtenidos mediante el software Maxsurf, los valores se muestran en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18.- Características Hidrostáticas.

ITEM	CALADO					
	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3
Desplazamiento (ton.)	47.26	57.10	67.40	78.09	89.12	100.50
Volumen (m ³)	47.26	57.10	67.40	78.09	89.12	100.45
Eslora de flotación (m)	29.58	29.63	29.68	29.72	29.75	29.79
Manga maxima (m)	12.00	12.07	12.13	12.19	12.24	12.28
Área mojada (m ²)	131.72	144.85	157.74	170.45	183.09	195.65
Área de flotación m ²	95.94	100.82	105.01	108.66	111.89	114.72
Coefficiente prismático (Cp)	0.69	0.71	0.72	0.73	0.75	0.76
Coefficiente de block (Cb)	0.17	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21
Coef. Sección media (Cm)	0.25	0.26	0.26	0.27	0.28	0.28
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.31
LCB (+ve fwd) m	0.22	0.03	-0.12	-0.24	-0.34	-0.41
LCF (+ve fwd) m	-0.84	-0.92	-0.97	-1.00	-1.01	-1.01
KB (m)	0.50	0.56	0.62	0.68	0.74	0.80
KG (m)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BMt (m)	51.28	44.64	39.42	35.23	31.81	28.95
BML (m)	114.53	101.75	91.15	82.37	75.01	68.77
GMt (m)	51.78	45.20	40.04	35.91	32.55	29.75
GML (m)	115.03	102.31	91.77	83.05	75.75	69.57
KMt (m)	51.78	45.20	40.04	35.91	32.55	29.75
KML (m)	115.03	102.31	91.77	83.05	75.75	69.57
Immersion (TPc) (tonne/cm)	0.96	1.01	1.05	1.09	1.12	1.15
MTc (tonne.m)	1.83	1.97	2.08	2.18	2.27	2.35
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	42.71	45.05	47.10	48.95	50.63	52.16

Fuente: Elaboración Propia⁸⁸

⁸⁸ Los datos mostrados corresponden a los obtenidos por medio del software Maxsurf Bentley, la variación de los coeficientes de forma como el Coeficiente prismático, coeficiente de block, coeficiente de sección media, coeficiente de flotación es debido a que los coeficientes corresponden a la forma del catamarán y no a los de cada monocasco.

3.8.2. Curvas Cruzadas de Estabilidad

Los resultados obtenidos para la curva de brazos adrizantes o curvas cruzadas se muestran en el plano TMC-18-004 Curvas Cruzadas.

3.8.3. Capacidades y Volúmenes

Determinar las capacidades de los tanques, provisiones y peso variables, constituye una variable importante a considerar dentro de los sistemas de la embarcación, servicios y otros, que podría verse afectado de no acotarse.

Las dimensiones de las capacidades determinadas siguen las directrices del SOLAS 74, MARPOL 73/78 y sus enmiendas vigentes, según aplique dentro del alcance. La autonomía de la embarcación es considerada 2 días, para fines de este cálculo, con un total de 600 km aproximadamente (462 km mínimamente exigidos ida y vuelta), a fin de garantizar que cualquier achique de los tanques y reabastecimiento se realice en el puerto de Iquitos y/o puertos permitidos, y no en una zona de la reserva. Se ha considerado 65 personas entre tripulantes y pasajeros.

3.8.3.1. Capacidad de Agua Potable

La capacidad de agua potable o agua dulce viene dada por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 \text{Cap. de Agua Dulce} &= \#personas \times 0.015 \frac{\text{ton}}{\text{personas}} & (3.19) \\
 &= 65 \text{ personas} \times 0.015 \frac{\text{ton}}{\text{personas}} \\
 &= 0.975 \text{ ton} \cong 1 \text{ ton}.
 \end{aligned}$$

Entonces, el volumen de agua dulce considerando la autonomía de la embarcación será de 2 ton, dispuesto en dos tanques, uno por cada monocasco con capacidad de 1 ton.

3.8.3.2. Provisiones

La embarcación está diseñada conceptualmente para brindar servicios de turismo vivencial y confort adecuado a bordo de la nave, por lo cual ofrecerá refrigerios y comidas durante la travesía mas no alojamiento, por esta razón debe disponer de víveres a bordo.

Considerando un consumo promedio de 0.001 ton/persona por día, por tanto:

$$\begin{aligned} \text{Cap. de Provisiones} &= 65 \text{ personas} \times 0.001 \frac{\text{ton}}{\text{personas}} \quad (3.20) \\ &= 0.065 \text{ ton} \end{aligned}$$

Considerando un 15% adicional, como factor de seguridad y la autonomía de la embarcación, la capacidad de provisiones será de 0.15 ton.

3.8.3.3. Capacidad del Generador de Emergencia

Como medio auxiliar, la embarcación esta provista de al menos un generador auxiliar de 150 KW⁸⁹, que suplirá la demanda de la planta de ingeniería en caso de emergencia para asegurar la demanda del motor DC, alumbrado eléctrico y los sistemas de comunicaciones hasta que se llegue al puerto más cercano, o el puerto de origen.

La capacidad del tanque de combustible está dada por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{Cap. Combustible} &= \text{Consumo}_{\text{Especifico}} \times \text{BHP} \times \frac{\text{Radio de acción}}{\text{Velocidad}} \quad (3.21) \\ &= 0.18 \frac{\text{Kg}}{\text{Hp} \times \text{Hr}} \times 200 \times \frac{600 \text{ km}}{11.10 \text{ km/hr}} \\ &= 0.18 \frac{\text{Kg}}{\text{Hp} \times \text{Hr}} \times 200 \times \frac{600 \text{ km}}{11.10 \text{ km/hr}} \\ &= 1.945 \text{ Kg} \cong 2 \text{ ton} \end{aligned}$$

⁸⁹ El valor de 150 kW está basado en la demanda del motor, el gobierno, alumbrado eléctrico y sistemas de comunicaciones. La capacidad del generador debe ser acotado bajo el cuadro de demanda eléctrica.

Entonces, la capacidad de combustible, considerando la autonomía de la embarcación será de 2 toneladas aproximadamente, esta puede variar de acuerdo con el balance eléctrico.

3.8.3.4. Pasajeros y Tripulación

El peso considerado de los pasajeros y la tripulación se estima en 75 Kg por persona⁹⁰, por tanto, el peso de los pasajeros y la tripulación será:

$$\begin{aligned} \text{Peso de Pasajeros y Tripulación} &= 65 \text{ personas} \times 0.075 \frac{\text{ton}}{\text{personas}} \quad (3.22) \\ &= 4.875 \text{ ton} \cong 5 \text{ ton} \end{aligned}$$

3.8.3.5. Equipaje de Pasajeros

El equipaje de pasajeros no superará los 50 Kg por persona, por tanto, durante el viaje:

$$\begin{aligned} \text{Peso de Equipaje} &= 65 \text{ personas} \times 0.050 \frac{\text{ton}}{\text{personas}} \quad (3.23) \\ &= 2.5 \text{ ton} \end{aligned}$$

3.8.3.6. Capacidad del Tanque de Aguas Grises

El volumen de aguas grises será calculado de acuerdo con las disposiciones de MARPOL 73/78, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} V_{\text{Aguas grises}} &= C_{\text{diaria/persona}} \times D_{\# \text{ de Dias}} \times T_{\# \text{ pasajeros y tripulantes}} \quad (3.24) \\ &= 10 \times 2 \times 65 = 1300 \text{ Lt} \cong 1.4 \text{ ton}^{91} \end{aligned}$$

Donde:

- D: periodo máximo de navegación sin descarga en puerto. (2 días)
- C: consumo diario por persona, aprox. 10 litros /día.
- T: 65 personas

⁹⁰ Tomado del criterio de estabilidad sin averías, aplicable para buques de pasaje y buques de carga.

⁹¹ Densidad considerada ρ : 1.010-1.025 ton/m³

3.8.3.7. Capacidad del Tanque de Aguas Negras

El volumen de aguas negras será calculado de acuerdo a las disposiciones de MARPOL 73/78, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_{Aguas\ Negras} = C_{diaria/persona} \times D_{\# de\ Dias} \times T_{\#pasajeros\ y\ tripulantes} \quad (3.25)$$

$$= 5 \times 2 \times 65 = 650 \text{ Litros} \cong 0.7 \text{ ton}^{92}$$

Dónde:

- D: periodo máximo de navegación sin necesidad de recalar en puerto. (2 días)
- C: consumo diario por persona, aprox. 5 litros /día.
- T: 65 personas

La capacidad del tanque de aguas negras será de 650 litros, estará ubicado a en el área de residuos, en una de las bandas del monocasco.

3.8.3.8. Capacidad del tanque de sentina

El volumen del tanque de sentina está en función del volumen de agua con acumulación de residuos. Generalmente, se usa un equipo separador de aguas e hidrocarburos de 100 ppm o de un equipo filtrador de 15 ppm, ambas alternativas consideran un tanque de acumulación de residuos.

En nuestro caso, consideramos que un equipo adicional encarecería el proyecto. Las aguas del tanque de sentina serán descargadas en puerto para ser tratadas y eliminadas. La capacidad del tanque de sentina será de 650 litros, estará ubicado a en el área de residuos, en una de las bandas.

3.8.3.9. Capacidad del tanque de aceite Lubricante

Para el correcto funcionamiento del equipo de control y gobierno, se tendrá un tanque de aceite lubricante con capacidad de 0.25 ton, por banda.

⁹² Densidad considerada p: 1.010-1.020 ton/m³

Tabla 3.19.- Resumen de capacidades y volúmenes

RESUMEN DE CAPACIDADES Y VOLUMENES		
Ítem	Capacidad	Unidad
Agua Potable	2.00	Ton
Provisiones	0.15	Ton
Pasajeros y Tripulación	5.00	Ton
Equipaje	2.50	Ton
Lubricante	0.50	Ton
Combustible Emergencia	2.00	Ton
Subtotal	12.15	Ton
Aguas Negras	0.65	m ³
Aguas Grises	1.30	m ³
Sentina	0.65	m ³
Subtotal	2.60	m³

Fuente: Elaboración Propia

3.8.4. Francobordo mínimo

De acuerdo con la NR217 D, Ch.1, Sec7, el francobordo no debe ser menor a 300 mm. Entonces, para confirmar o aumentar el francobordo mínimo, se tendría que analizar el convenio de líneas de máxima carga.

Si se aplicase el convenio de líneas de carga de 1966, los resultados no reflejarían la realidad,⁹³dando como resultado un francobordo impráctico.

Por tanto, el francobordo aceptable para este tipo de embarcación será suficiente si consideramos:

$$F = D - T = 2.3 - 1.1 = 1.2 \text{ m} \quad (3.26)$$

Este valor se tendría que verificar con el balance de pesos y en condición de equilibrio para máxima carga.

⁹³ El francobordo tabular sería al menos de 246 mm. La corrección por eslora menor a 100 m no es aplicable y, la corrección por superestructura debido a que ocupa aproximadamente el 90% de la longitud y área de la cubierta, sería de al menos 346 mm, lo cual haría un francobordo mínimo de valor negativo. Las otras correcciones no aplican ni constituyen un aumento sustancial del francobordo.

3.9. CÁLCULO DE RESISTENCIA AL AVANCE

El cálculo de la resistencia al avance siempre es validado en un canal de experiencias hidrodinámicas, aunque el uso de CFX, CFD u otros, también es aceptable. Para este caso, se ha realizado una aproximación teórica a través de las series sistemáticas y métodos de aproximación numérica como se ha mencionado en el marco teórico.

La mayoría de los métodos de cálculo disponibles evalúan la resistencia al avance en condiciones de aguas profundas. Para el caso de navegación en aguas de profundidad limitada (poco calado o aguas someras) la velocidad del buque es afectada por la disminución de la profundidad del río, traducándose en un incremento en la potencia necesaria para su desplazamiento.

La metodología que se aplicará para obtener la curva de potencia de la embarcación fluvial será:

- Estimar de la resistencia en aguas profundas,
- Calcular del incremento de la resistencia en aguas poco profundas,
- Estimar las eficiencias y pérdidas que correspondan, y
- Obtener la curva de potencia estimada del buque.

3.9.1. Resistencia en Aguas Profundas

De acuerdo con la serie de Sahoo, Browne y Salas, para estimar la resistencia en aguas profundas, debemos hallar el factor de forma.

El factor de forma puede hallarse con una interpolación o aplicando una ecuación para diferentes modelos y relaciones. En nuestro caso, debido a que no se puede usar el factor de forma de Armstrong (2000), usaremos una interpolación a partir de un modelo de regresión a partir de los datos de Molland et al, 1994.

Los valores de la interpolación de los factores de forma y los valores de los parámetros del catamarán para la regresión se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 3.20.- Interpolación del factor de forma

INTERPOLACIÓN DE FACTOR DE FORMA - MOLLAND ET AL, 1994				
$L/\nabla^{1/3}$	B/T	S/L = 0.3	S/L = 0.33	S/L = 0.4
		0.3	0.330	0.4
8.5	2	1.45	1.435	1.4
8.5	2.3	1.438	1.430	1.412
8.5	2.5	1.43	1.427	1.42
9	2.3	1.419	1.424	1.435
9.5	2	1.4	1.421	1.47
9.5	2.3	1.4	1.417	1.458
9.5	2.5	1.4	1.415	1.45

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.21.- Parámetros para la regresión

PROPIEDADES	VALOR	UNIDAD
L/B	12	[---]
B	2.5	[m]
S	63	[m ²]
B/T	1.419	[---]
$L/\nabla^{1/3}$	9	[---]
i_E	8.6	Grados
β	30.3	Grados

Fuente: Elaboración propia

Para la serie de Sahoo, el C_{WCAT} , queda expresado según la siguiente expresión:

$$C_{WCAT} = e^{c1} \left(\frac{L}{B}\right)^{c2} (C_B)^{c3} \left(\frac{L}{\nabla^{1/3}}\right)^{c4} (i_E)^{c5} (\beta)^{c6} \left(\frac{S}{B}\right)^{c8} \quad (3.27)$$

Donde los coeficientes están registrados en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22.- Coeficientes para la estimación del C_{WCAT}

Fn	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	R²
0,2	2,571	0,436	0,000	0,000	-4,124	-0,039	-0,199	0,037	0,995
0,3	0,585	0,000	0,000	0,945	-3,282	0,246	0,087	-0,089	0,989
0,4	3,324	0,000	-0,471	-0,963	-3,523	0,000	-0,688	-0,035	0,984
0,5	2,439	0,379	0,000	-0,600	-4,262	0,000	-0,337	-0,368	0,999
0,6	1,809	-0,110	0,000	0,000	-3,625	-0,061	-0,095	-0,314	0,997
0,7	1,055	0,000	0,082	-0,025	-3,617	0,000	-0,064	-0,181	0,997
0,8	0,603	0,222	0,266	0,000	-3,869	0,000	0,000	-0,069	0,998
0,9	-0,466	0,049	0,162	0,000	-3,322	0,128	0,000	-0,006	0,999
1,0	-1,221	0,000	0,117	0,000	-3,046	0,264	0,000	0,075	0,995

Fuente: Sahoo, Browne y Salas (2004)

Al evaluar los coeficientes de regresión⁹⁴, tenemos en la Tabla 3.23, los valores de resistencia en aguas profundas por el método de Sahoo.

Si se observa los valores de la resistencia obtenida, notamos que a partir de un rango de $0.25 < Fr < 0.4$, es decir, para velocidades de 9 – 12.5 kn, el coeficiente de C_{WCAT} se aleja mucho y la resistencia al avance se distorsiona de la tendencia normal, por lo que es probable la inducción al error por la regresión de coeficientes estadísticos, para este rango y forma generada.

⁹⁴ Tabla de valores de coeficientes se muestran en los Anexos.

Tabla 3.23.- Valores de Resistencia calculada

V [kn]	RT [N]	P [kW]
5.00	3118.72	8.02
5.50	3754.41	10.61
6.00	4447.58	13.72
6.50	5198.01	17.37
7.00	6005.54	21.61
7.50	6869.98	26.48
8.00	7791.20	32.04
8.50	8769.05	38.31
9.00	28939.90	45.35
9.50	32215.97	157.31
10.00	35666.43	183.33
10.50	39291.18	212.05
11.00	43090.11	243.63
11.50	47063.13	278.19
12.00	51210.15	315.86
12.50	55531.08	356.79
13.00	12299.97	82.19
13.50	13226.67	91.78
14.00	14185.84	102.08
14.50	15177.43	113.12
15.00	16201.35	124.91

Fuente: Elaboración propia

Para poder asegurar que los valores para velocidades mayores a 9 nudos (kn), son los correctos, analizaremos por otros métodos de series sistemáticas la predicción de potencia requerida. Para ello, analizaremos el modelo 3D del monocasco como una embarcación de desplazamiento, duplicaremos la resistencia calculada y le adicionaremos un 5%, por efecto de la separación de casco.⁹⁵

La separación entre cascos siempre es una variable complicada, pues esta incrementa la resistencia al avance al definirse una separación muy corta. La separación de nuestra embarcación es mayor a 8 m, cercana al límite permisible para embarcaciones similares, en donde, a pesar de que se incremente la separación de cascos, el incremento resistencia al avance no se ve afectada.

De acuerdo con la Tabla 3.20 y 3.21, se nota que la embarcación es un buque de desplazamiento que desarrollará un régimen de navegación moderada.

La resistencia en de la embarcación en aguas profundas será calculada a través del método *slender body method*,⁹⁶el tradicional método Holtrop y el método de *Fung y Leibman* ⁹⁷ disponibles en Maxsurf Resistance, (El análisis será aplicado a un monocasco multiplicado por el doble con un 5% adicional, luego aplicaremos las correcciones de acuerdo con la metodología planteada).

⁹⁵ El 5% de resistencia añadida es el valor promedio para separaciones de casco $s/L=1.25b$.

⁹⁶ El método *slender Body*, basado en el trabajo de Tuck (1999) y Couser (1996) está disponible en Maxsurf Resistance. Este método utiliza el enfoque basado en Michell (1898) para calcular la resistencia de las olas de un monocasco simétrico.

Este método puede aplicarse a muchas formas de cascos diferentes, incluyendo multicascos. Sin embargo, los cascos individuales deben ser delgados (para los multicascos) y deben ser simétricos respecto a su línea de crujía. Las fuerzas viscosas se descuidan en el método de *Slender Body* que limita la aplicabilidad del rango de velocidad para este método. En general, se pueden obtener resultados sensibles para una amplia gama de embarcaciones mono y multicascos que funcionan con números de Froude normales menores a 0.4.

Este método sólo predice el componente de resistencia de ola. Para calcular la resistencia total, Maxsurf Resistance calcula y añade el componente de resistencia viscosa utilizando el método de cálculo del coeficiente de fricción ITTC'57 y el factor de forma especificado.

⁹⁷ Este algoritmo es aplicable para la predicción de resistencia de buques de desplazamiento con formas de casco espejo (generalmente utilizado para buques más grandes que los permitidos por Compton). La regresión se basa en datos de pruebas de 739 modelos en la cuenca modelo de David Taylor y consta de más de 10 000 puntos de datos, Fung y Leibman (1995).

Los resultados de la predicción de la resistencia al avance por los diferentes métodos para embarcaciones de desplazamiento se observan en la siguiente tabla.

Tabla 3.24.- Valores de Resistencia calculada para varios métodos

V (kn)	Holtrop Resistance (N)	Holtrop Power (kW)	Fung Resistance (N)	Fung Power (Kw)	Slender Body Resistance (N)	Slender Body Power (kW)
5.0	1244.152	3.20	1182.27	3.04	1284.78	3.30
5.5	1527.428	4.32	1418.56	4.01	1560.42	4.41
6.0	1854.342	5.72	1678.53	5.18	1853.73	5.72
6.5	2227.96	7.44	1978.38	6.61	2196.03	7.34
7.0	2650.55	9.54	2299.32	8.27	2558.25	9.20
7.5	3118.766	12.02	2620.89	10.10	2976.77	11.48
8.0	3639.454	14.97	2990.12	12.30	3491.27	14.36
8.5	4231.276	18.49	3445.08	15.05	3872.16	16.92
9.0	4871.398	22.54	3978.32	18.40	4418.00	20.44
9.5	5503.848	26.88	4540.01	22.17	5244.99	25.61
10.0	6142.108	31.57	5074.03	26.08	6020.27	30.94
10.5	6800.724	36.70	5571.64	30.07	6532.68	35.26
11.0	7542.556	42.65	6074.85	34.35	6871.71	38.85
11.5	8416.31	49.75	6637.97	39.24	7237.53	42.78
12.0	9446.92	58.27	7301.74	45.04	7774.58	47.95
12.5	10635.49	68.33	8088.64	51.97	8527.08	54.79
13.0	11961.42	79.93	9004.60	60.17	9466.59	63.26
13.5	13005.66	90.25	10040.39	69.67	10533.32	73.09
14.0	13684.8	98.48	11173.61	80.41	11668.64	83.97
14.5	14380.48	107.18	12373.23	92.22	12825.18	95.59
15.0	15092.63	116.36	13605.76	104.90	13971.56	107.72

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar los valores para $Fr < 0.3$, son muy parecidos a los estimados por el método de Sahoo, por lo que tomaremos el mayor valor de estos métodos, y le sumaremos un 15%, por efectos del viento y otros que no han sido considerados.

Tabla 3.25.- Valores de resistencia en aguas tranquilas

Velocidad en aguas Tranquilas [kn]	RT Método de Cálculo Holtrop [N]	RT Aguas Tranquilas (Promedio + 15%) [N]
5.0	1244.152	1492.98
5.5	1527.428	1832.91
6.0	1854.342	2225.21
6.5	2227.96	2673.55
7.0	2650.55	3180.66
7.5	3118.766	3742.52
8.0	3639.454	4367.34
8.5	4231.276	5077.53
9.0	4871.398	5845.68
9.5	5503.848	6604.62
10.0	6142.108	7370.53
10.5	6800.724	8160.87
11.0	7542.556	9051.07
11.5	8416.31	10099.57
12	9446.92	11336.30
12.5	10635.49	12762.59
13.0	11961.42	14353.70
13.5	13005.66	15606.80
14.0	13684.8	16421.76
14.5	14380.48	17256.57
15.0	15092.63	18111.16

Fuente: Elaboración propia.

3.9.2. Efectos de Aguas razas

En aguas poco profundas el buque podría no cumplir con la predicción de potencia estimada dependiendo de las dimensiones del buque. El problema de navegación en aguas poco profundas tiene dos principalmente:

- Se produce una modificación del sistema de olas
- Se produce una modificación de la componente viscosa debido al incremento de la velocidad relativa y un incremento de la concentración de las líneas de agua alrededor del buque.

Para el estimar la variación de la resistencia en aguas de poca profundidad se usa el método de *Schlichting*⁹⁸, aunque para nuestro caso y dadas las condiciones geográficas, el diagrama de Schlichting no cubre totalmente los rangos de velocidad, por tanto, los modelos y simulaciones serían una opción viable. Los modelos en CFD y CFX, aproximan los efectos de aguas razas alrededor de un 22 - 27% para condiciones similares⁹⁹.

Considerando un 30 % adicional por efecto de aguas razas, los valores para la resistencia promedio en aguas razas se muestran en la Tabla 3.26.

⁹⁸ Este método se basa en asociar una nueva curva de Resistencia-velocidad asociada al buque en aguas de profundidad h , a partir de una curva análoga obtenida en aguas de profundidad ilimitada.

⁹⁹ Para evitar complicaciones en los cálculos preliminares, la tesis: "Diseño preliminar de una barcaza portacontenedores para la hidrovía Manta-Manaos", Bahamonde Carpio, Luis Enrique; Vaca Romo, Bolívar, Dir. (2015), toma un porcentaje aproximado de 30%.

Tabla 3.26.- Valores de Resistencia en Aguas Razas

Velocidad en aguas Tranquilas [kn]	RT Método de Cálculo Holtrop [N]	RT Aguas Tranquilas (Promedio +15%) [N]	RT Aguas Tranquilas + Efecto de Aguas Razas [N]
5	1244.152	1492.98	2132.83
5.5	1527.428	1832.91	2618.45
6	1854.342	2225.21	3178.87
6.5	2227.96	2673.55	3819.36
7	2650.55	3180.66	4543.80
7.5	3118.766	3742.52	5346.46
8	3639.454	4367.34	6239.06
8.5	4231.276	5077.53	7253.62
9	4871.398	5845.68	8350.97
9.5	5503.848	6604.62	9435.17
10	6142.108	7370.53	10529.33
10.5	6800.724	8160.87	11658.38
11	7542.556	9051.07	12930.10
11.5	8416.31	10099.57	14427.96
12	9446.92	11336.30	16194.72
12.5	10635.49	12762.59	18232.27
13	11961.42	14353.70	20505.29
13.5	13005.66	15606.80	22295.42
14	13684.8	16421.76	23459.66
14.5	14380.48	17256.57	24652.25
15	15092.63	18111.16	25873.08

Fuente: Elaboración propia

3.9.3. Eficiencias y pérdidas

La resistencia al avance no solo es afectada por el efecto de aguas razas, también es afectada por el rendimiento propulsivo.

El rendimiento propulsivo puede ser expresado por la siguiente expresión:

$$\eta_p = \eta_h \eta_0 \eta_{rr} \eta_m = \frac{EHP}{BHP} \quad (3.28)$$

Para determinar el rendimiento del casco (η_h), usaremos la fórmula aproximada de Taylor, para ello es necesario definir el coeficiente de succión y el coeficiente de empuje, a través de las siguientes ecuaciones:

$$w = 0.5C_b - 0.05 \quad (3.29)$$

$$t = 0.6w \quad (3.30)$$

Para un C_b de 0.45 (monocasco)

$$w = 0.175$$

$$t = 0.105$$

Entonces el rendimiento del casco (η_h) será:

$$\eta_h = \frac{1-t}{1-w} \quad (3.31)$$

$$\eta_h = 1.08$$

Para estimar el rendimiento real de la hélice (η_b), primero estimaremos el rendimiento rotativo relativo (η_{rr}) según BSRA:

$$\eta_{rr} = 0.8372 + 0.1338C_b + 1.5188 \frac{D}{L_{pp}} + 0.124 \frac{P}{D} - 0.1152BAR \quad (3.32)$$

$$\eta_{rr} = 0.993$$

El rendimiento real de la hélice está dado por la siguiente ecuación:

$$\eta_b = \eta_0 \cdot \eta_{rr} \quad (3.33)$$

$$\eta_b = 0.43 * 0.993 = 0.427$$

Entonces, considerando un rendimiento mecánico (η_m) de 0.95, el rendimiento propulsivo (η_p) será:

$$\eta_p = \eta_0 \cdot \eta_{rr} \cdot \eta_h \cdot \eta_m = 0.438 \quad (3.34)$$

Tabla 3.27.- Parámetros para el cálculo de la hélice

DATOS PARA EL CÁLCULO EFICIENCIA¹⁰⁰			
Ítem	Descripción	Cantidad	Medida
BAR	Relación de áreas	0.55	---
P/D	Relación paso diámetro	0.9	---
D	Diámetro de la hélice	0.92	m
C_b	Coef. De Block	0.45	---
L_{pp}	Eslora entre perpendiculares	29.4	---
η_0	Efic. Propulsor aislado	0.43	---
η_b	Rendimiento real	0.427	---

Fuente: Elaboración Propia

3.9.4. Curva RT – V

Una vez obtenido el rendimiento propulsivo, debemos estimar los valores de la resistencia real. Al considerar el rendimiento propulsivo (0.438), la resistencia hallada, según la Tabla 3.26, será incrementada hasta los valores mostrados en Tabla 3.28, cuya grafica se muestra en la Figura 3.6.

La grafica construida a partir de los valores de la Tabla 3.28 será la curva RT vs V, que nos ayudará a seleccionar el motor y la planta eléctrica.

¹⁰⁰ Los cálculos para la selección de la hélice se encuentran desarrollados en la sección Cálculos del propulsor.

Tabla 3.28.- Valores de Resistencia Total

Velocidad en Aguas Tranquilas [kn]	RT Aguas Tranquilas + Efecto de Aguas Razas [N]	RT - Eficiencia propulsiva ($\eta_p=0.438$) [N]
5	2132.83	4869.48
5.5	2618.45	5978.19
6	3178.87	7257.70
6.5	3819.36	8720.00
7	4543.80	10373.97
7.5	5346.46	12206.52
8	6239.06	14244.44
8.5	7253.62	16560.77
9	8350.97	19066.14
9.5	9435.17	21541.48
10	10529.33	24039.56
10.5	11658.38	26617.32
11	12930.10	29520.77
11.5	14427.96	32940.55
12	16194.72	36974.25
12.5	18232.27	41626.19
13	20505.29	46815.73
13.5	22295.42	50902.79
14	23459.66	53560.88
14.5	24652.25	56283.67
15	25873.08	59070.96

Fuente: Elaboración propia

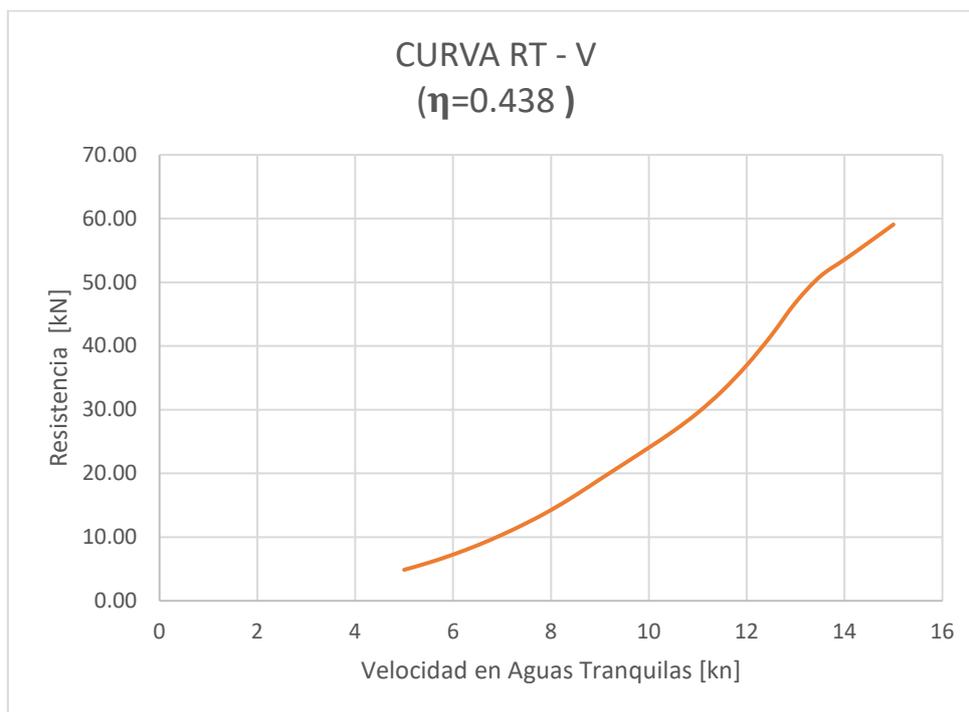


Figura 3.6.- Curva Resistencia Total Vs. Velocidad

Fuente: Elaboración propia

3.10. PLANTA PROPULSORA Y CÁMARA DE MAQUINAS

3.10.1. Estimación de Potencia

3.10.1.1. Curva de Potencia Estimada del Buque

A partir de la gráfica RT vs. V^{101} , vamos a construir la curva Potencia vs V, donde se muestran los valores que debe suplir el motor eléctrico a seleccionar.

Los valores obtenidos para esta parte se muestran a en la Figura 3.7 y la Tabla 3.29.

¹⁰¹ Ver Figura 3.6 y Tabla 3.28.

Tabla 3.29.- Valores de la potencia estimada del motor BHP vs. V

Velocidad [kn]	RT - Eficiencia propulsiva [kN]	Potencia Propulsiva [kW]
5.0	4.87	12.51
5.5	5.98	16.90
6.0	7.26	22.38
6.5	8.72	29.13
7.0	10.37	37.33
7.5	12.21	47.06
8.0	14.24	58.57
8.5	16.56	72.35
9.0	19.07	88.20
9.5	21.54	105.19
10.0	24.04	123.56
10.5	26.62	143.65
11.0	29.52	166.91
11.5	32.94	194.71
12.0	36.97	228.06
12.5	41.63	267.45
13.0	46.82	312.82
13.5	50.90	353.21
14.0	53.56	385.42
14.5	56.28	419.48
15.0	59.07	455.44

Fuente: Elaboración Propia.

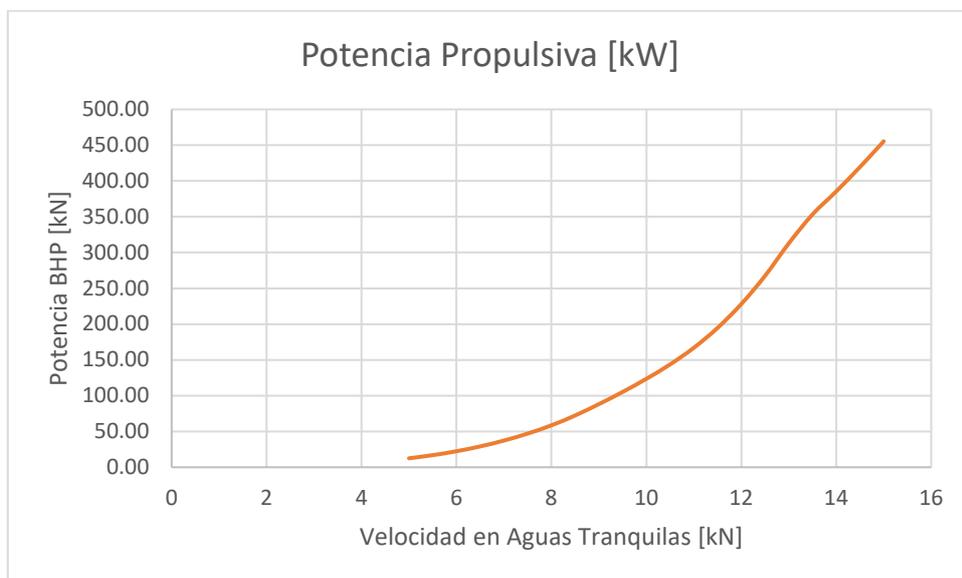


Figura 3.7.- Curva de potencia estimada para el motor – BHP vs V

Fuente: Elaboración Propia

3.10.1.2. Potencia Requerida para la Selección del Motor

Se observa que para 9.5 nudos se requiere aproximadamente de 105.6 kW. Con este rango podemos asegurar una velocidad disponible de 6 nudos en cualquier situación, incluso con una velocidad en contracorriente de 3.5 nudos (1.8 m/s).

Una vez calculada la potencia propulsiva necesaria para la condición de navegación especificada, se debe elegir el motor propulsor, dentro de la gama disponible. La potencia deberá aumentarse en aquellos casos en los que se desee incorporar alguna toma de potencia adicional como PTO (Power Take Off).

Por otra parte, la potencia pico del motor propulsor¹⁰², deberá superar en un 15% (aproximadamente) la potencia calculada, con el objetivo de cumplir los criterios de velocidad exigidos y sobre cargas iniciales, siendo la potencia para la selección de 120 kW aproximadamente.

¹⁰² El motor, antes de su arranque, demanda cierta energía para poder arrancar. Esto se traduce en una demanda energética corta que generalmente se estima en un 15% de la potencia de trabajo.

3.10.2. Línea Propulsiva

La línea propulsiva se está embarcación es de tipo convencional¹⁰³, cada elemento que conforma la línea propulsiva debe ser estimado de acuerdo con la potencia de remolque o EHP que necesita la embarcación. De acuerdo con la curva de potencia estimada para el motor, se tiene que la potencia requerida es de 105 kW (potencia continua) y 120 kW como potencia máxima, para desarrollar la velocidad de operación de 6 nudos como mínimo.

3.10.2.1. Propulsión con motor eléctrico

Para la propulsión de la embarcación se requiere de un conjunto de elementos que convierten la energía eléctrica acumulada en las baterías en la fuerza necesaria para desplazarla. En la Figura 3.8, se muestran los elementos que componen este tipo de propulsión.

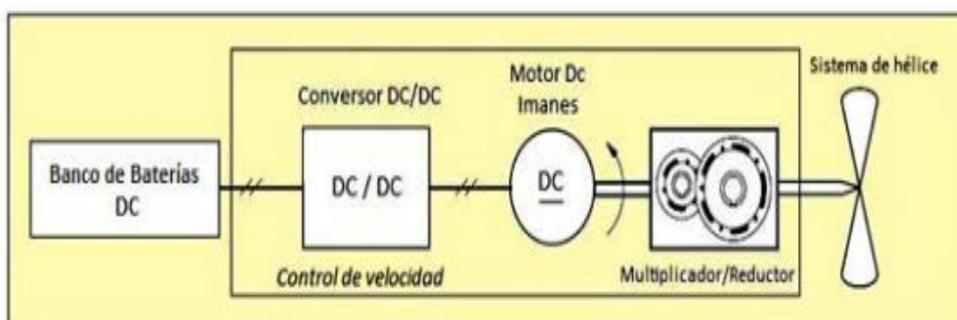


Figura 3.8.- Esquema de propulsión DC

Fuente: Imagen Disponible en Internet

La parte activa de la propulsión, es un motor de corriente continua de imanes permanentes, que recibe la alimentación del banco de baterías instalado en la embarcación. La regulación de velocidad se efectúa mediante un convertidor DC/DC que modula la señal de entrada al motor para variar su régimen de giro.

¹⁰³ Una propulsión de tipo convencional consta de motor, caja, eje de propulsión y hélice, como elementos principales.

Por último, un sistema mecánico reductor adapta la velocidad de giro del motor a la requerida por la hélice que proporciona el empuje al barco.

La propulsión eléctrica puede tener variantes al usar motores eléctricos AC en lugar de un motor DC¹⁰⁴, siendo necesario un inversor. La Figura 3.9 detalla los componentes de la propulsión eléctrica con motores AC.

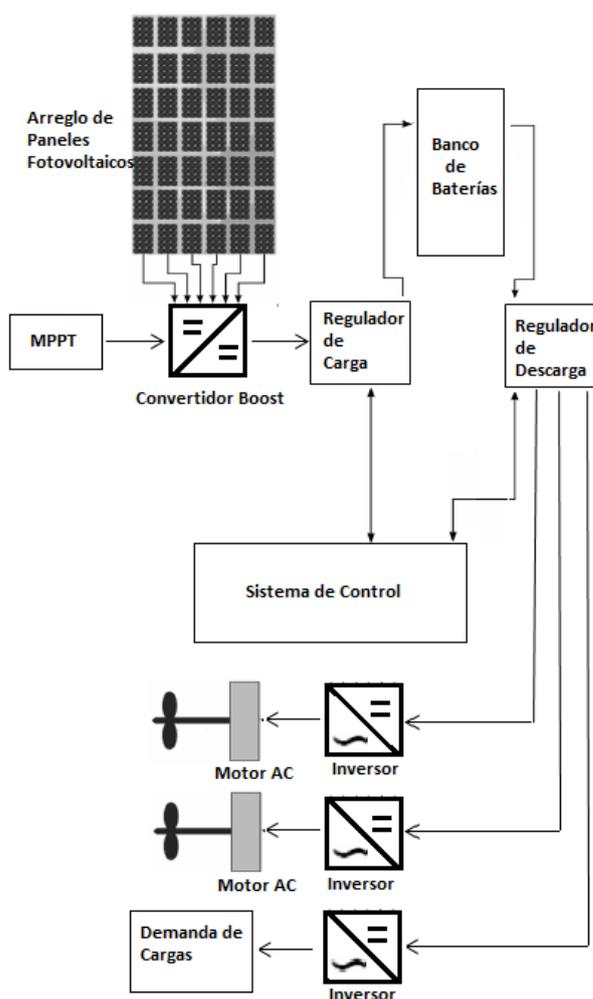


Figura 3.9.- Esquema de Propulsión AC

Fuente: Imagen disponible en Internet¹⁰⁵

¹⁰⁴ La propulsión con un Motor DC se vio con mayor detalle en el Capítulo II.

¹⁰⁵ Tomado de “*Solar Electric Boat*”, Department of Electronic Engineering, University “*Roma Tre*”, Roma, Italy.

Cada uno de estos sistemas presenta ventajas y desventajas, que analizaremos a la hora de elegir el motor para nuestra embarcación. A continuación, se va a determinar qué tipo de tecnología es la más adecuada para la propulsión de la embarcación.

Analizando las tecnologías disponibles sobre motores eléctricos se observa la oferta es muy extensa, por ello el primer paso es discriminar cual se adapta mejor a las necesidades.

En primer lugar, mencionar tres aspectos que fundamenta dicha selección.

- Relación Tensión-Velocidad lo más lineal posible
- Sistema con aprovechamiento de energía óptimo
- Dentro de las posibilidades que tenga un bajo mantenimiento

Con estos datos de partida se han seleccionado dos tipos de motores: de corriente continua y de corriente alterna. Dentro de ambas categorías se optado por motores con relativa simplicidad, robustos y de uso extendido.

Tabla 3.30.- Ventajas y desventajas de motores eléctricos

	Motor DC (Imanes Permanentes)	Motor AC (Rotor jaula de ardilla)
Características del Motor	Tiene par de Arranque más elevado.	Su construcción es más simple
	Rendimientos aproximados al 90%	Menores Perdidas y por tanto mejores rendimientos.
	Es más Costoso	Por su uso más extendido, es más económico.
Control de velocidad	Regulación de Velocidad Simple	Regulación de velocidad más compleja
Alimentación	Con sistemas Fotovoltaicos es directa.	Con sistemas fotovoltaicos requiere un inversor.
Mantenimiento Eléctrico	Para los I.P. Requiere poco mantenimiento.	Generalmente no requiere.

Fuente: Jiménez (2010)

Existen “pros y contras” para los dos tipos de motores, pero cabe tener en cuenta que la entrada de alimentación desde las baterías es en corriente continua. El control de velocidad en motores de corriente continua es menos complejo, además el uso de un inversor supone una pérdida de al menos 8% de la potencia entrega. Con ello, tenemos dos factores que determinan al sistema de propulsión con motor de corriente continua, como la alternativa que va a utilizar para la embarcación.

Dentro del amplio abanico de este tipo de motores, se ha investigado sobre modelos concretos de motores de corriente continua destinados a la propulsión naval. Modelos como las que presenta Torquedo ofrecen una variedad de sistemas eléctricos, híbridos y equipamiento para embarcaciones con propulsión eléctrica

La potencia requerida total es de 120 kW, por ello se ha seleccionado dos motores eléctrico DC, asíncrono de imanes permanentes de 65 kW @ 1800 RPM, con regulación de velocidad incluido, el modelo será Deep Blue 80.¹⁰⁶

3.10.2.2. Regulación

La transmisión será directa con acoplamientos estándar, debido a que los motores eléctricos DC del modelo elegido, cuentan con un regulador de velocidades acoplado a la salida del eje motor.

Para el control de velocidad del motor, se va a utilizar un regulador electrónico de ancho de pulso PWM. Actualmente uno de los sistemas de regulación más utilizados, con grandes posibilidades para realizar sistemas de control automático con lazo cerrado. Como se explicó en la descriptiva de tecnologías; es un dispositivo que modula la señal de entrada de continua que alimenta el motor, mediante transistores de potencia IGBT. Convierte la señal y genera micropulsos que permiten variar la cantidad de energía que se entrega. Debido

¹⁰⁶ Las características de este motor y manuales de conexión pueden descargarse en <http://media.torquedo.com/downloads/manuals/torquedo-deep-blue-i-manual.pdf>.

a la dependencia lineal entre la tensión de alimentación del motor y su velocidad, se ha optado por este tipo de control.

Los detalles del sistema de control de su homólogo de menor potencia, a nivel funcional es idéntico a uno de 48 V. Dichas características se detallan a continuación.

- Se trata de un convertidor DC/DC con modulación de ancho de pulso PWM, capaz de generar pulsos hasta un rango de frecuencias de 18 kHz.
- Tiene un control de velocidad muy preciso, con un rango de regulación de 0 a 48V, que traducido a velocidad sería 45rpm del motor.
- Adicionalmente dispone de protecciones para sobrecargas del motor, o niveles de sobretensión o intensidad desde las propias baterías.
- En cuanto a dimensiones, posee la ventaja de su bajo peso, menor a 2kg.

3.10.2.3. Transmisión

El eje de transmisión o eje de propulsión debe ser acotado tanto en sus dimensiones principales como en las demás piezas que puedan ser necesarias para su instalación.

- Longitud de propulsión: 4 m desde el acoplamiento del motor hasta el cubo de la hélice.
- Inclinación del eje: 4° como máximo (el acoplamiento permite hasta 10°)
- Material: Acero Aqualloy
- Tipo de eje: Eje de Cola de 2 ½ in.
- Conexiones y maquinado de acuerdo con las necesidades del motor.

El diámetro mínimo del eje propulsor de acuerdo con norma es obtenido mediante la siguiente expresión:

$$D \geq F \cdot k \cdot \left[\frac{P}{n \cdot (1-Q^4)} \cdot \frac{560}{Rm+160} \right]^{1/3} \quad (3.25)$$

$$D \geq 46.91 \text{ [mm]}$$

Tabla 3.31.-Valores para el cálculo del eje de propulsión

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR
Diámetro requerido	D	46.91
Factor Requerido [di/do]	Q	0
Diámetro interno	di	0
Diámetro Externo del eje	do	
Factor de Propulsión	F	90
Factor Requerido	K	1.1
Factor de material	Rm	600
Potencia KW	P	65
Revoluciones [rpm]	n	450

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que la regulación del motor es mediante un controlador y un regulador de acople, permitiendo regular el número de revoluciones, no se requiere una caja reductora, pero debemos limitar el número de revoluciones a 450, a fin de aminorar el fenómeno de cavitación.

3.10.3. Cálculo del Propulsor

El propulsor por diseñar debe de cumplir con ciertos requerimientos para que se pueda emplear, ya que hay que considerar que la embarcación va a operar en rangos de velocidad bajos, siendo la de operación de 6-9.5 nudos.

El principal problema que existe en la estimación de la hélice es que esta desarrolle el empuje necesario para llegar a la velocidad deseada, que no cavite, y por último que su dimensión este dentro del espacio máximo existente para su ubicación. Es por ello que se utilizará las formulaciones de Keller¹⁰⁷ y los diagramas de la serie B de Wageningen¹⁰⁸, para poder estimar la hélice óptima para la embarcación, luego analizar la hélice más cercana a la óptima existente dentro del mercado.

3.10.3.1. Cálculo del Diámetro Máximo

Es común el uso de hélices de 4 palas en embarcaciones típicas, a razón del poco calado y del uso de dos motores. Para tener las medidas principales de la hélice se considerará el espacio máximo que se tiene para que esta pueda entrar, la cual es de 1.2 m aproximadamente. Considerando las distancias de protección de la hélice¹⁰⁹, en función de un % del diámetro de la hélice, tenemos una reducción de hasta 1 m.

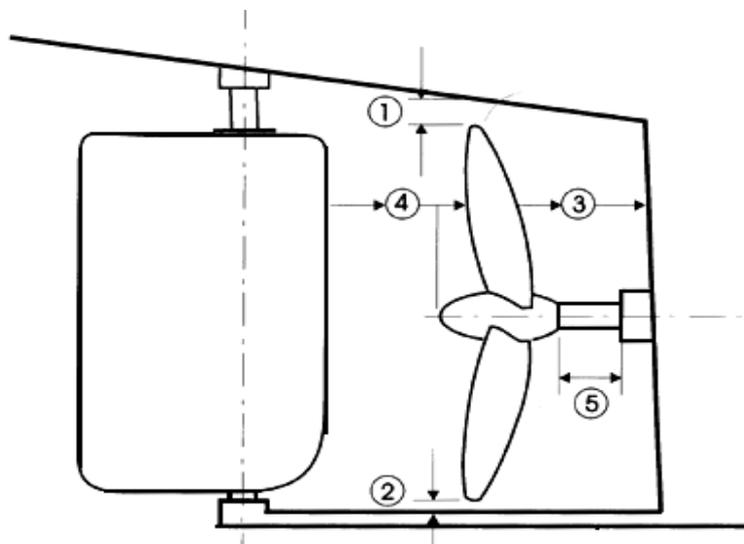


Figura 3.10.- Distancias de protección para la hélice

Fuente: Smith, Lapp y Sedat, 1985

¹⁰⁷ Cálculo de relación de áreas mínimas que evite cavitación.

¹⁰⁸ Series sistemáticas para el cálculo y dimensionamiento de Hélices.

¹⁰⁹ Según Smith, Lapp y Sedat (1985), en un estudio publicado por la FAO.

Tabla 3.32.- Distancias de protección de la hélice

DISTANCIAS DE PROTECCIÓN DE LA HÉLICE		
Ítem	Descripción	% $D_{Hélice}$
1	Distancia mínima entre las puntas de las palas y el casco. ¹¹⁰	15 %
2	Distancia mínima entre las puntas de las palas y la quilla.	4 %
3	Distancia mínima entre el dormido de popa y la hélice a un 35 % del diámetro de la hélice. ¹¹¹	25%
4	Distancia máxima entre la hélice y el timón a un 35 % del diámetro de la hélice.	10 %
5	Distancia máxima al extremo del eje libre.	4 D_{eje}

Fuente: Smith, Lapp y Sedat, 1985

Ahora, mediante el método de hélice de Crouch¹¹², determinaremos un diámetro y paso preliminar, para luego determinar los parámetros geométricos de nuestra hélice.

En la Figura 3.11, se muestra el gráfico para calcular el paso en función de la velocidad de la embarcación y los rpm de la hélice (para más detalles, véase Gerr, 1989).

Para leer los gráficos se debe encontrar en el eje horizontal el valor de los rpm correspondientes al rpm de la hélice a velocidad de crucero. Luego se debe trazar una línea vertical hasta encontrar la curva correspondiente a la velocidad de crucero necesaria. Desde ese punto de intersección se traza una línea horizontal hasta llegar al eje de la izquierda, donde se puede leer el paso.

¹¹⁰ Distancia en función del número de palas $d = 0.23 - (0,02 \times n)$.

¹¹¹ Distancia en función del número de palas $d = 0.33 - (0,02 \times n)$.

¹¹² Método empírico y fórmulas desarrolladas por George Crouch, pero algunos procedimientos se han simplificado mediante la integración de fórmulas derivadas por Dave Gerr (Gerr, 1989). Los gráficos ayudan a evaluar rápidamente un diseño determinado de una hélice existente o propuesta, pero no sirven para hacer un diseño detallado. Su aplicación se limita a las hélices de tres palas, de sección ojival (cara anterior plana con una curva simétrica en el dorso) y una razón del ancho medio de las palas de 0,33.

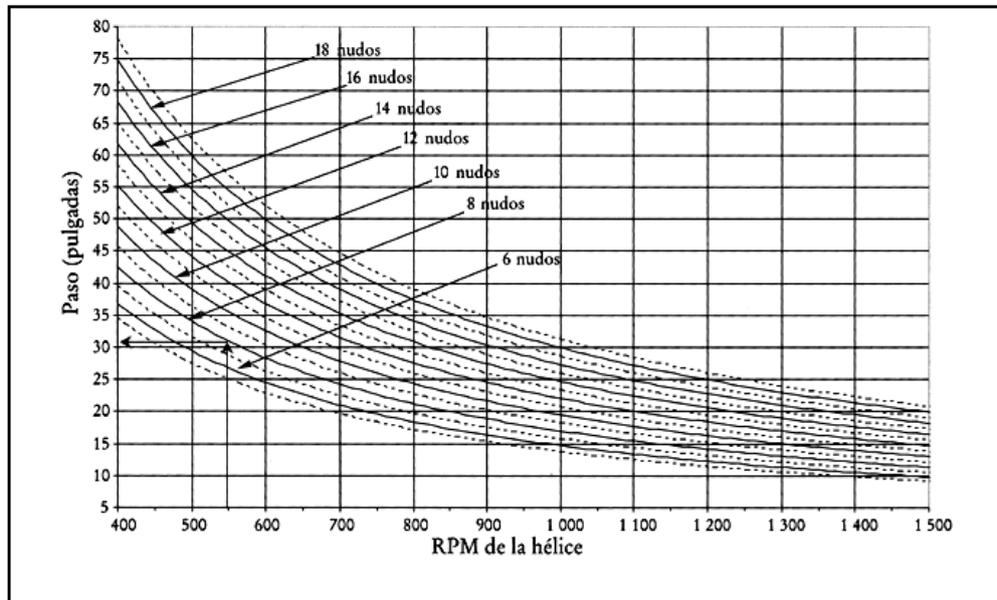


Figura 3.11.- Gráfico de Paso, método de Gerr

Fuente: Gerr (1989)

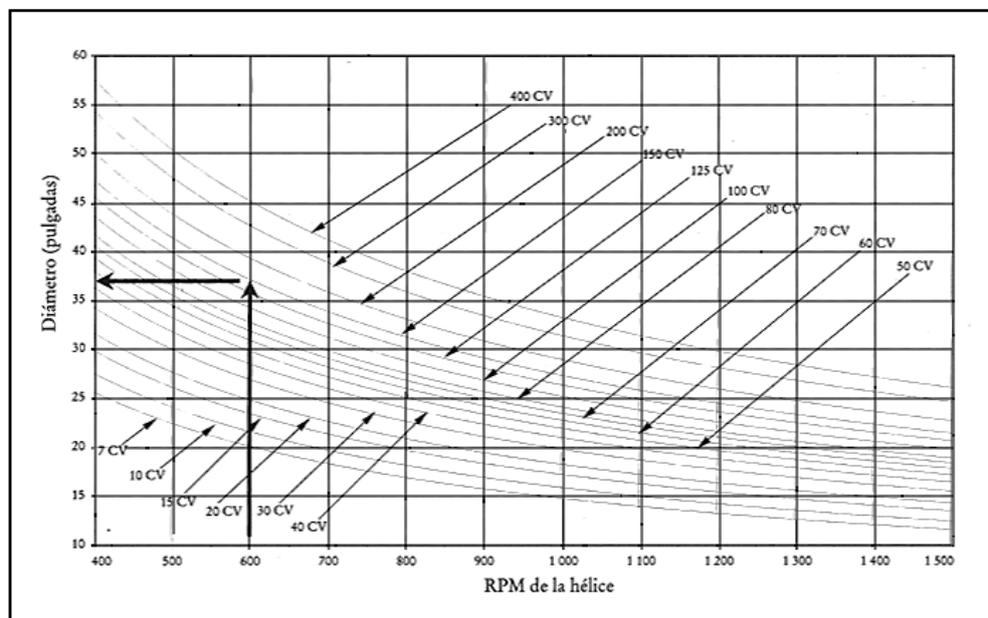


Figura 3.12.- Diámetro de hélice, según Gerr

Fuente: Gerr (1989)

Con los rpm y la potencia entregada por el motor, podemos determinar el diámetro de la hélice como se indica en la Figura 3.12.

Para nuestro caso, la embarcación permite en régimen de navegación regular de 80 CV aproximadamente para a cada una de las dos hélices. Además, Incrementando la relación de transmisión en el control de regulador del motor Deep blue 80, podemos llegar hasta un poco más de 400 rpm como límite máximo. Con esto, debemos elegir un paso y un diámetro correcto que permita tener el mayor permitido para 6 kn y uno disponible para 9.5 kn sin sobrepasar el límite de regulación permitido ni la distancia máxima permitida.

Al realizar este procedimiento, con una regulación de 450 rpm, 6 kn y una potencia de 80 CV, una hélice de 3 palas con 34 pulgadas de paso y un diámetro de 38 pulgadas. Si se quiere cambiar una hélice existente para tratar de reducir o de aumentar la carga del motor, las siguientes reglas generales pueden ser útiles. Para determinar el paso y el diámetro de una hélice de dos o de cuatro palas, se multiplican los resultados por los factores indicados en la Tabla 3.33.

Tabla 3.33.- Ajustes para paso y diámetro de hélices

AJUSTES DEL PASO Y DEL DIÁMETRO PARA HÉLICES DE DOS Y DE CUATRO PALAS¹¹³		
Ítem	Diámetro	Paso
Hélice de dos palas	1,05	1,01
Hélice de cuatro palas	0,94	0,98
<ul style="list-style-type: none"> - 1 pulgada de diámetro absorbe el par de torsión de 2 a 3 pulgadas de paso. - 2 pulgadas de paso reducen la velocidad de rotación del motor en 450 RPM (muy aproximadamente). - Una hélice cuyo paso sea igual al diámetro no tiene nada de especial ni es necesariamente la mejor. - Si las RPM de la hélice se reducen a la mitad y el diámetro se aumenta en una tercera parte, la eficiencia aumenta en una cuarta parte.¹¹⁴ 		

Fuente: Gerr (1989)

Para nuestro caso, se tendría una hélice de cuatro palas, el paso es igual a $34 \times 0,98 = 33,3$ pulgadas, y el diámetro es igual a $38 \times 0,94 = 35,7$ pulgadas. Preliminarmente, tendríamos un diámetro de 0.91 y un P/D de 0.93. Este será

¹¹³ Fuente: Gerr, 1989.

¹¹⁴ Fuente: Gerr, 1989 y Aegisson y Endal, 1992.

nuestro valor inicial para evaluar los parámetros en la curva de coeficientes de la serie B de Wageningen.

3.10.3.2. Estimación de Coeficientes Propulsivos

Los coeficientes propulsivos para el cálculo del propulsor están conformados por el coeficiente de estela (w) y el Coeficiente de deducción de empuje (t), cuando se estimó la eficiencia propulsiva se usó la aproximación de Taylor, de modo que:

$$w = 0.5C_b - 0.05 = 0.175 \quad (3.26)$$

$$t = 0.6w = 0.105 \quad (3.27)$$

Del mismo modo la eficiencia del casco:

$$\eta_h = \frac{1-t}{1-w} \quad (3.28)$$

$$\eta_h = 1.08$$

3.10.3.3. Cálculo del Área-Diámetro

Para poder definir los propulsores hay que calcular la presión que actúa sobre la cara activa de las palas, para de este modo poder determinar la relación Área – Diámetro de las hélices. Este cálculo se realiza para evitar que el propulsor este sobrecargado, lo que provocaría una pérdida de empuje. La relación de áreas es una variable importante para el desarrollo del empuje y evitar la cavitación.

Cuando se está en condición de navegación libre, se estima que la carga de empuje en la pala no debe superar el valor de 8 psi (0.55 MPa).

Esta carga viene dada por la siguiente expresión:

$$P = \frac{\text{Empuje Desarrollado}}{\text{Area de la Hélice}} \quad (3.29)$$

El empuje desarrollado por la hélice se estima en una primera aproximación como:

$$T = \frac{326.DHP.\eta_0}{V(1-w)} [libras] \quad (3.30)$$

$$= \frac{145.73.DHP.\eta_0}{V(1-w)} [kg]$$

El rendimiento del propulsor se consigue dividiendo el rendimiento en aguas libres, que se tomará igual a 0.43¹¹⁵ y en el rendimiento mecánico, que tomaremos como igual a 0.95, como anteriormente hemos tomado.

Si la relación entre DHP y el BHP (consideraremos los 60 kW <> 80 CV, como potencia máxima que puede entregar el motor eléctrico), se da bajo la siguiente expresión:

$$DHP = \frac{BHP}{\eta_{mec.}} \quad (3.31)$$

Introduciendo estos valores en la fórmula del empuje se tiene:

$$T = \frac{145.73*80*0.95*0.43}{6(1-0.175)} [kg] \quad (3.32)$$

$$T = 962.1 [kg] = 2121.1 [lb]$$

El área desarrollada para que la carga del empuje de la pala sea inferior a los 8 psi será:

$$A_E = \frac{T}{8} = 265.1 \text{ in}^2 = 0.171 \text{ m}^2 \quad (3.33)$$

El área del disco de la hélice de 0.92 m es:

$$A_D = \pi \frac{D^2}{4} = 1031 \text{ in}^2 = 0.665 \text{ m}^2 \quad (3.34)$$

Entonces, la relación área disco será:

$$\frac{A_E}{A_D} = \frac{0.171}{0.665} = 0.26 \quad (3.35)$$

¹¹⁵ De acuerdo con las curvas de Wageningen B4.55.

Se tomará un margen de seguridad del 10%, por lo que la relación Área - Diámetro final quedará expresada en:

$$\frac{A_E}{A_D} \cong 0.3 \quad (3.36)$$

Esta será la relación de áreas mínimas para el torque que desarrollan ambas hélices¹¹⁶, aunque aún debemos evaluar la condición de cavitación.

3.10.3.4. Cavitación

La cavitación debe ser estudiada a fin de evitar sobrecarga en la hélice y erosión en la superficie de la pala, debido a la diferencia de presión.

El material tiende a debilitarse estructuralmente y se inicia una erosión que, además de dañar la superficie, provoca que ésta se convierta en una zona de mayor pérdida de presión y por ende de mayor foco de formación de burbujas de vapor.

El fenómeno generalmente va acompañado de ruido y vibraciones, dando la impresión de que se tratara de grava que golpea en diferentes partes de una máquina.

La relación de área mínima para evitar la cavitación en una hélice, según Keller¹¹⁷, se estimará de acuerdo con la siguiente formula:

$$BAR = \frac{(1.3+0.3Z)T}{(P_o+P_v)D^2} + k \quad (3.37)$$

La Tabla 3.34 muestra los valores para la estimación del área mínima de pala para evitar la cavitación acelerada de la hélice. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.35.

¹¹⁶ En caso de que solo funcione un motor, y posee mayor capacidad de Potencia la relación de áreas se duplica.

¹¹⁷ Keller, J.auf'm.enige Aspectenbij het Ontwerpen van Scheepsschroeven.Schip en Werf, No.24, 1996, articulo en francés.

Tabla 3.34.- Datos para el cálculo de BAR mínimo de la Hélice

DATOS PARA EL CALCULO DE BAR			
Ítem	Descripción	Cantidad	Medida
T	Empuje Max.	9.4	kN
Z	Número de Palas	4	---
H	Inmersión del eje	0.6	m
D	Diámetro Máx. Posible	0.92	m
P. Atm	Presión Atmosférica	101.337	kPa
P. Hidrostática	Presión Hidrostática	5.89	kPa
P_o	P. Atm + P. Hidrostática	107.22	kPa
P_v	Presión de Vapor a 25°C	3.17	kPa
P	Densidad del agua dulce	1.000	ton/m ³
K	Coficiente de Seguridad	0.2	

Fuente: Elaboración propia

Al reemplazar, tenemos:

Tabla 3.35.- BAR requerido de la Hélice

BAR REQUERIDO PARA EL DISEÑO DE LA HELICE		
Ítem	Descripción	Medida
BAR Requerido	Relación de Áreas	0.47
BAR Disponible.	Relación de Áreas	0.55

Fuente: Elaboración propia

Se ha elegido una relación de áreas de 0.55, a fin de aminorar la posible cavitación que sufra la hélice y de modo que pueda ser adquirida comercialmente.

3.10.3.5. Cálculo de las Revoluciones y Relación de Paso-Diámetro

A partir de las curvas Kt-Kq de la serie B de Wageningen para el tipo B4.55, se determinará los coeficientes y parámetros de hélices, para garantizar la mayor eficiencia de la hélice en aguas tranquilas.

Trazaremos la curva $K_t - J^2$, cuyos valores se determinan a partir de las siguientes formulas:

$$K_t = C \cdot J^2 \quad (3.38)$$

$$C = \frac{T}{\rho \cdot D^2 \cdot V_a^2} \quad (3.39)$$

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (3.40)$$

$$V_a = V (1 - w) \quad (3.41)$$

Al realizar los cálculos, con los valores hallados anteriormente, se tiene la siguiente gráfica y tabla de valores, considerando una relación K_t/J^2 igual a 1.72.

Tabla 3.36.- Valores de K_t Vs. J^2

CURVA $K_t - J^2$	
K_t	J
0.0686	0.2
0.2745	0.4
0.6176	0.6
1.0980	0.8
1.7156	1.0
2.4705	1.2
3.3626	1.4

Fuente: Elaboración propia

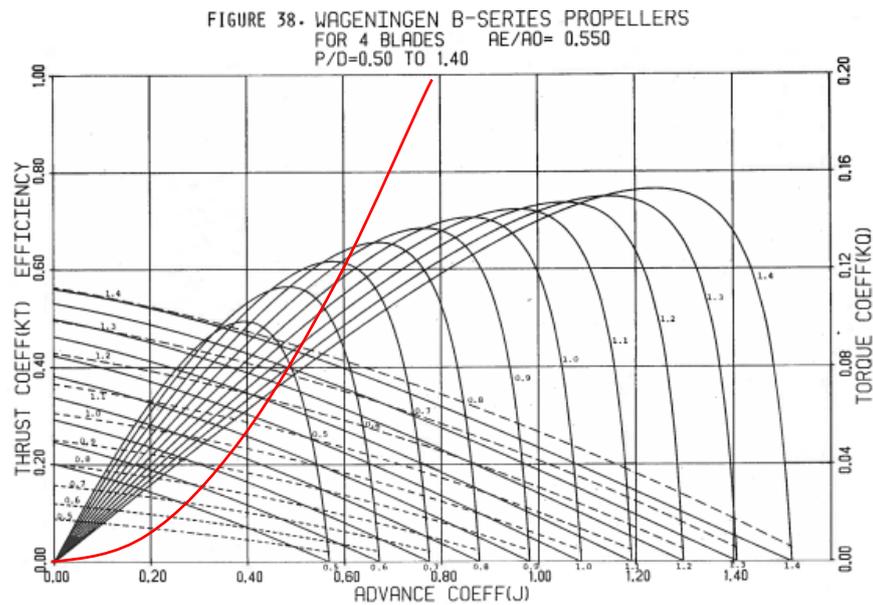


Figura 3.13.- Curva K_t vs J^2

Fuente: Wageningen B - Series Propellers

De esta manera, el diámetro elegido será de 0.92 m, P/D de 0.9, con un valor máximo de eficiencia de la hélice en aguas tranquilas de 0.43, cuyas características se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.37.- Características de la Hélice

CARACTERÍSTICAS DE LA HÉLICE		
Parámetro	Valor	Unidad
n_o	0.43	---
Diámetro	0.92	m
P/D	0.9	
z	4	palas
Relación de Áreas	0.55	

Fuente: Elaboración propia

3.10.4. Cálculo del Timón

El timón será del tipo convencional, por lo tanto, la forma y disposición no tendrán gran novedad. Los timones de tipo convencional poseen un soporte en la base que se denomina talón de codaste. El perfil del timón será de la serie NACA 0015.

Nos centraremos en definir las características del timón, su geometría y el análisis de fuerzas y momentos actuantes sobre él.

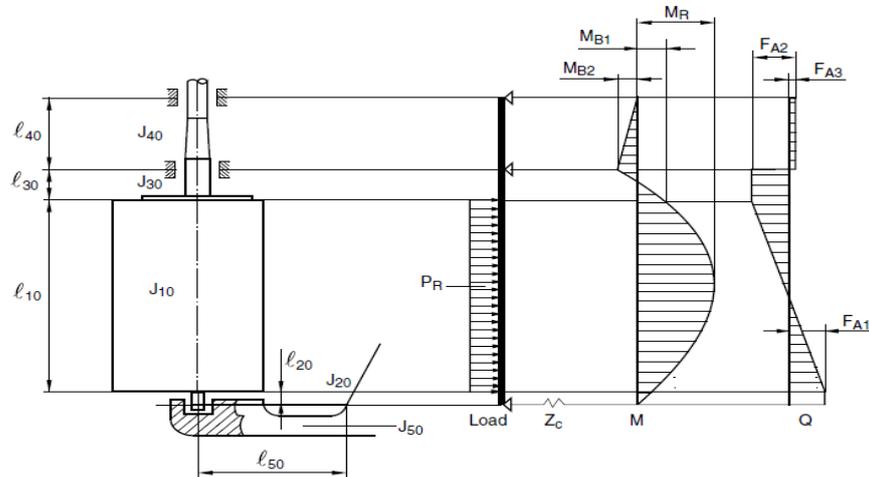


Figura 3.14.- Timón soportado por talón de codaste

Fuente: NR127 Part B, Cap. 7, Sec1, 5.1.2

3.10.4.1. Geometría del timón

La geometría de la pala está queda definida al determinar la altura del timón (h), el espesor máximo (t) del perfil de la pala, la medida de la cuerda media (c), su relación de alargamiento (λ) y el área del timón (A_R).

De acuerdo con Antonio Baquero¹¹⁸, la altura del timón está determinada por la altura del vano del codaste (H), que en nuestro caso es de 1.2 m. guardando algunas distancias mínimas entre la bovedilla y la línea base.

Distancia mínima entre la bovedilla y el canto alto del timón:

$$h_1 = 6\%H \quad (3.42)$$

Distancia mínima entre la línea base y el canto bajo del timón:

$$h_2 = 8\%H \quad (3.43)$$

¹¹⁸ Tesis doctoral: "Análisis del comportamiento del buque bajo acción del timón. Aspectos Hidrodinámicos y de proyecto", ETSIN, 1981.

Entonces, la altura máxima queda definida como:

$$h_{max} = H - 14\%H = 1.032 \text{ m} \quad (3.44)$$

La altura elegida del timón será de 1 m.

Para determinar el área de pala de cada monocasco, consideraremos las recomendaciones de dos autores. De acuerdo con Antonio Baquero¹¹⁹, el área mínima del timón que se diseña con un menor peso del timón y mayores huelgos en el codaste. Puede aproximarse a través de la siguiente expresión:

$$A_R = \frac{L_{pp}T}{100} \cdot \left(1 + 25 \left(\frac{B}{L_{pp}}\right)^2\right) \quad (3.45)$$

$$A_R = 0.4 \text{ m}^2$$

Según Juan Baader¹²⁰, el porcentaje del área de la pala debe, como mínimo, ser el 2% del área proyectada longitudinalmente del buque, hasta un 5% para mejorar la maniobrabilidad. El área proyectada longitudinalmente tiene 20.34 m², considerando un 3.5% en promedio, el área de la pala sería de 0.71 m².

Finalmente, el área de la pala que se elige será 0.71 m².

Para estimar la cuerda¹²¹, se relaciona la altura (h_{max}) y el área del timón (A_R), de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$A_R = h_{max} \cdot C \quad (3.46)$$

$$C = 0.71 \text{ m}$$

La relación de alargamiento tomará los valores comprendidos entre 1.4 y 2¹²², de acuerdo con la siguiente expresión:

¹¹⁹ Tesis doctoral: "Análisis del comportamiento del buque bajo acción del timón. Aspectos Hidrodinámicos y de proyecto", ETSIN, 1981.

¹²⁰ Tomado del libro "Cruceiros y Lanchas Veloces: su dinámica, propulsión y navegación", 1951

¹²¹ Antonio Baquero (1981).

¹²² Según Antonio Baquero, el límite inferior tiene por objeto que el par en la mecha no sea demasiado grande, mientras que el superior, a fin de evitar que se produce un desprendimiento de flujo.

$$\lambda = \frac{h_{max}}{c} = 1.4 \quad (3.47)$$

El espesor de la pala (t) se debe encontrar entre 0.15 y 0.23, de modo que el ángulo de desprendimiento (δ_d) sea mayor a 35° y favorezca al flujo. El espesor de la pala se puede calcular de acuerdo con la siguiente expresión:

$$t = E \cdot C = 0.23 \text{ m} \quad (3.48)$$

$$E = \frac{0.23}{0.71} = 0.324 \text{ m}$$

Para evitar un aumento del par en la mecha del timón y la notable pérdida de la efectividad de la maniobra que se genera por efectos de un pequeño ángulo de desprendimiento, debemos garantizar para la zona de trabajo del timón, que el ángulo sea mayor de 35° . El ángulo de desprendimiento (δ_d) se calculará de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\delta_d = 7.11(1 + 7E) \left(1 + \frac{1.25}{\lambda}\right) \left(1 + 0.048 \sqrt{\ln\left(1 + \frac{8KT}{\pi J^2}\right)}\right) \left(\frac{h}{D_p}\right) \quad (3.49)$$

$$\delta_d = 7.11(1 + 7(0.324)) \left(1 + \frac{1.25}{1.4}\right) \left(1 + 0.048 \sqrt{\ln\left(1 + \frac{8}{\pi}(1.72)\right)}\right) \left(\frac{1}{0.92}\right)$$

$$\delta_d = 51.66^\circ$$

3.10.4.2. Fuerza actuante en el timón

La fuerza actuante sobre el timón, de acuerdo con la Norma NR217 – Part B, Ch. 7, Sec. 1, 2.1.2, se estima mediante la siguiente fórmula:

$$C_r = 28.86(1 + n)^{0.15} AV^2 r_1 r_2 r_3 [N] \quad (3.50)$$

$$C_{r \text{ retroceso}} = 7670 [N]$$

$$C_{r \text{ avante}} = 6136.1 [N]$$

Tabla 3.38.- Valores para el cálculo de la fuerza actuante en el Timón

PARÁMETROS DE LA FÓRMULA		
Parámetro	Valor	Unidad
Coefficiente de navegación (n)	0.51	---
Área de la pala (A)	0.71	m ²
Velocidad (V) ¹²³	17.6	km/h
Factor de forma (r_1)	1.136	---
Coefficiente (r_2) - Avante	0.8	---
Coefficiente (r_2) - Retroceso	1	---
Coefficiente (r_3)	1	---

Fuente: Elaboración Propia.

3.10.4.3. Momento Torsor del timón

El momento torsor actuante sobre el timón, de acuerdo con la Norma NR217 – Part. B, Ch. 7, Sec. 1, 2.1.3, se estima mediante la siguiente fórmula:

$$M_{TR} = C_r r [N.m] \quad (3.51)$$

$$r = b \left(\alpha - \frac{A_F}{A} \right) \geq 0.1b \quad (3.52)$$

Tabla 3.39.- Valores para el cálculo del momento actuante en el Timón

PARÁMETROS DE LA FÓRMULA		
Parámetro	Valor	Unidad
Fuerza actuante en avante	6136.1	N
Fuerza actuante en retroceso	7670	N
b	0.71	m
α en condición de avante	0.33	---
α en condición de retroceso	0.66	---
A_F	0.186	m ²
A	0.71	m ²

Fuente: Elaboración Propia.

¹²³ De acuerdo con norma, la velocidad no debe ser menor a 8 km/hr. El rango de operación de la embarcación es de 6-9.5 kn, es decir de 11-17.6 km/hr.

Al evaluar, para la condición de retroceso y avante, se tiene:

$$M_{TR \text{ retroceso}} = 2167.9 \text{ [N.m]}$$

$$M_{TR \text{ avante}} = 435.7 \text{ [N.m]}$$

3.10.4.4. Dimensionamiento de la mecha del timón

El eje de la mecha del timón será calculado a través de la siguiente expresión:

$$d_{TF} = 4.2(M_{TR}K_1)^{1/3} \left[1 + \frac{4}{3} \left(\frac{M_B}{M_{TR}} \right)^2 \right]^{1/16} \quad (3.53)$$

Considerando los valores máximos, el diámetro de la mecha del timón será:

$$d_{TF} = 4.2(2167.9 * 1.29)^{1/3} \left[1 + \frac{4}{3} \left(\frac{4602}{2167.9} \right)^2 \right]^{1/16}$$

$$d_{TF} = 66.83 \text{ [mm]}$$

Tabla 3.40.- Valores para el cálculo del diámetro mínimo

PARÁMETROS DE LA FÓRMULA		
Parámetro	Valor	Unidad
Momento actuante en retroceso	2167.9	N.m
Momento actuante en avante	435.7	N.m
Factor de norma K_1	1.29	
Momento M_B (retroceso)	4602	N.m
Momento M_B (avante)	261.42	N.m

Fuente: Elaboración Propia

3.10.4.5. Espesor de la plancha del timón

El espesor de la pala del timón será calculado a través de la siguiente expresión:

$$t_f = 5.5 s \beta \sqrt{k \left(T + 0.6n + \frac{C_R}{A} 10^{-4} \right) + 1.5} \quad (3.54)$$

$$t_f = 4.74 \text{ [mm]}$$

Tabla 3.41.- Valores para el cálculo del espesor mínimo

PARÁMETROS DE LA FÓRMULA		
Parámetro	Valor	Unidad
Factor β	0.92	---
Factor k	1.31	---
T	1.1	m
n	0.51	
C_R	7670	N
A	0.71	
Distancia vert. S	0.355	m
Distancia horiz. B_L	0.5	m

Fuente: Elaboración Propia.

3.10.5. Potencia necesaria del Servo

Para calcular la potencia necesaria del servomotor que moverá el timón hay que conocer el momento o par ejercido por el timón.

Se tomará el valor más desfavorable, que para este caso será cuando el catamarán navegue marcha adelante. Este valor se incrementará en un 30% para garantizar que el par es suficiente para realizar cualquier tipo de maniobra.

El par considerado para este cálculo será:

$$M_{TR\ max} = (1 + 0.3)M_{TR} [N.m] \quad (3.55)$$

$$M_{TR\ max} = (1.3)2167.9 [N.m]$$

$$M_{TR\ max} = 2.82 [kN.m]$$

3.10.5.1. Cálculo de potencia Requerida

La potencia necesaria por suministrar a cada una de las bombas se calculará de acuerdo con las normas de la Sociedad de Clasificación, para un

desplazamiento del timón desde 30° a una banda hasta 35° a otra banda, utilizando para ello 28 segundos.

Además, para el cálculo de la potencia de las bombas se incluirá el rendimiento mecánico del sistema de 0.6, la potencia que necesitará la bomba del servomotor será calculada a través de la siguiente expresión:

$$P_{servomotor} = M_{TR\ max} \cdot \omega \cdot \frac{1}{\eta_{mec}} \quad (3.56)$$

$$P_{servomotor} = 2.82 * \left(\frac{(30+35) \cdot \frac{\pi}{180}}{28} \right) * \frac{1}{0.6}$$

$$P_{servomotor} = 0.2 \ [kW]$$

La bomba será accionada por un motor eléctrico cuyo rendimiento promedio será de 0.8. Por lo tanto, la potencia eléctrica necesaria es:

$$P_{eléctrica} = P_{servomotor} \cdot \frac{1}{\eta_{mec}} = 0.25 \ [kW] \quad (3.57)$$

3.11. EQUIPOS Y SERVICIOS

3.11.1. Servicio de Achique y Lastre

El sistema de achique y lastre se encuentra conformado por una serie de válvulas y tuberías que permiten evacuar el agua que se deposita en el fondo de las sentinas de la embarcación. Además, permiten achicar el agua de compartimientos que, al ser inundados, puedan comprometer la integridad y la seguridad de la embarcación.

Todas las embarcaciones deben tener instalado un eficiente sistema de achique, tal que el agua depositada en cualquier compartimento puede ser bombeada hacia afuera o hacia un tanque definido para este propósito.

La embarcación debe contar con un circuito principal y ramales que trabajen unidos para evacuar el agua de la sentina y los espacios estancos, como los piques, además tendrá un sistema de achique independiente para las aguas

grises y aguas negras, que deben ser evacuadas en puerto para su tratamiento. Contará con una electrobomba y una bomba manual de respaldo.

De acuerdo con las disposiciones del MARPOL 73/78, cada buque debe tener un tanque de almacenamiento de aguas grises y negras. Además de tener un medio de achique que debe ser considerado.

Según la norma NR 217 Part C, Ch1, Sec10, se tendrá una bomba de achique. Esta puede ser conectada al motor principal, en nuestro caso, usaremos una electrobomba.

El diámetro interno de la matriz principal de achique se determina de la siguiente manera:

$$D_m = 25 + 1.5\sqrt{L(B + D)} [mm] \quad (3.58)$$

$$D_m = 56.6 [mm]$$

El diámetro interno de los ramales del sistema de achique para cada compartimento se determinará de acuerdo con la siguiente expresión:

$$D_m = 25 + 2\sqrt{l(B + D)} [mm] \quad (3.59)$$

$$D_m = 46.76 [mm]$$

Donde l , es la longitud del compartimento no excederá de 8 m.

Entonces, el diámetro interno de los ramales será de 2 in y el ramal principal de 2 ½ in.

El caudal mínimo de acuerdo con la norma viene dado de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Q_m = \frac{6 D_m^2}{1000} [m^3/hr] \quad (3.60)$$

$$Q_m = 24.2 [m^3/hr]$$

Para determinar la potencia requerida por las bombas de achique, usaremos la siguiente expresión:

$$N_{req.} = \frac{Q \cdot H_m \cdot \gamma}{76 \eta} [Hp] \quad (3.61)$$

La altura manométrica, se calculará según la siguiente ecuación:

$$H_m = H_{est.} + H_{perd.} \quad (3.62)$$

Donde:

- $H_{est.}$: Altura a la que el agua debe llegar, 2.8 m.
- $H_{perd.}$: Altura equivalente a las pérdidas por fricción, tuberías y accesorios.

Para determinar la pérdida equivalente se analizará la distribución de los ramales, siendo el caso más crítico el tendido desde el pique de proa.

Tabla 3.42.- Longitud equivalente de los elementos

Elementos	Cantidad	Long. Equivalente	Total
Válvula Bola	2	20.43	40.86
Codos	5	0.92	4.6
Tubería	1	34	34
		TOTAL	79.46

Fuente: Elaboración Propia

Para este tramo se muestra los elementos considerados, de acuerdo con la Tabla 3.39. Ahora, calculamos la pérdida de carga por m, por efectos de tuberías y accesorios, en conformidad con la tabla de pérdidas de fricción¹²⁴.

Las pérdidas estimadas para la tubería son de 8.8 por cada 100 m, para tuberías de hierro. Para nuestro caso las tuberías pueden ser de acero laminado nuevo o PVC, siendo más factible el uso de tuberías de acero laminado nuevo, de modo que la pérdida sería 7.04 por cada 100 m.

¹²⁴ Ver anexos, fricción en cañerías de rotor pump.

La pérdida total quedará expresada de la siguiente manera:

$$H_{perd.} = \frac{L_T \cdot H_{100} \cdot k}{100} [m] \quad (3.63)$$

Donde:

- K: factor de correlación por calidad de tubería, en nuestro caso 1.

Al reemplazar:

$$H_{perd.} = 5.6 [m]$$

$$H_m = 8.4 [m]$$

Reemplazando en la expresión:

$$N_{req.} = \frac{Q \cdot H_m \cdot \gamma}{76 \eta} [Hp] \quad (3.64)$$

$$N_{req.} = \frac{24.2/3600 \cdot 8.4 \cdot 1000}{76 \cdot 0.55} [Hp]$$

$$N_{req.} = 1.35 \cong 1.5 \text{ Hp} \cong 1 \text{ kW}$$

El sistema de achique tendrá una bomba de 1.5 kW, destinado a su correcto funcionamiento.

3.11.2. Servicio de Agua Dulce

El sistema de agua dulce tendrá en consideración dos tanques de almacenamiento de 1 m³ (uno a cada banda), conectado a un sistema Hidropack (sistema hidroneumático), con el objeto de evitar pérdida de presión por el uso continuo. Este sistema permite el flujo y la presión de agua constante sin importar la distancia desde el tanque de agua dulce al punto de servicio.

Para estimar el caudal de la bomba que aspira el agua para alimentar el tanque hidróforo, se supondrá que en la máxima demanda del consumo diario los dos

aseos, la cocina y duchas estarán en uso con un consumo individual de 0.15 m³/h y una presión de descarga de 5 bar¹²⁵.

El caudal de la bomba será de:

$$Q = 0.15 * 7 = 1.05 [m^3/h]^{126} \quad (3.65)$$

La potencia al eje absorbida por esta bomba será de:

$$P_{eje} = \frac{10000QP}{75*3600*\eta_{mec}} \quad (3.66)$$

$$P_{eje} = \frac{10^4*1.05*5}{270*10^3*0.42} = 0.463 [CV]$$

Donde:

- P: presión de descarga, en bar.
- Q: caudal, en m³/h
- η_{mec} : Eficiencia mecánica

El valor de la potencia absorbida por la bomba será:

$$P_a = \frac{0.735*C_s*P_{eje}}{\eta_e} \quad (3.67)$$

$$P_a = \frac{0.735*1.25*0.025}{0.7} = 0.6[kW]$$

Donde:

- P_{eje} : Potencia al eje absorbida por esta bomba, en CV.
- C_s : Factor de seguridad
- η_{mec} : Eficiencia mecánica

¹²⁵ La presión dentro del sistema hidroneumático es de 5 bar.

¹²⁶ Se ha considerado (2) lavamanos y (1) ducha, por banda y la cocina.

Por tanto, el equipo para suministro de agua sanitaria estará constituido por dos (2) grupos hidróforos, uno para agua dulce y otro para agua salada, compuesto por una electrobomba de 1.5 m³/h a 50 m.c.a. con potencia del motor de 0.6 kW.

3.11.3. Servicio de Aguas Oleaginosas

En la cámara de máquinas se situarán otra serie de elementos para el tratamiento de las aguas aceitosas, que no se pueden verter directamente al mar según lo regulado por MARPOL 73/74.

Las aguas oleaginosas que no se pueden tirar al mar, estas deben almacenarse en los tanques de aguas negras.

Se dispondrá también una brida universal para poder descargar en puerto todo el volumen de fangos y lodos acumulados en el tanque de lodos situado en las sentinas.

Por último, se instalará de una electrobomba de engranajes en cada patín para poder eliminar los residuos en el tanque de reboses. El caudal de la bomba será de 2 m³/h, y su presión de descarga de 2.0 bar.

La potencia al eje absorbida por esta bomba será de:

$$P_{eje} = \frac{10000QP}{75*3600*\eta_{mec}} = \frac{10^3*2*2}{270*10^3*0.42} = 0.352 [CV] \quad (3.68)$$

El valor de la potencia absorbida por la bomba será:

$$P_a = \frac{0.735*C_s*P_{eje}}{\eta_e} = \frac{0.735*1.25*0.352}{0.7} = 0.462 [kW] \quad (3.69)$$

Por tanto, la potencia de la bomba a elegir será de 0.5 kW.

3.11.4. Servicio de Descarga Sanitario

El sistema de aguas grises y negras, también llamado Sistemas de Descargas Sanitarias, este sistema está conformado por una serie de tuberías y codos para recolectar, evacuar y eventualmente purificar todas las aguas servidas que normalmente se generan a bordo, como por ejemplo: uso de lavamanos, duchas, sanitarios, entre otros.

Generalmente, este sistema contempla dos circuitos independientes, evitando mezclar las aguas grises y las negras.

El circuito conformado por la descarga de aguas de lavamanos, lavaplatos, cocina, duchas, etc, o aguas grises, serán descargadas al tanque de aguas grises de 1.5 m³.

El circuito conformado por la descarga de aguas de los servicios higiénicos, WC, aguas de sentinas, también llamadas aguas negras, serán descargadas al tanque de aguas negras de 1 m³.

El servicio sanitario comprende los siguientes elementos:

- Un circuito de agua dulce fría para alimentar a lavabos y bar.
- Un circuito de agua dulce caliente para alimentar a lavabos y bar.
- Un circuito de agua salada que suministrará agua de mar a los inodoros y cámara de máquinas.
- Un circuito de descargas sanitarias de aguas grises que descargan al costado o al tanque de aguas grises, según donde se encuentre navegando en el momento de la descarga.
- Un circuito de descargas sanitarias de aguas negras, que se almacenará en el tanque de aguas grises y se descargará en puerto.

La evacuación de estos tanques se realizara desde una junta universal conectada a una electrobomba en puerto. La junta universal de descarga debe tener al menos estas características:

- Diámetro Exterior: 210 mm.
- Diámetro Interior: igual al diámetro exterior del conducto de descarga.
- Diámetro del círculo de los pernos: 170 mm.
- Ranuras en la brida: 4 agujeros de 18 mm de diámetro colocados equidistantemente en el círculo de pernos del diámetro citado y prolongados hasta la periferia de la brida por una ranura de 18 mm de ancho.
- Espesor de la brida: 16 mm.
- Pernos y Tuercas: 4 pernos de 16 mm de diámetro y de longitud adecuada.

3.11.5. Protección del Casco

3.11.5.1. Protección Catódica

La protección catódica debe estimarse considerando la superficie mojada, una demanda de corriente protectora adecuada, la vida útil esperada en años, el peso de los ánodos de sacrificio y los elementos de unión al casco.

La distribución de los ánodos será de acuerdo con el área que protege, la zona y predisposición a la corrosión, las más significativas son las cajas y tomas de mar, el codaste donde existen bocinas de bronce, hélice de aleaciones de Mn-Cu, Ni-Mn-Cu, Al-Cu, entre otros, que al entrar en contacto con un electrolito generarían el par galvánico para la corrosión.

Debemos considerar que en el codaste una mala distribución puede ocasionar turbulencias que pueden traducirse en daño a las hélices al acelerar la cavitación en esa zona.

El número de ánodos está dado por la siguiente expresión:

$$N_{Mg} = \frac{\text{Superficie mojada.Demanda de Corriente.Vida útil}}{80.Masa de ánodo} \quad (3.70)$$

$$N_{Mg} = 91.364 \cong 92$$

Tabla 3.43.- Resumen para protección catódica

CÁLCULO DE PROTECCIÓN CÁTODICA		
ITEM	CANTIDAD	UNIDAD
Superficie Mojada	140.56	m ²
Demanda de Corriente	26.00	mA/m ²
Vida útil esperada	2	años
Masa neta del ánodo	1	kg
# de Ánodos de Magnesio	92	Unidades

Fuente: Elaboración Propia

Los ánodos de sacrificio serán distribuidos de la siguiente forma, simétricamente, cuidando los espacios en el fondo.

Tabla 3.44.- Resumen para protección catódica

DISTRIBUCIÓN DE ÁNODOS DE Mg DE 4 kg		
ITEM	CANT. BANDA	PESO TOTAL
Casco (C0-C15)	14	56 kg
Casco Interiores (C4-C8)	6	24 kg
Cajas de mar	4	12 kg
TOTAL	24	96 kg

Fuente: Elaboración Propia

3.11.5.2. Recubrimientos

Por lo general, cuando se diseña un esquema de pintado, no se considera una capa única de pintura (mono-capa), sino varias capas (multi-capa); donde cada capa cumple una función específica en el funcionamiento del esquema, a fin de que el sistema completo, se comporte como un solo elemento.

Los sistemas de protección anti-corrosiva están constituidos por 3 tipos: el anticorrosivo (Primer), una capa intermedia (Mist Coat) y una capa de acabado (Top Coat).

El Primer Anticorrosivo (Primer) es la base de este sistema, sobre este recubrimiento descansan dos grandes responsabilidades: el control de la corrosión y la adhesión al substrato. Hay dos tipos de primers: el galvánico y el inhibidor.

Los primers galvánicos que contienen altas concentraciones de zinc metálico en polvo y protegen activamente la superficie del acero, galvanizándolo. Dentro de este grupo están las pinturas epoxi y etil silicato, ricas en zinc.

El primer inhibidor es un anticorrosivo formulado con inhibidores de corrosión, que son incorporados en el momento de la fabricación. Los pigmentos anticorrosivos más utilizados son: los cromatos de zinc, fosfato de zinc, etc. Dentro de este grupo están los Primer Epoxi Mastic.

La capa intermedia (Mist Coat) es la segunda en este sistema. Estos recubrimientos poseen alto contenido de sólidos en volumen y su concurso no siempre es necesario. Su función principal es la de adherirse fuertemente a la capa anticorrosivo, proveer espesor al sistema y suministrar una buena superficie de anclaje a la capa de acabado. Pertenecen a este grupo los recubrimientos Epoxi HS (Alto contenido de sólidos en volumen).

Finalmente, la capa de acabado (Top Coat) es la última en el sistema de protección anticorrosivo. La función principal de los recubrimientos de acabado son la de proteger a las capas base, optimizar la durabilidad y performance del sistema.

La capa de acabado debe tener como característica fundamental una excelente resistencia a los efectos del medio ambiente, al ataque de los agentes químicos externos, buena retención de color, excelente brillo y alta resistencia a los rayos ultravioletas (UV). Pertenecen a este grupo los Esmaltes Poliuretano.

3.11.5.2.1. Performance de Pinturas

La performance de los sistemas, generalmente son estimados de acuerdo con resultados prácticos de campo, obtenidos por los fabricantes de pinturas y usuarios a través del tiempo. Según la SSPC, la performance estimada para sistemas aplicados a 10 mills de espesores secos y expuestos a la misma condición se muestra en el siguiente cuadro.

Tabla 3.45.- Desempeño de recubrimientos

SISTEMA	ESQUEMA	PERFORMANCE
I	Zinc Epoxi (Orgánico) Esmalte Epoxi Esmalte Poliuretano	8 - 12 Años
II	Anticorrosivo Epoxi Esmalte Epoxi Esmalte Poliuretano	6 - 9 años
III	Esmalte Epoxi Esmalte Poliuretano	4 - 6 años

Fuente: Elaboración Propia

En esta referencia se observa, que el Sistema I, que tiene como base anti-corrosiva zinc presenta mayor durabilidad, seguido del Sistema II, que tiene como base anticorrosivo epoxi. La performance del Sistema III es menor, porque no tiene base anti-corrosiva; razón por la cual, se ha observado la utilización de esmaltes Epoxi HS (multipropósito) como base anti-corrosiva para trabajos de resanes.

Tabla 3.46.- Desempeño de los sistemas de pinturas – ISO 12944

CATEGORÍA CORROSIVIDAD	BAJO	MEDIO	ALTO	
	2-5 años	5-15 años	Sin ZINC > 15 años	Con ZINC >15 años
C1	-	-	-	-
C2	80µm 3 mils	150µm 6 mils	200µm 8 mils	-
C3	120µm 5 mils	160µm 6 mils	200µm 8 mils	240µm 10 mils
C4	160µm 6 mils	200µm 8 mils	280µm 11 mils	-
C5-I C5-M	200µm 8 mils	280µm 11 mils	300µm 12 mils	-

Fuente: Elaboración Propia

La Norma ISO 12944 expresa la durabilidad en los siguientes rangos: bajo, medio y alto, en función a espesores del sistema. El rango de durabilidad no es un tiempo de garantía. Esta Norma es referencial por las variables que intervienen en su estudio y por lo que se hace muy importante cruzar información con los resultados prácticos obtenidos a través de los años.

El plan de pintado, en base a un proveedor nacional¹²⁷, ha seleccionado el sistema de protección C5-I / C5-M (protección industrial y protección marino) para una embarcación similar en acero. El espesor en seco será de al menos 12 mills para la obra viva. El plan propuesto se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3.47.- Plan de pintado

ZONA	NÚMERO DE CAPAS	ESPESOR (MILS SECO APROX.)
Obra Viva	Primer zinc – 1 capa	4
	Capa Intermedia Epoxi HS – 1 capa	4
	Capa de Acabado - Esmaltes Poliuretano – 1 capa	4
Costado y Bandas	Primer zinc – 1 capa	4
	Capa Intermedia Epoxi HS – 1 capa	4
	Capa de Acabado - Esmaltes Poliuretano – 1 capa	4
Superestructura	Capa Intermedia Epoxi HS – 1 capa	4
	Capa de Acabado - Esmaltes Poliuretano – 1 capa	4
Cubierta Exterior	Primer zinc – 1 capa	4
	Capa Intermedia Epoxi HS – 1 capa	3
	Capa de Acabado - Esmaltes Poliuretano – 1 capa	3

Fuente: Elaboración Propia

¹²⁷ Proveedor QROMA, productos disponibles en internet. <http://www.qroma.com.pe/>

Para nuestra embarcación se prescinde de un recubrimiento del tipo primer, dado que el aluminio no lo necesita, pero se puede elegir una capa de acabado para la obra viva, bandas, cubierta superior y superestructura.

3.11.6. Sistema de Baldeo y Contraincendios

Para este sistema se han considerado los requerimientos exigidos por la Sociedad de Clasificación y por SOLAS (Convenio para la Seguridad de la Vida Humana en la Mar).

La regla considera que todos los buques y/o embarcaciones deben montar por lo menos 2 bombas contra incendios, de las que al menos una debe ser de accionamiento independiente del motor propulsor (buques con menos de 500 GT).

Los espacios por proteger con el material de tipo A, serán:

- Máquinas de combustión interna utilizadas para la propulsión del buque.
- Máquinas de combustión interna utilizadas para otro servicio distinto de la propulsión del buque, cuya potencia sea superior a 375kW.
- Cualquier otro elemento que necesite de combustible, tal como los elementos para el tratamiento del combustible para calderas o para los motores o bombas, filtros o calentadores de aceite o combustible siempre que trabajen a una presión superior a 1.8 bar.

Estos espacios deberán contar con un sistema de contra incendios de detección y extinción mediante CO₂. Este sistema deberá poder ser activado tanto en remoto como en manual. En nuestro caso, solo la zona del generador auxiliar tendrá este revestimiento.

Todos los mamparos divisorios internos de los espacios de habitación y servicio (cocina, pañoles, etc.) serán de clase B o C. Se dispondrá también de un método de detección y un sistema de alarma del tipo aprobado (TAC).

El sistema de alarma contraincendios será constituido por un sistema de detección de humos, y se podrá accionar manualmente desde los puntos situados en los corredores, escaleras y zonas de escape dentro de la zona de habitación.

Todos los espacios donde se encuentre la tripulación habitualmente realizando trabajos, deberán disponer de salidas de escape.

Las bombas de este servicio aspirarán del mar descargando al colector general de baldeo y contraincendios, que se extenderá a lo largo del todo el buque, al que se conectarán las válvulas para conexión de mangueras necesarias de acuerdo con las exigencias del convenio para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar.

En todos aquellos tramos de tuberías donde pueda quedar depositada agua, se dispondrán grifos de vaciado.

El diámetro de los colectores del servicio contraincendios será tal que permita el uso de las bombas contraincendios a su capacidad y con la presión de descarga de funcionamiento.

3.11.6.1. Contraincendios mediante CO₂

Se dispondrá de un sistema de extinción mediante CO₂ para la cámara de máquinas, específicamente en la zona del generador de emergencia y del tanque combustible (por ser del tipo A).

Los recipientes donde se almacenará el CO₂, no se encontrarán en zonas donde existan gases inflamables. Estos recipientes se almacenarán en lugares seguros y de fácil acceso, al igual que poseerán una adecuada ventilación.

El pulsador de entrada en servicio del sistema de sofocación de incendio a partir de gas inerte estará situado en un lugar seguro (no se podrá pulsar por error) y debe ser fácilmente accesible desde una posición exterior a la Cámara de Máquinas, en este caso desde la entrada a dicha cámara de máquinas. Para dar

mayor seguridad al sistema, se dispondrá una válvula de apertura de los recipientes a presión que contienen el gas y otra válvula para poder comenzar a extender el gas en cámara de máquinas. De esta forma, se asegura que nadie de la tripulación se encuentra en dentro de cámara de máquinas cuando se comience a inyectar el CO₂.

Se dispondrá tanto una alarma acústica como visual de aviso de entrada en funcionamiento del sistema de extinción mediante gas inerte. Esta alarma entrará en funcionamiento antes de comenzar a expulsar CO₂, durante el tiempo suficiente como para que la tripulación que está en cámara de máquinas pueda salir de ésta. Los sistemas de control del sistema de extinción mediante gas inerte serán fácilmente accesibles. Todas las conducciones del sistema de extinción mediante gas inerte se protegerán adecuadamente contra la corrosión.

Tal y como dice la norma NR 217 Part C, Ch. 3, Sec. 4, ítem 4.9, se ha liberar un volumen del 40% del volumen de las dos Cámaras de Máquinas y del tanque combustible. Sabiendo que cada kg de CO₂, produce 0.56 m³ de gas libre a presión atmosférica, el gas necesario, en peso, a almacenar en las botellas de CO₂ para las dos C.C.M.M. será:

$$M_{CO_2} = V_{CCMM} \cdot \frac{0.4}{0.56} = 2 * 22.76 * \frac{0.4}{0.56} = 32.5 \quad (3.71)$$

Por tanto, se dispondrá una botella de gas con un peso de 35 kg. Esta botella estará situada en el espacio a popa de la superestructura.

3.11.6.2. Sistema de Detección de Incendios y Sistema de Alarma.

El panel de control del sistema contra incendios, así como el cuadro de distribución de las alarmas y del sistema de detección estará situado en el puente. Se situarán elementos de detección de humos y temperatura a lo largo de todo el buque, por ser espacios de tipo B en su mayoría. La activación de alguno de estos detectores iniciará una alarma tanto visual como acústica en el puente de navegación.

En el cuadro de control de puente aparecerá iluminada la zona en la que se ha detectado el posible incendio. Si durante 2 minutos no se ha dado atención a dicha alarma entrará en funcionamiento una alarma acústica tanto en las zonas de habilitación como en las de servicio.

3.11.6.3. Elementos del Sistema de baldeo y Contraincendios

El servicio de baldeo y contraincendios se compone de los siguientes elementos:

- Dos (2) bombas contraincendios.

Según lo dispuesto en la norma, una de ellas será accionamiento independiente. El caudal que se debe proporcionar por cada bomba contraincendios también viene impuesto por la Sociedad de Clasificación y será como mínimo de 11 m³/h.

De esta manera, se tomarán como bombas contraincendios las bombas de achique de sentinas, siendo ambas accionadas mediante motores eléctricos. Esta bomba contraincendios se situará a proa y fuera de cámara de máquinas. En nuestro caso en el local a popa del pique de babor. La capacidad de la bomba no será inferior al 40% de la capacidad total de las bombas contraincendios, ni inferior a 15 m³/h.

Por ello la capacidad de la motobomba de emergencia para el servicio de contraincendios será de 15 m³/h y descargará a una presión de 3.0 bar. Los requerimientos de potencia serán los mismos que para las bombas normales, es decir, 3.5 kW.

- Cinco (5) extintores portátiles de polvo seco de 2.25 kg cada uno.

Estarán situados en la habilitación (2), zona de servicios (2), y en el puente de gobierno (1).

En cámara de máquinas habrá: dos (2) extintores portátiles de polvo seco de 4.5 kg, un sistema de detección y extinción de incendios de CO₂ con sus correspondientes alarmas. El gas procederá de una botella de 35 kg situada a popa de la superestructura.

No se utilizarán maderas ni otros materiales inflamables en cámara de máquinas.

Los conductos de exhaustación y todas aquellas partes donde la temperatura exceda de 220°C se aislarán correctamente.

Los materiales aislantes serán de tipo no combustible. Se deberá tener especial precaución con la contaminación de estos materiales aislantes por combustible o aceite lubricante.

- Resto de equipo:

Cuatro (4) bocas de C.I: Estarán sobre cubierta, dos a proa para cubrir la habitación y servicios y dos a popa para cubrir el garaje y las cámaras de máquinas.

Cinco (5) mangueras de C.I: una por cada boca de C.I y una de respeto. Al menos dos chorros de agua podrán llegar a cualquier zona del buque accesible.

Se colocarán válvulas de forma que las tomas de contraincendios se puedan aislar unas de otras para no ocasionar problemas de abastecimiento al resto. Se dispondrá una válvula para aislar el servicio de contraincendios de cámara de máquinas del resto de los sistemas contraincendios.

Dos tomas internacionales a tierra para el servicio de agua al sistema contraincendios.

3.11.7. Equipos de Fondeo, Amarre y Remolque

La embarcación es amarrada a puerto mediante cabos y bitas, de acuerdo a norma, cada embarcación debe estar equipada con una bita doble, tanto a proa y a popa como a cada banda de babor y estribor. Entre estos, dependiendo del tamaño de la embarcación, de uno a tres bolardos simples deberán estar dispuestos en cada costado de la embarcación.

Se ha dispuesto de 4 bitas dobles por banda, de modo que al menos 2 bitas estén ubicadas en una banda, 1 en proa y 1 en popa, facilitando el amarre a puerto y el remolque en caso de avería.

Los Cabos de hilos de acero serán usados para maniobras de amarre. Los cuales, según norma NR217, tendrán una longitud de 50 m, para el primero; 34 m para el segundo y 17 m para el tercero.

La carga mínima de rotura de los cabos será dada a través de la siguiente expresión:

$$R_S = 60 + \frac{L_{MBT}}{10} [kN] \quad (3.72)$$

$$R_S = 60 + \frac{30 * (2 * 2.5) * 1.1}{10} = 76.5 [kN]^{128}$$

De acuerdo con norma, el peso del ancla de proa será expresado conforme a la siguiente expresión:

$$P = k \left(\frac{L_M}{8B} \right)^{\frac{1}{2}} BT [kg] \quad (3.73)$$

$$P = 45 * \left(\frac{30}{8 * 2 * 2.5} \right)^{\frac{1}{2}} * 2 * 2.5 * 1.1 [kg]$$

$$P = 214.34 [kg]$$

¹²⁸ Para esta fórmula B, es la suma de las mangas de los monocascos y L_M, es la eslora total.

Aplicando una reducción del 13% para la condición de navegación de IN (0,6), la masa del ancla de proa sería de al menos 186.47 kg.

Estas anclas pueden ser reducidas si se adquiere anclas reconocidas por la Sociedad como “anclas de alto poder de agarre”.

Tabla 3.48.- Tipos de anclas reconocidas

Tipos de ancla	Reducción de masa
HA – DU	30 %
D'Hone Special	30 %
Pool 1 (hueca)	35 %
Pool 2 (sólida)	40 %
Die Biesbosch – Danforth	50 %
Vacinay – Danforth	50 %
Vacinal AC 14	25 %
Vacinay Tipo 1	45 %
Vacinay Tipo 2	45 %
Vacinay Tipo 3	40 %
Stockes	35 %
D'Hone – Danforth	50 %
Ancla Schmitt de alto agarre	40 %

Fuente: NR 217 B, Ch.7, Sec. 4, pág. 225.

Entonces, la masa del ancla, de tipo Vacinay – Danforth, Die Biesbosch – Danforth o D'Hone – Danforth, sería reducida a 92.24 kg. De modo que, se tendría:

- Un ancla de proa de 95 kg (siendo necesario un cabrestante) o dos anclas de 48 kg, sin ningún equipamiento adicional.
- Un ancla de popa de 25 kg.¹²⁹
- Las cadenas para el anclaje serán de al menos 40 m, para anclas de proa y popa, además de tener una carga mínima de rotura de 35 kN. Cadenas

¹²⁹ De acuerdo con norma solo se pide un 25% de la masa total del ancla de proa.

de eslabones cortos de grado Q₃, de Ø10 mm o eslabones con concreto de Ø12.5 mm de grado Q₂, pueden ser usados.

Se puede prescindir y/o reducir el equipamiento de anclas proa y popa, debido a la naturaleza de la operación y condiciones geográficas propias de la selva¹³⁰. En casos especiales, cables metálicos de acero pueden estar permitidos en lugar de cadenas de ancla para embarcaciones que no operan en agua salada. Los cables metálicos deberán tener al menos la misma resistencia de fractura que la requerida para las cadenas de ancla, pero ser un 20% más largo. Generalmente, esto se prefiere a fin de disminuir peso.

3.11.8. Equipos de Gobierno

Los timones serán accionados mediante un servomotor electrohidráulico, con el que se podrá girar cada timón de banda a banda en 28 segundos. Cada timón contará con dos bombas, siendo una de reserva.

Además, en caso de emergencia cada timón se podrá accionar manualmente desde el local del servo.

El equipo de gobierno del buque estará constituido por los siguientes elementos:

- Dos timones, cuyo diseño y características se desarrollaron anteriormente.
- Un servotimón hidráulico, para cada timón.
- Dos electrobombas hidráulicas de caudal variable, para cada timón, que serán capaces de mover el timón de una banda a otra en 28 segundos.
- Cada una de estas bombas estará accionada por un motor eléctrico de potencia total de 0.6 kW.

¹³⁰ Según la NR 217 B, Ch. 7, Sec. 4.1.4, dadas las condiciones de cada hidrovía, la Sociedad puede aprobar una reducción del equipamiento en embarcaciones que limiten su navegación a hidrovías o áreas aguas interiores siempre que se agregue al carácter de la clasificación una anotación de dicha hidrovía o área de aguas interiores, limitando su operación a una zona en particular.

- Una bomba de accionamiento manual para el gobierno de emergencia desde el local del servo.
- Un mando eléctrico para el gobierno de ambos timones.
- Un indicador de posición de los timones dispuesto en la consola del puente.

3.11.9. Equipos de Salvamento y Señales

Los sistemas de salvamento del buque deberán cumplir las reglamentaciones del Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en la mar 74 y las enmiendas del 78. También todas las recogidas en la Edición Refundida del SOLAS de 1997.

El código SOLAS, (Capítulo III – Regla 2 – Exenciones) establece que la Administración, si considera que la ausencia de riesgos y las condiciones del viaje hacen no razonable o innecesaria la aplicación de cualquier prescripción particular del presente capítulo, podrá eximir de ella a determinados buques o clases de buques que en el curso de su viaje no se alejen más de 20 millas de la tierra más próxima.

Habrà que tener en cuenta que es un buque de pasaje sin carga y de navegación interior, por lo cual bastará tomar los siguientes elementos:

- 06 botes inflables salvavidas de 12 - 15 personas cada una, con tela de poliuretano, de tipo RFD o similar.
- 80 chalecos salvavidas (10 distribuidos en dos puntos de evacuación, 55 adultos y 15 niños)¹³¹
- 12 cohetes de Señales
- 06 aros salvavidas, con rabiza flotante blanca, señal fumígena, luces de encendido automático con estándar SOLAS.
- 03 radios VHF portátiles

¹³¹ Al menos se debe garantizar el 25% de la capacidad de pasajeros para disponer de chalecos para niños.

- 02 respondedor de radar en cada bote salvavidas
- Plano de Evacuación y ubicación de equipos de seguridad, visible para pasajeros y tripulación.¹³²

3.11.10. Equipos de Navegación

Aunque se navegará por aguas abrigadas será necesario un equipo de navegación. Estos equipos son: GPS, Piloto automático, Radar, VHF, GSM – GPRS (Telefonía – Internet).

La mayor parte de este equipo y sus controles serán instalados en el puente de gobierno. El buque estará equipado con conexión de Internet WI-FI conectado a través de banda ancha ADSL.

3.11.10.1. Luces de Navegación

El buque se equipa, de acuerdo con las reglamentaciones en vigor con dos conjuntos de luces de navegación, uno principal proveniente del puente de gobierno, y otro de emergencia. Ambos de 24 V y corriente continua. Este último conjunto de luces deberá entrar en funcionamiento si se produce una caída de la red principal, y dejar de funcionar cuando la fuente de energía principal ha entrado de nuevo en funcionamiento.

Todas las luces serán controladas desde un cuadro situado en el puente. Este cuadro controlará todas las luces de navegación, cumpliendo con las reglas internacionales en esta materia.

3.11.10.2. Equipos de Navegación

En el puente se colocarán todos los instrumentos de navegación. Según la NR 217 Part D, Ch. 1, Sec. 6 y reglamentación nacional vigente, debe tener:

- Un compás magnético en el puente con bitácora.
- Un compás magnético de reserva.

¹³² Ver plano TMC – 012 – Plano de Evacuación y TMC –18- 013 – Plano de Equipos de Emergencia.

- Contador de revoluciones de la hélice.
- Un sextante.
- Equipo automático de Morse.
- Lámpara portátil de Morse.
- Cronómetro.
- Una bitácora tipo reloj en la zona de derrota.
- Un transformador.
- Un megáfono.
- Prismáticos de visión nocturna.
- Prismáticos.
- Limpiaparabrisas en las ventanas frontales.
- Un juego de cartas de navegación.
- Mesa de Cartas de navegación.
- Un manual de señales.
- Un manual de rutas.
- Un barómetro.
- Código Internacional de Señales.
- Un termómetro
- Un anemómetro.
- Una lámpara de señales diurnas.
- Un proyector.
- Sirena.
- Bocina para la niebla.
- Una campana.
- Un juego de señales de socorro.
- Juego de banderas.
- Señales diurnas.
- Cohetes.
- Señales de humo.
- Cuadro de luces de cubierta.
- Giroscópica con repetidor e indicador de ángulo de timón conectados al piloto automático.

- Control de proyector de búsqueda situado en el techo del puente.
- Equipos de ayuda a la navegación
- Botiquín Reglamentario.

3.11.10.3. Equipos Electrónicos y de Ayuda para la Navegación

- Piloto automático con accionamiento remoto del servotimón e interfaz para GPS. Girocompás.
- Un radar, de 10 millas, (1.5 kW) con video-ploter.
- 1 receptor de situación de satélite GPS.

Equipos para cumplir con la normativa GMDSS, sistema mundial de comunicaciones:

- 1 equipo de telefonía GMDSS.
- 1 equipo DSC.
- 1 radioteléfono VHS/DSC.
- 1 GPS marca Furuno.
- 1 receptor sistema Navtex.
- 1 radiobaliza con conexión por satélite.
- 2 equipos VHF portátiles bidireccionales.
- 1 equipo de V.H.F.
- Radiotelefonía.
- 1 radiogoniómetro.
- 1 corredora electromagnética.

Por comparación con buques similares construidos, estimamos un consumo eléctrico de 3.0 kW.

3.11.10.4. Comunicación en Interiores

La transmisión de órdenes y las comunicaciones interiores se realizarán mediante los siguientes equipos:

- Teléfonos Autogenerados: Se instalará un equipo de teléfonos autogenerados que comunicarán el puente con la cámara de máquinas. Timbres de alarma con pulsador, en cámara de máquinas, pasillos, garaje.
- Un sistema de altavoces con capacidad de respuesta que comunicará el puente con cualquier espacio donde se pueda encontrar un pasajero o un miembro de la tripulación. Este sistema se alimentará con la fuente de energía de emergencia o baterías de reserva.
- Se instalará una sirena en el puente que será accionada eléctricamente.

3.12. PLANTA ELÉCTRICA

Una vez dimensionados todos los equipos y servicios de a bordo, es necesario conocer sus necesidades eléctricas, para así poder dimensionar la planta y realizar el estudio eléctrico y el balance.

La planta eléctrica tendrá que alimentar a algunos servicios esenciales del buque como las bombas, iluminación, equipos de navegación y otros no tan esenciales pero que tendrán un alto consumo como los de entretenimiento para el pasaje, ventilación y otros.

En esta sección se intentará hacer una estimación del tipo, cantidad y potencia necesaria de los equipos generadores, paneles solares y baterías.

3.12.1. Definición de la planta Eléctrica

3.12.1.1. Elección del tipo de corriente

Dado que el proyecto es una embarcación solar, la corriente continua será elegida para suplir las demandas eléctricas del proyecto. La elección de Corriente Alterna será activada como emergencia, ya que el propósito del proyecto es no depender del generador ni del combustible fósil.

3.12.1.2. Elección del Voltaje y frecuencias

Es importante diferenciar los diferentes usos de la electricidad para tener la tensión y frecuencia adecuada. Así, se distinguirá entre:

- Red de alumbrado y servicios especiales, equipos electrónicos y de navegación.
- Red de equipos a 220 V.
- Red de emergencia.

La red de alumbrado y los servicios especiales, así como los equipos electrónicos y de navegación, serán alimentados a partir de corriente continua a 24 V. Los motores eléctricos poseen una conexión especial para ser acoplados a las baterías y generador.¹³³

Tabla 3.49.- Servicios en función de tipo corriente

CORRIENTE	CONSUMIDORES
C.A. 220V - Trifásica	Bombas de servicios generales
	Cargador de Baterías
	Enchufes
	Alumbrado Puente – Emergencia-Fondo
	Ventilación
	Equipos Hidróforos
C.C. 24 V /Otros	Luces de Navegación
	Alumbrado general - LED
	Equipos a 24 V de C.C.M.M
	Comunicaciones Interiores
	Servicios a 24 V
	Radio GPS/Sonda
	Motores de Propulsión

Fuente: Elaboración Propia

¹³³ Ver esquema de instalación y conexión híbrida del fabricante. Ver Figura 3.23.

La red de equipos a 220V, será únicamente exclusivo para uso de emergencia y para los generadores. La elección de una tensión trifásica de 220 V a 60 Hz para el sistema de emergencia se debe a su amplia utilización en la red eléctrica disponible en los puertos del Amazonas, zona en las que navegará el buque. Esta se generará directamente por alternadores en forma trifásica, aunque su utilización sea a través de una red monofásica o con conexión directa.

La red de alumbrado y de equipos se alimentará principalmente mediante las baterías y acumuladores, las cuales estarán cargándose desde la red monofásica de 220 V a 50 Hz a partir de rectificadores de corriente, cuando sea necesario.

3.12.2. Demanda Eléctrica

3.12.2.1. Demanda DC

La demanda DC estará conformada por la red de 24 V, la cual viene a ser la red principal de la embarcación, por priorizar el uso de acumuladores o baterías. La demanda DC será afectada por el coeficiente de servicio, el coeficiente de régimen, de simultaneidad, de acuerdo con el grupo al que pertenecen.

3.12.2.2. Demanda AC

Generalmente, los buques usan corriente alterna en conexiones en paralelo de líneas monofásicas de generadores los trifásicos como red principal.

En nuestro caso, la red 220 V/ AC, será usada como emergencia, cuando se necesite. El uso de otros equipos 220 V, serán suplidos por transformadores e inversores conectados a las baterías. Los equipos como hidróforos, bombas y alumbrado conectado directamente a esta red, funcionarán conectados en líneas monofásicas. El alumbrado conectado directamente será independiente al alumbrado general (24 V).

Al igual que la Demanda DC, en el balance de cargas, la demanda AC será afectada por el coeficiente de servicio, el coeficiente de régimen, de simultaneidad, de acuerdo con el grupo al que pertenecen.

3.12.2.3. Cuadro de cargas

En las Tablas 3.50 y 3.51 se muestran la demandada eléctrica estimada por día para la condición más crítica de navegación.

Tabla 3.50.- Cuadro de Cargas DC¹³⁴

Consumo DC - Día	Red de 24 /72 V - CC				
	Ítem	En uso	P. Unit. [kW]	Efic.	# Horas de Servicio
Motor DC	2	53.30	0.97	4.00	439.6
Regulador - Driver	2	1.5	0.9	4.00	13.3
Bomba Contraincendios	1	3.5	0.8	0.50	2.2
Bombas servo	2	2.4	0.8	2.50	15.0
Alum. Gral. Cubierta Principal - LED	40	0.018	0.96	4.00	3.0
Alum. Gral. Fondo	10	0.018	0.96	2.50	0.5
Luces de Navegación completa	1	0.45	0.96	4.00	1.9
Alum. Puente de mando - LED	22	0.018	0.96	4.00	1.7
Equipo Wi -Fi	1	0.01	0.90	4.00	0.0
Detector de incendios	2	0.50	0.95	4.00	4.2
Panel de Alarma - Sensores (Global)	2	0.06	0.90	4.00	0.5
Alarma Piloto Automático y giroscopio	1	0.06	0.90	4.00	0.3
Alarma CO2	2	0.10	0.90	0.50	0.1
Alarma de Motores Principales	2	0.07	0.90	0.50	0.1
Equipo de Ayuda a la Navegación	1	3.20	0.96	4.00	13.3
Cargado VHF Portátil	1	0.02	0.90	2.50	0.1
Consumo Máximo Estimado por Día - Vel. 9,5 kn					495.7
Consumo Máximo Estimado por Hora [kW]					99.1

Fuente: Elaboración Propia

¹³⁴ Considerando un viaje completo, a favor y en contra corriente, el número de horas de servicio a velocidad de 9.5 kn reduce el tiempo de navegación en 1 hr, en comparación de la velocidad de 6 kn. Las horas de servicio no son las mismas que la de captación solar. La primera, señala el tiempo de consumo energético y la segunda, el tiempo disponible para captar energía solar.

Tabla 3.51.- Cuadro de Cargas AC

Consumo AC - Día	Red de 220 V/ 60 HZ				
Ítem	En uso	P. Unit.	Efic.	# Horas de Servicio	Consumo
		[kW]			[kWh]
Cargador de Baterías	1	3.00	0.90	1.00	3.3
Tomacorrientes de Fondo	2	0.10	0.90	2	0.4
Ventiladores	6	0.18	0.90	5	6.0
Máquina de Café/otros	1	3.70	0.90	0.7	2.9
Lava vajillas	1	2.30	0.90	0.5	1.3
Nevera	1	0.75	0.90	24	20.0
Microondas	1	1.00	0.90	0.5	0.6
Calentador de agua Dulce	1	1.00	0.90	0.5	0.6
Grupo Hidróforo de Agua dulce	1	0.60	0.90	2	1.3
Grupo Hidróforo de agua salada	1	0.60	0.90	2	1.3
Tomacorrientes cubierta	22	0.10	0.90	2	4.9
Sistema de Climatización pasajeros	1	4.50	0.90	2.5	12.5
Bombas de achique baldeo	2	3.50	0.90	0.5	3.9
Bombas de aguas oleaginosas	1	0.50	0.90	0.5	0.3
Bomba Contra incendios	1	3.50	0.90	0.2	0.8
Bomba de Combustible - Emergencia	2	0.50	0.90	0.5	0.6
Consumo Máximo Parcial Estimado por Día - Vel. 9,5 kn					60.6
Eficiencia del inversor = 0.96					63.1
Consumo Máximo Estimado por Día - Vel. 9,5 kn					63.1
Consumo Máximo Estimado por Hora [kW]					12.6

Fuente: Elaboración Propia

Las tablas mostradas nos ayudarán a realizar el balance de cargas para las diferentes condiciones de operación, y el promedio se utilizará para el cálculo del sistema fotovoltaico.

3.12.3. Balance Eléctrico

Todos los equipos a bordo que demandan energía eléctrica se han dividido en grupos para facilitar el cálculo de la potencia eléctrica necesaria en condiciones máximas de operación. Para cada grupo se han estudiado los diferentes consumos para las distintas situaciones en las que normalmente se encontrará el buque. Estas condiciones son: buque navegando, buque maniobrando, buque en operación de embarque/desembarque de pasajeros y buque en puerto.

Los grupos considerados son los siguientes: Grupo N.º 1: Propulsión, Grupo N.º 2: Auxiliares, Grupo N.º 3: Alumbrado, Grupo N.º 4: Servicios de Pasajeros y Grupo N.º 5: Varios.

Las Tablas 3.52 y 3.53 muestran el balance eléctrico considerado las siguientes partidas:

- Número total de consumidores instalados de cada tipo.
- Número de consumidores en uso.
- Potencia unitaria absorbida por cada consumidor, medida en kW.
- Potencia total instalada de cada tipo de consumidor, medida en kW, calculada como el producto de la potencia unitaria por el número de equipos instalados.
- K_{sr} : Coeficiente de servicio y régimen.

Representa el grado de probabilidad de que una máquina se encuentre trabajando a su potencia máxima.

Este coeficiente se expresa como:

$$K_{sr} = K_s \cdot K_r^{135} \quad (3.74)$$

- K_s : Coeficiente de servicio.

¹³⁵ Los coeficientes de servicio son análogos a los conocidos factores de utilización.

Es el tiempo de funcionamiento del consumidor dividido por el tiempo total de funcionamiento del buque, en la condición que se esté estudiando.

- K_r : Coeficiente de régimen.

Considera que los consumidores nunca trabajan al 100% de su potencia, al no ser por un periodo de tiempo muy pequeño y por causas justificadas. Es decir, indica el tanto por ciento de la potencia demandada por el consumidor según el régimen de funcionamiento.

- K_n : Coeficiente de simultaneidad.

Refleja la existencia de equipos de reserva, especialmente en los servicios esenciales. Su valor es el cociente entre el número de elementos en uso partido por el número total de elementos instalados.

- Potencia Total

Potencia de cada consumidor o grupo de consumidores demandada para cada situación de funcionamiento, obtenida como el producto de la potencia total instalada por los anteriores coeficientes.

Tabla 3.52.- Cuadro de cargas – Parte I

Grupo N°1		Propulsión			Navegación			Maniobra			Embarco/Desembarco			Puerto		
Item	# Unidades	En uso	P Unitaria	P total inst.	Ksr	Kn	P total	Ksr	Kn	P total	Ksr	Kn	P total	Ksr	Kn	P total
			[kW]	[kW]			[kW]			[kW]			[kW]			
Motor DC	2	2	65	130	0.82	1	106.6	0.7	1	91	0	1	0	0	1	0
Regulador - Driver	2	2	1.5	3	0.85	1	2.55	0.7	1	2.1	0	1	0	0	1	0

Grupo N°2		Auxiliares			Navegación			Maniobra			Embarco/Desembarco			Puerto		
Item	# Unidades	En uso	P Unitaria	P total inst.	Ksr	Kn	P total	Ksr	Kn	P total	Ksr	Kn	P total	Ksr	Kn	P total
			[kW]	[kW]			[kW]			[kW]			[kW]			
Bombas de achique baldeo	4	2	3.5	14	0.5	0.5	3.5	0.5	0.5	3.5	0.5	0.5	3.5	0.5	0.5	3.5
Bombas de aguas oleaginosas	2	1	0.5	1	0	0.5	0	0	0.5	0	0	0.5	0	0.6	0.5	0.3
Bomba Contraincendios	2	1	3.5	7	1	0.5	3.5	1	0.5	3.5	1	0.5	3.5	1	0.5	3.5
Bombas servo	4	2	2.4	9.6	0.4	0.5	1.92	0.9	0.5	4.32	0.3	0.5	1.44	0	0.5	0
Bomba de Combustible - Emergencia	2	2	0.5	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0

Grupo N°3		Alumbrado			Navegación			Maniobra			Embarco/Desembarco			Puerto		
Item	# Unidades	En uso	P Unitaria	P total inst.	Ksr	Kn	P total	Ksr	Kn	P total	Ksr	Kn	P total	Ksr	Kn	P total
			[kW]	[kW]			[kW]			[kW]			[kW]			
Alumbrado Puente (220 V)	22	22	0.04	0.88	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
Alumbrado Cubierta Principal (220 V)	40	40	0.04	1.6	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
Alumbrado Fondo (220 V)	10	40	0.04	0.4	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
Alum. Gral. Cubierta Principal - LED	40	40	0.018	0.72	0.5	1	0.36	0.5	1	0.36	0.5	1	0.36	0.5	1	0.36
Alum. Gral. Fondo	10	10	0.018	0.18	0.5	1	0.09	0.5	1	0.09	0.5	1	0.09	0.5	1	0.09
Luces de Navegación completa	1	1	0.45	0.45	1	1	0.45	1	1	0.45	1	1	0.45	0	1	0
Alum. Puente de mando - LED	22	22	0.018	0.396	0.5	1	0.198	0.5	1	0.198	0.5	1	0.198	0.5	1	0.198

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.53.- Cuadro de cargas – Parte II

Grupo N°4		Servicios del Pasajero			Navegación			Maniobra			Embarco/Desembarco			Puerto		
Item	# Unidades	En uso	P Unitaria	P total inst.	Ksr	Kn	P total	Ksr	Kn	P total	Ksr	Kn	P total	Ksr	Kn	P total
			[kW]	[kW]			[kW]			[kW]			[kW]			
Ventiladores	6	6	0.18	1.08	0.9	1	0.972	0.9	1	0.972	0.9	1	0.972	0.9	1	0.972
Maquina de Café/otros	1	1	3.70	3.7	0.4	1	1.48	0.4	1	1.48	0.3	1	1.11	0	1	0
Lava-vajillas	1	1	2.3	2.3	0.2	1	0.46	0.2	1	0.46	0.2	1	0.46	0.2	1	0.46
Nevera	1	1	0.75	0.75	1	1	0.75	1	1	0.75	1	1	0.75	1	1	0.75
Microondas	1	1	1	1	0.4	1	0.4	0.4	1	0.4	0.3	1	0.3	0	1	0
Calentador de agua Dulce	1	1	1	1	0.3	1	0.3	0.3	1	0.3	0.3	1	0.3	0.3	1	0.3
Grupo Hidroforo de Agua dulce	1	1	0.6	0.6	0.5	1	0.3	0.5	1	0.3	0.5	1	0.3	0.5	1	0.3
Grupo Hidroforo de agua salada	1	1	0.6	0.6	0.5	1	0.3	0.5	1	0.3	0.5	1	0.3	0.5	1	0.3
Tomacorrientes cubierta	22	22	0.1	2.2	0.2	1	0.44	0.2	1	0.44	0.2	1	0.44	0	1	0
Sistema de Climatización pasajeros	2	1	4.5	9	0.7	0.5	3.15	0.7	0.5	3.15	0.7	0.5	3.15	0.2	0.5	0.9

Grupo N°5		Varios			Navegación			Maniobra			Embarco/Desembarco			Puerto		
Item	# Unidades	En uso	P Unitaria	P total inst.	Ksr	Kn	P total	Ksr	Kn	P total	Ksr	Kn	P total	Ksr	Kn	P total
			[kW]	[kW]			[kW]			[kW]			[kW]			
Equipo Wi -Fi	1	1	0.01	0.01	1	1	0.01	1	1	0.01	0.9	1	0.009	0	1	0
Detector de incendios	2	2	0.50	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cargador de Baterías	2	1	3.00	6	1	0.5	3	1	0.5	3	1	0.5	3	1	0.5	3
Panel de Alarma - Sensores (Global)	2	2	0.06	0.12	1	1	0.12	1	1	0.12	1	1	0.12	1	1	0.12
Alarma Piloto Autom. Y giroscopico	1	1	0.06	0.06	1	1	0.06	1	1	0.06	1	1	0.06	1	1	0.06
Alarma CO2	2	2	0.10	0.2	1	1	0.2	1	1	0.2	1	1	0.2	1	1	0.2
Alarma de Motores Principales	2	2	0.07	0.14	1	1	0.14	1	1	0.14	1	1	0.14	1	1	0.14
Equipo de Ayuda a la Navegación	1	1	3.20	3.2	1	1	3.2	1	1	3.2	0	1	0	0	1	0
Cargado VHF Portatil	1	1	0.02	0.02	0.2	1	0.004	0.2	1	0.004	0.2	1	0.004	0.2	1	0.004
Tomacorrientes de Fondo	4	2	0.10	0.4	1	0.5	0.2	1	0.5	0.2	1	0.5	0.2	1	0.5	0.2

Demanda de Potencia Total [kW]	135.65	122	22.353	16.654
Demanda de Potencia Total + 10% [kW]	149.22	134.2	24.588	18.319
Potencia Total para selección del generador de Emergencia (FDP = 0.8 + 10%) [kW]	186.52	167.76	30.735	22.899

Fuente: Elaboración Propia

3.12.4. Diseño del Sistema Fotovoltaico

El sistema fotovoltaico jugará un papel trascendental en la generación de energía. Será vital considerar la capacidad de aprovechamiento solar, la gestión energética, la aplicación y distribución, a fin de garantizar el desempeño de los motores, sistemas y servicios del buque.

La embarcación propuesta debe generar su propia energía, almacenarla y distribuirla de modo que siempre pueda desarrollar su normal operación. Debemos garantizar que el buque pueda generar y suplir la demanda de la sala de máquinas, bombas, la iluminación total del buque y otros. Para ello, debemos diseñar un sistema fotovoltaico capaz de hacerlo.

Antes de realizar el cálculo de los paneles y de la planta fotovoltaica de generación eléctrica, debemos establecer con claridad la demanda o consumo promedio total que el sistema fotovoltaico debe generar por hora dentro del tiempo disponible de radiación solar.

En las Tablas 3.50 y 3.51, se puede observar el consumo diario tanto de cargas AC y de DC para una velocidad de 9.5 kn.¹³⁶ La potencia total diaria requerida por las cargas DC y AC, respectivamente es 495.7 y 60.6 [kWh].

La potencia diaria requerida AC antes de ser suministrada a las diferentes cargas, pasa por el inversor, el cual para nuestro motor seleccionado tiene una eficiencia de 0.96, es así como:

$$E_{AC} = \frac{60.6 \text{ kWh}}{0.96} = 63.1 \text{ [kWh]} \quad (3.75)$$

La energía total promedio requerida (AC y DC) debe viajar previamente por cables, por el regulador de carga y el banco de baterías, el cual en su conjunto tienen una eficiencia aproximada de 0.92.

$$E_{prom} = \frac{E_{DC} + E_{AC}}{0.92} = E_{prom} \text{ [kWh]} \quad (3.76)$$

¹³⁶ El consumo más crítico se da en esta condición de navegación.

La Tabla 3.54 nos muestra los valores de la energía total promedio a generar por hora, considerando el régimen de navegación, cables, conductores e inversores.

Tabla 3.54.- Energía eléctrica a generar por el sistema fotovoltaico

Energía Promedio a 9,5 kn – Contra Corriente	
Energía Total Promedio DC/AC Día [kWh] Vel. 9,5 [kn]	558.9
Energía Promedio por Hora [kW] ¹³⁷	111.8
Energía a generar por Hora¹³⁸ (Efic. : 0.92) [kW]	121.49
Energía Promedio a 6 kn – A favor de la Corriente	
Energía Total Promedio DC/AC Día[kWh] Vel. 6 [kn] ¹³⁹	229.2
Energía Promedio por Hora [kW]	45.8
Energía a generar por Hora (Efic. : 0.92) [kW]	49.82
Energía Total Promedio por Día	
Energía Total Promedio DC/AC Día - promedio	394.01
Energía Promedio por Hora [kW]	78.80
Energía promedio a generar por Hora (Efic. : 0.92) [kW]	85.66

Fuente: Elaboración Propia

La energía total DC/AC se ha dividido entre el número de horas al día que el sistema fotovoltaico dispone para captar energía solar, esto nos permite estimar la generación por hora que el sistema fotovoltaico debe transformar.

3.12.4.1. Generación y trabajo del Sistema Fotovoltaico

El proceso de generación fotovoltaica se da por medio de los paneles solares que se instalarán en la cubierta superior y del área del puente de mando correspondiente a la superestructura.

¹³⁷ El tiempo disponible de radiación solar es de aproximadamente 5 horas.

¹³⁸ Se ha considerado una eficiencia de conductores, reguladores y otros, alrededor del 92%.

¹³⁹ El consumo de los motores DC para 6 kn es de alrededor de 22.38 kW.

La energía captada por los paneles pasa por un convertidor Boost, que es un convertidor DC a DC, el cual obtiene a su salida una tensión mayor que a su entrada. Este convertidor es pieza fundamental para la optimización de energía mediante el Seguidor del Punto de Máxima Potencia (MPPT)¹⁴⁰. Este dispositivo optimiza el rendimiento del sistema, adaptando los niveles de tensión de salida del panel fotovoltaico a los que requiere cada elemento que se va a alimentar como nuestro motor y otras demandas de carga. Con esto se puede trabajar a la máxima potencia cumpliendo el objetivo de generar la máxima cantidad de energía a partir de la radiación solar disponible, independientemente de la carga.

La energía convertida se transporta al banco de baterías. Los reguladores de carga y descarga son dispositivos que se instalan a la entrada y a la salida del banco de baterías respectivamente. El regulador de carga envía la energía que recibe de los paneles fotovoltaicos al banco de baterías completamente descargados.

Durante el proceso de carga, este regulador mide el flujo entrante de energía al banco de baterías. Permite seguir captando energía, hasta que el banco de baterías esté completamente cargado. El flujo de energía se envía directamente a las cargas a través del regulador de descarga y, durante el proceso de descarga, el regulador de descarga mide el flujo de energía y el dispositivo de control compara este flujo con la data de la carga precedente. Gracias a esto, es posible establecer el tiempo de vida de las baterías y determinar se verdadera energía almacenable.

Las baterías pueden también ser cargadas cuando se esté en puerto mediante una fuente de entrada externa, esto se utilizará en caso de mal tiempo o de provisión para algún viaje con mayor autonomía de lo previsto.

¹⁴⁰ Fuente: "Solar Electric Boat", Department of Electronic Engineering, University "Roma Tre", Roma, Italy.

El sistema de control tiene como principal función determinar la energía real disponible para la navegación y, para realizar esta tarea, el sistema almacena información del flujo de energía y maneja la carga y descarga de las baterías. Con esta estrategia de manejo, se controla el tiempo de vida del banco de baterías y se limita el número de cargas y descargas, así como la necesidad de realizar el uso de generadores o conectarse a red.

Entonces, dentro de los elementos principales del sistema fotovoltaico a dimensionar, tenemos: los paneles y los acumuladores (como parte del proceso de carga), con sus respectivos parámetros de generación como el índice de radiación solar disponible, superficie o área disponible de captación solar, inclinación, corriente y voltaje de trabajo, para garantizar la conversión de energía solar en energía eléctrica.

3.12.4.2. Cálculos para la Generación de Energía Fotovoltaica

3.12.4.2.1. Superficie de Captación solar

De acuerdo con la disposición general se tiene un área disponible plana de 256 m², a fin de aumentar el área disponible de la cubierta superior se propone un espacio en voladizo que sobresale alrededor de 1 m en todo su perímetro. Esta constituirá un área desplegable con un sistema corredizo estándar, ligero y resistente.¹⁴¹

Esta combinación, entre una superficie de captación plana-angular y una superficie extendible que le permite optimizar y aumentar el espacio disponible. Así, es posible instalar el máximo número de paneles, respetando las dimensiones de diseño de la embarcación.

¹⁴¹ Actualmente las empresas proveedoras han desarrollado sistemas plegables que pueden colocarse fácilmente en las cubiertas, como se muestra la Figura 3.15.



Figura 3.15.- Paneles fotovoltaicos con estructura despegable

Fuente: Imagen disponible en Internet¹⁴²

En total, se dispone de 22 metros de longitud por 12,5 metros de ancho detrás del puente de mando que constituye un área de 275 m² y 49 m² sobre el puente de mando, de acuerdo con la disposición General¹⁴³. Además del área disponible, tenemos una superficie extendible con una inclinación variable β (en nuestro caso no será mayor a 5°)¹⁴⁴ hacia los laterales, permitiendo 116 m² adicionales, de modo que, la superficie de captación total asciende al menos a 440 m².

3.12.4.2.2. Ángulo de Inclinación del Panel

El radio de acción de la embarcación es cercano al ecuador, lo que permite la disposición e instalación de paneles sin ángulo de elevación de forma práctica, sin perjuicio energético.

¹⁴² Tomado de <https://solarbuildermag.com/financing/green-street-power-partners-buys-up-portfolio-of-community-solar-projects-in-new-york-via-sunpower/>

¹⁴³ Ver plano de TMC -18-001 – Disposición General, en los Anexos.

¹⁴⁴ El Perú está ubicado por debajo de la línea ecuatorial y a la vez muy próximo a dicha línea, el panel ha de estar orientado hacia el norte y los ángulos óptimos están entre 2° y 30°. Por la ubicación geográfica una inclinación entre 1-5° es recomendada. La inclinación está en función a la latitud geográfica de Iquitos, que es menor a 4°.

La siguiente fórmula expresa la inclinación óptima anual¹⁴⁵ para conseguir la mayor radiación solar anual posible sobre un captador solar. Está basada en el análisis estadístico de la radiación solar anual sobre superficies con diferentes inclinaciones situadas en lugares de diferentes latitudes, por lo que proporciona la inclinación óptima en función de la latitud del lugar:

$$\beta = 3,7 + 0.69 * |\phi| \quad (3.77)$$

Siendo:

- β : Ángulo de inclinación óptima (grados)
- $|\phi|$: Latitud del lugar, sin signo (grados)

Considerando el perfil operativo y la misión del buque, definido en el capítulo I, se puede considerar un ángulo de inclinación para los paneles de hasta 6.5°, garantizando que la radiación solar sobre los paneles sea lo más perpendicular a los rayos solares y con una instalación lo más factible posible, a fin de evitar pérdidas y optimizar, adicionalmente, la energía solar disponible¹⁴⁶. De acuerdo con la disposición general y el sistema corredizo de los paneles, se puede garantizar aproximadamente la inclinación deseada sin ningún inconveniente. A pesar de esto, se elige una disposición horizontal como forma práctica.

3.12.4.2.3. Selección del Panel Fotovoltaico

El siguiente paso es la búsqueda de una tecnología fotovoltaica con buena relación potencia peso, dentro del límite del precio y coste. En el caso particular del Perú, no existen fabricantes locales de tecnologías fotovoltaicas, por lo que debemos exportar. El mercado más cercano es el norteamericano, seguido por el europeo y el asiático. Por parámetros de costes y disponibilidad de oferta,

¹⁴⁵ Tomado de: <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/01/09/inclinacion-optima-de-placas-fotovoltaicas/>

¹⁴⁶ Las pérdidas pueden variar desde el 1-3% hasta el 30%. En nuestro caso, las pérdidas se estiman en un 1.2%, para un ángulo de 0°. Para nuestro caso, la inclinación puede prescindirse.

hemos seleccionado los productos homologados que cumplen normas de certificación europea y que puedan ser compatibles al proyecto.

Son múltiples las opciones en módulos fotovoltaicos, por lo que se han definido los siguientes parámetros para acotar la búsqueda dentro de los modelos ofrecidos por los fabricantes y distribuidores. Se han considerado los siguientes parámetros:

- Tecnología: Monocristalina o policristalina
- $V_{mpp} > 25V$
- Densidad energética $> 10Wp/kg$
- Dimensiones aproximadas 1500x1400mm

Como se ha mencionado, la tecnología de silicio monocristalino tiene rendimientos superiores al 15%; superiores a otras tecnologías de lámina delgada. Actualmente, podemos encontrar dispositivos con buenos niveles de calidad a precios muy competitivos.

Por la particularidad de que los bancos de baterías trabajan desde 72V a más, por lo que se requieren paneles con un voltaje de salida relativamente elevado, por ello se utilizan módulos con niveles de tensión de salida de punto de máxima potencia que sean superiores a 25V.

El factor del peso en la presente instalación es determinante, ya que su aumento supone mayor calado y mayor resistencia al avance, por lo que dentro de unos límites razonables se debe buscar el tipo de panel con el menor peso posible.

En cuanto a la longitud del panel, tiene que ver con un aspecto puramente geométrico. La forma de la cubierta permite la colocación de varias filas de paneles a lo largo de toda su superficie útil.

En la cubierta del puente de mando hay un espacio útil ligeramente superior a 30 m² por lo que se ha requerido un módulo de forma rectangular que optimizar el espacio disponible en la cubierta.

3.12.4.2.4. Número y Distribución de Paneles Fotovoltaicos

En la región de la Selva Central, la radiación solar promedio varía de 4.5 a 5.3 kWh/m², aproximadamente 5 horas de sol con ese rango de radiación solar disponible¹⁴⁷.

Por tanto, la energía que necesita generar los paneles solares durante ese tiempo, de acuerdo con la Tabla 3.54, es:

$$E_{total} = \frac{394.05}{0.92} = 428.32 [kWh] \quad (3.78)$$

$$E_{total/hr} = \frac{428.32}{5} = 85.66 [kW] \quad (3.79)$$

El número de paneles se puede definir a partir de la potencia nominal de salida, teniendo en cuenta la corriente, el voltaje, índice de radiación solar disponible y un coeficiente de rendimiento cercano al 90%¹⁴⁸.

Se realizó una búsqueda de tecnología dentro del mercado americano, concretamente en USA, entre varias alternativas elegimos paneles fotovoltaicos marca SUNPOWER de tecnología monocristalina, ya que son los de última generación generando mayor energía en menor espacio, característica que necesitamos debido a las grandes cargas necesitadas en la condición de servicio.

¹⁴⁷ Fuente: http://www.senamhi.gob.pe/pdf/atlas_solar.pdf

¹⁴⁸ El coeficiente del rendimiento del panel (típicamente 85-90% al descontar las pérdidas)

Electrical Data		
	SPR-X22-360	SPR-X21-345
Nominal Power (P _{nom}) ⁷	360 W	345 W
Power Tolerance	+5/0%	+5/0%
Panel Efficiency	22.1%	21.2%
Rated Voltage (V _{mpp})	59.1 V	57.3 V
Rated Current (I _{mpp})	6.09 A	6.02 A
Open-Circuit Voltage (V _{oc})	69.5 V	68.2 V
Short-Circuit Current (I _{sc})	6.48 A	6.39 A
Max. System Voltage	1000 V IEC & 600 V UL	
Maximum Series Fuse	15 A	
Power Temp Coef.	-0.29% / °C	
Voltage Temp Coef.	-167.4 mV / °C	
Current Temp Coef.	2.9 mA / °C	

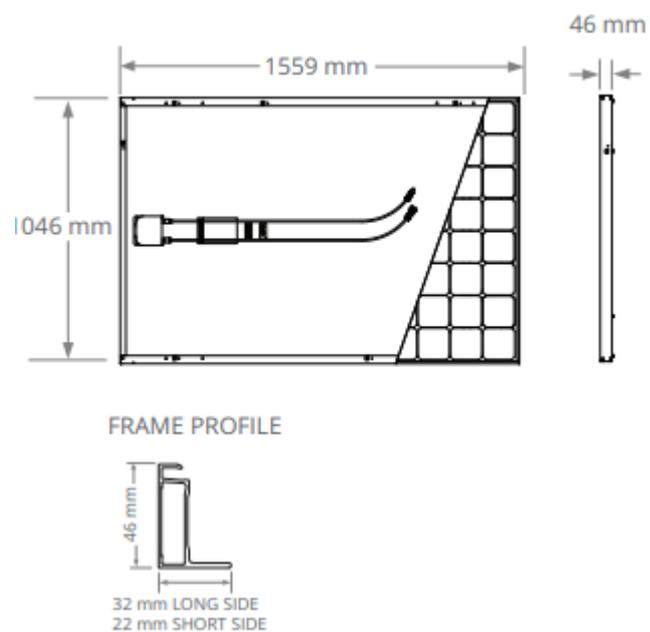


Figura 3.16.- Características técnicas del panel SUNPOWER X22-360

Fuente: <https://us.sunpower.com/> ¹⁴⁹

¹⁴⁹ Ficha técnica y otros tomados de proveedor en <https://it.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/33933>

Tabla 3.55.- Características del panel SUNPOWER X22-360

Operating Condition And Mechanical Data	
Temperature	-40° C to +85° C
Impact Resistance	25 mm diameter hail at 23 m/s
Appearance	Class A+
Solar Cells	96 Monocrystalline Maxeon Gen III
Tempered Glass	High-transmission tempered anti-reflective
Junction Box	IP-65, MC4
Weight	18,6 kg
Max. Load	Wind: 2400 Pa, 244 kg/m ² front & back Snow: 5400 Pa, 550 kg/m ² front
Frame	Class 1 black anodized (highest AAMA rating)

Fuente: it.ensolar.com¹⁵⁰

Ahora, necesitaremos la cantidad de paneles que se necesitan para cumplir con las demandas de potencia. Esto puede evaluarse rápidamente, según la siguiente expresión:

$$\text{Número de Paneles} = \frac{85.66 \text{ kW}}{360 \text{ W}} \approx 238 \text{ Paneles} \quad (3.80)$$

Siendo 360 W la potencia de salida de los paneles escogidos y el área que ocupa cada panel es $1.559 * 1.046 = 1.63 \text{ m}^2$. Entonces, se necesitará un área para recubrir por paneles de $1.63 \text{ m}^2 * 238 = 387.94 \text{ m}^2$. Esta área se distribuirá en la cubierta superior y en extensibles que permiten hasta 440 m^2 para acomodación de paneles (270 paneles).

La eficiencia para transformar la energía solar en energía eléctrica es en promedio del 15%¹⁵¹, por lo que debemos garantizar que la energía que incide en el área sea lo suficiente para garantizar la conversión eléctrica de los paneles en una hora. Por tanto:

¹⁵⁰ Ficha técnica disponible en: <https://it.ensolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/33933>

¹⁵¹ La eficiencia de conversión es del 22.1% a condiciones de laboratorio (25°C), pero consideraremos 15% como seguridad debido a la variación de temperatura en la zona entre 27- 40°C.

$$E_{solar\ hora\ incidente} = 4.5 \left[\frac{kWh}{m^2} \right] \times 404.7 [m^2] = 1821.15 kWh \quad (3.81)$$

$$E_{transformada\ por\ paneles} = \frac{1821.15kW \cdot 0.15}{1 h} = 273.17 kW \quad (3.82)$$

Entonces, se corrobora que los 85.66 kW serán transformados por los paneles solares. Las dimensiones concretas del módulo fotovoltaico han permitido optimizar la superficie de captación, brindando la posibilidad de instalar 270 paneles fotovoltaicos distribuidos en 3 grupos de 90 módulos cada una.¹⁵²

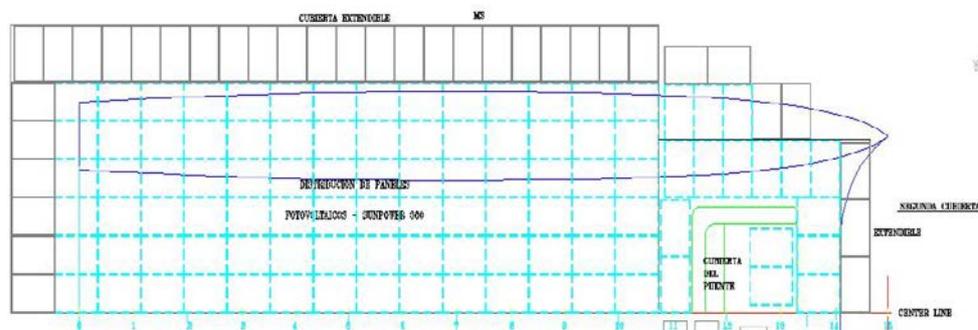


Figura 3.17.- Distribución de paneles solares

Fuente: Elaboración propia

En términos eléctricos, es muy importante considerar de qué modo se va a conectar los paneles. Es decir, si se conectan en paralelo módulos con diferentes tensiones, se provoca una importante pérdida del rendimiento de los paneles, ya que la tensión se iguala al nivel más bajo y en consecuencia potencia más baja.

Por lo tanto, se ha optado por separar el área en tres secciones utilizando un sistema de seguidores del punto de máxima potencia, trabajando de forma independiente.

Dichos paneles se han dividido en tres bloques que pueden trabajar a diferentes niveles de tensión e intensidad y en entregar la potencia de forma independiente. Los bloques tendrán 90 paneles dispuestos en 5 x 18. Dentro de

¹⁵² La conexión de paneles se debe tomar en cuenta para determinar la potencia entregada por el sistema.

cada grupo se han conectado según los requerimientos de voltaje que tendrá la carga en este caso los grupos de baterías.

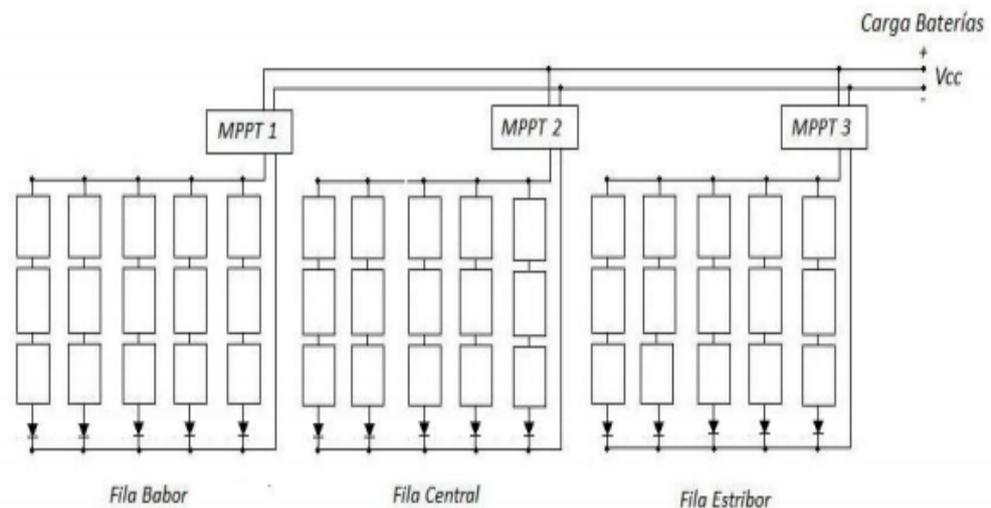


Figura 3.18.- Esquema de conexión de paneles

Fuente: Jiménez Laos, 2010

Los tres grupos y subgrupos de módulos garantizan niveles de tensión suficientes para cargar dichas baterías, que requieren un mínimo de 72V. De este modo la asociación en serie trabajando a máxima potencia, podrá entregar hasta 220/440V, si se requiere. La conexión eléctrica garantiza que, incluso con niveles de radiación solar más bajos, los grupos de baterías se sigan cargando. La potencia nominal que puede entregar el conjunto de paneles, agrupado por módulos, tiene un máximo de 97.2 kWp.

Con esta configuración, cuando los paneles ubicados en un lado reciban una incidencia de radiación solar perpendicular o variable, debido a la navegación, no se verán afectados por los paneles del otro lado que se encuentren en una posición favorable frente a la incidencia de radiación solar, generando un voltaje de salida variable.

De este modo, la salida de potencia se verá compensada independientemente de la orientación de la embarcación. Se considera esencial la utilización de un seguidor de máxima potencia con el fin de obtener los valores de máxima potencia del sistema de generación fotovoltaica.

3.12.4.2.5. Comportamiento Anual del Índice de Radiación Solar

Hemos analizado el comportamiento promedio que tendrá la embarcación en el año, sin observar la gradiente anual ni el efecto de la temperatura.

Se ha visto en parte que, el ángulo y la intensidad con el que incide el sol sobre los paneles depende de la hora del día y la ubicación geográfica, la eficiencia de los dispositivos que gestionan la energía transformada, la inclinación de los paneles fotovoltaicos respecto a su eje horizontal y la radiación solar media de la zona geográfica donde desarrollará su funcionamiento. Ahora, nos centraremos en analizar el comportamiento anual de la radiación solar en la zona y la temperatura del ambiente.

Podemos obtener la radiación solar diaria sobre una superficie horizontal a partir de las coordenadas geográficas del lugar donde la embarcación solar va a realizar actividades, a través de datos que proporciona la web de la NASA.¹⁵³

La zona geográfica por evaluar corresponde con la ubicación del puerto de Iquitos ($3^{\circ}43'44''S$ $73^{\circ}14'24''O$) y la reserva Nacional de Pacaya-Samiria ($5^{\circ}15'00''S$ $74^{\circ}40'00''O$). Al insertar los datos de la ubicación tenemos un índice de radiación solar promedio anual de $4.56 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ en el terminal de Iquitos y $4.6 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ para la Reserva Nacional de Pacaya Samiria, según Tabla 3.56.

El periodo de funcionamiento de la embarcación se desarrolla durante todo el año, pero al tratarse de una embarcación turística, su mayor uso tendrá lugar

¹⁵³ <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets@nrcan.gc.ca>

en las estaciones con de buen clima donde generalmente serán tiempos soleados.

Tabla 3.56.- Índice de radiación solar

ÍNDICE DE RADIACIÓN SOLAR PROMEDIO		
	Terminal de Iquitos	Reserva de Pacaya Samiria
Meses	Radiación solar diaria - horizontal	
	kWh/m ² /d	
Enero	4.66	4.55
Febrero	4.48	4.32
Marzo	4.51	4.27
Abril	4.31	4.22
Mayo	4.19	4.28
Junio	4.06	4.27
Julio	4.35	4.62
Agosto	4.76	4.99
Septiembre	5.04	5.19
Octubre	4.92	5.09
Noviembre	4.79	4.8
Diciembre	4.63	4.59
Anual	4.56	4.6

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la tabla, el rango de datos varía desde un mínimo de 4.06 [kWh/m²/ día] para los meses de invierno, llegando a más de 5.19 [kWh/m²/ día] para los meses de clima soleado. Para el presente cálculo se ha tomado, teniendo en cuenta las rutas, temporadas y el radio de acción, el valor promedio de 4,58 [kWh/m²/ día] como índice de radiación promedio.

Con estos valores, se puede determinar cuál es el promedio de energía que va a generar el sistema fotovoltaico instalado en la embarcación, a partir de la siguiente expresión:

$$E (kWh) = P (kWp) \cdot A_{t_{sol}}(h) \quad (3.83)$$

$$\begin{aligned} E (kWh) &= 97.2 (kWp) \cdot 4,58(h) \\ &= 445.176 kWh \end{aligned}$$

Donde

- P: Potencia nominal del sistema fotovoltaico [kWp]
- $A_{t_{sol}}$: horas equivalentes que la radiación solar se mantiene en $1000W/m^2$.

Considerando una eficiencia del sistema del 90% se obtiene un valor aproximado del 400.66 kWh¹⁵⁴, garantizando la autonomía de la embarcación, en un régimen promedio de navegación.

Para el régimen máximo de operación del buque debemos tener una capacidad de almacenamiento adicional al que genera el sistema fotovoltaico.¹⁵⁵ Las baterías deben cubrir al menos un 50 % adicional de lo que genera el sistema para garantizar la autonomía completa y la demanda de servicios a una velocidad de operación de 9.5 nudos.

En conclusión, a pesar de que se ha garantizado las condiciones anuales de operación (para una navegación promedio entre 6 - 9.5 nudos), es necesario dimensionar las reservas en función al consumo de energía requerida para 9.5 nudos. Así, se garantiza una velocidad disponible de operación de 6 nudos (sin preocuparnos de la velocidad del río con corriente en contra, en navegación,

¹⁵⁴ Según la Tabla 3.54 el consumo eléctrico promedio por día es de 394.1 kWh. Se ha conseguido 1.02 % adicional.

¹⁵⁵ Con la finalidad de garantizar el consumo eléctrico a 9.5 kn (558.9 kWh), se requiere un 39.5% adicional.

maniobras, desembarco o en puerto) y una mayor velocidad operativa en condiciones favorables.

3.12.4.2.6. Efecto Térmico en los Paneles Fotovoltaicos

Por otro lado, la temperatura disminuye la eficiencia del panel, y por ende la del sistema. Para calcular las condiciones reales de operación de una placa solar debemos consultar la ficha de características técnicas del fabricante con los siguientes parámetros.

- **TONC – Temperatura de operación de la célula.**

Es la temperatura que alcanzan las células solares dependiendo de la temperatura exterior y la irradiación solar. Este valor suele estar entre 43 y 47°C, cuanto menor sea mejor. Como valor de referencia podemos usar 45°C.

- **Coefficiente de temperatura de Potencia.**

Es la pérdida porcentual de potencia por cada grado por encima de los 25°C. Normalmente entre -0,43 y -0,47%/°C. Cuanto menor, mejor.

- **Coefficiente de temperatura de Voc.**

Es la pérdida porcentual de tensión de circuito abierto de la placa solar por cada grado de diferencia entre la temperatura ambiente de referencia 25°C y la temperatura de operación de las células. Normalmente entre -0,33 y -0,4%/°C. Cuanto menor, mejor.

- **Coefficiente de temperatura de Vmp.**

Es la pérdida porcentual de tensión de máxima potencia por cada grado de diferencia entre la temperatura ambiente de referencia 25°C y la

temperatura de operación de las células. Normalmente entre $-0,36$ y $-0,39\%/^{\circ}\text{C}$. Cuanto menor, mejor.

La temperatura de trabajo de la célula está relacionada con la temperatura ambiente y la irradiación. La temperatura de trabajo se puede obtener mediante la siguiente fórmula:

$$T_c = T_a + G \frac{T_{onc}-20}{800} \quad (3.84)$$

- T_c : temperatura de trabajo de la célula ($^{\circ}\text{C}$)
- T_a : temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)
- TONC: temperatura de operación nominal de la célula ($^{\circ}\text{C}$)
- G : irradiancia (W/m^2)

Para una irradiancia 800W , y una temperatura exterior de 42°C (2 grados por encima de la temperatura máxima registrada en la zona de operación), determinaremos la caída de potencia, variación de voltaje y energía transformada en estas condiciones.

La temperatura de trabajo de las células solares estará en:

$$T_c = 42 + 800 \frac{45-20}{800} \quad (3.85)$$

$$T_c = 67^{\circ}\text{C}$$

La variación de temperatura de operación de la célula sería de: $67^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = 42^{\circ}\text{C}$, sobre las condiciones estándar de medida.

Nuestra placa solar tiene un coeficiente de temperatura V_{oc} de $-0.4\%/^{\circ}\text{C}$ y una $V_{oc} = 69.5\text{V}$.

La caída de Tensión por cada voltio de V_{oc} sería:

$$V_{oc} = -0.4\%/^{\circ}\text{C} * 42^{\circ}\text{C} = -0.168 \quad (3.86)$$

La caída de total sería:

$$V_{oc} = -0.168 * 69.5V = -11.67 [V] \quad (3.87)$$

Por lo tanto, con temperatura exterior de 42°C la Voc de la placa solar sería 57.83V.

La caída de potencia, considerando el coeficiente de temperatura de potencia máxima de nuestra placa del -0.29 %/°C. Así, la caída de Potencia porcentual por cada Watt sería:

$$P = -0.29\%/^{\circ}C * 42^{\circ}C = -0.1218 \quad (3.88)$$

La caída de potencia total sería:

$$P_{perdida} = -0.1218 * 360 = 43.848 [W] \quad (3.88)$$

Por lo tanto, con temperatura exterior de 42°C, la nueva potencia de salida de la placa solar sería 316.15 W.

Siguiendo la metodología realizada, la nueva energía trasformada en estas condiciones extremas, sería:

$$E (kWh) = 85.361 (kWp) . 4,58(h) = 390.95 [kWh] \quad (3.89)$$

Considerando una eficiencia del sistema del 90% se obtiene un valor aproximado del 351.85 kWh.

Por tanto, se tendría completa seguridad que la demanda promedio para las condiciones normales de operación (para una navegación promedio entre 6 - 9.5 kn) están suplidas en un 89.27 %, mientras que solo se necesitará un 42.95% adicional para la suplir condición operativa a 9.5 kn, las cuales serán completamente suplidas si se mantiene la capacidad de reserva planteada del 50%.

En resumen, al dimensionar las reservas en función al consumo de energía requerida para 9.5 nudos, como anteriormente habíamos realizado. Se ha garantizado una velocidad disponible de operación de 6 nudos, a pesar de las caídas de tensión y pérdidas de potencia por efectos de la temperatura, la variación del índice solar promedio en las diferentes estaciones, velocidad del río y pérdidas asociadas del sistema.

3.12.4.3. Proceso de Carga

Para entender bien la concepción del grupo de baterías, se va a explicar de forma resumida la matriz energética que sustenta la embarcación. En el siguiente diagrama se muestra de cómo interactúan sus principales elementos.

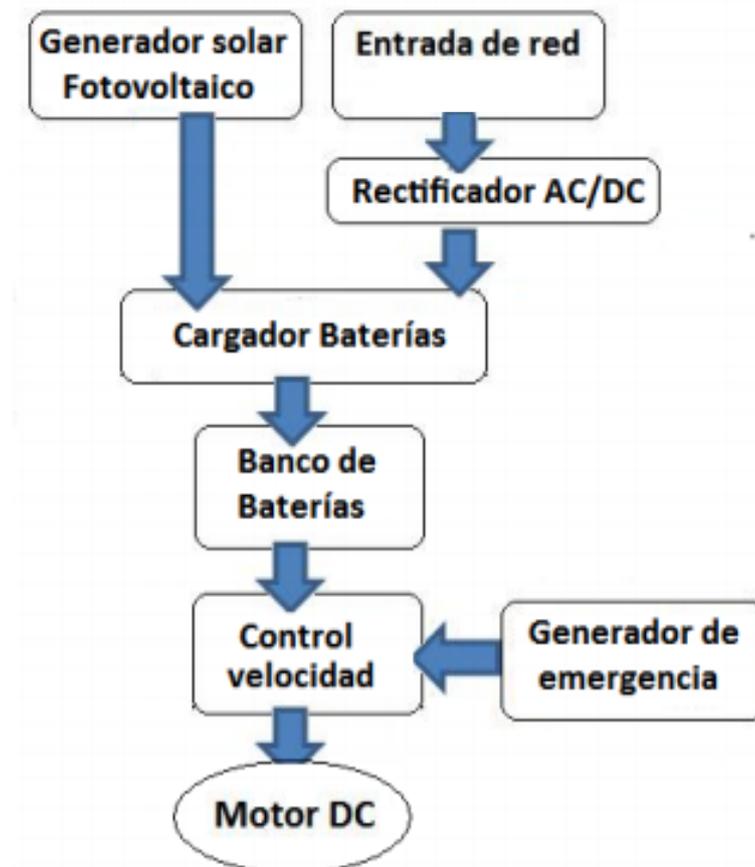


Figura 3.19.- Esquema de proceso de carga

Fuente: Jiménez Laos, 2010

La energía que alimenta las baterías procede exclusivamente de tres fuentes: el generador solar fotovoltaico, la energía procedente de la red eléctrica fija y un generador de emergencia.

Siempre que la embarcación se encuentre estacionada en puerto estará conectada a la red cargando el grupo de baterías. Durante la navegación, la energía eléctrica acumulada en los grupos de baterías se entrega progresivamente al motor para convertirse en la energía mecánica que mueve la embarcación. Es decir, la embarcación se carga en puerto (siempre que se pueda) con la energía de la red eléctrica fija más la aportada por el sistema fotovoltaico para agilizar actividades de operación. Una vez cargada, sale a navegar y va consumiendo la energía acumulada mientras se va recargando mediante los paneles solares. Se puntualiza, que cuando la embarcación está navegando la energía se consume a un nivel mucho más elevado del que se recarga, por ellos la necesidad de los bancos de baterías, que son los medios de reserva. Aunque el dimensionado de las baterías está concebido para proporcionar autonomía suficiente al barco, se debe garantizar un aporte de energía auxiliar. En este caso, automáticamente arranca un generador eléctrico de combustión que alimenta directamente el motor y permite que la embarcación pueda regresar a puerto.

3.12.4.4. Cálculos de los Medios de Reserva

3.12.4.4.1. Dimensionamiento de baterías

En primer lugar, se va a dimensionar la capacidad de los bancos de baterías que almacenan la energía que la embarcación necesita para propulsarse durante un tiempo determinado. La capacidad de baterías debe dimensionarse en función a la máxima demanda que podría tener la embarcación.

La energía eléctrica para generar por hora, para una velocidad de 9.5 kn, con una autonomía de 5 horas, a efectos de garantizar el perfil operativo por tiempo adicional en horas de atraque, amarre y fondeo como se ha realizado, se puede expresar como:

$$E_{9.5kn}(kwh) = Consumo\ Total / h_{9.5kn} \cdot \#Tiempo_{Autonomía} \quad (3.90)$$

$$E (kwh) = 121.5 [kw]x5[h] = 607.5 kWh$$

El siguiente paso, es determinar cuanta energía se recibirá desde el generador solar fotovoltaico durante el trayecto de navegación. Este valor ya lo hemos estimado y varía entre 351.85 - 400.66 kWh, durante todo el tiempo de captación disponible en la selva, considerando los efectos de la temperatura.

Recordemos que la embarcación realizará paseos turísticos y avistamiento de especies y turismo de contacto con un tiempo mínimo de navegación de 4 hr, a 9.5 kn (17.594 km/h), alcanzando una radio de 50-70.3 km. Por lo que además del tiempo que está en movimiento se deben sumar las esperas en las que está parada. Este periodo supone un incremento aproximado de 1 hora sobre el tiempo de navegación, aunque el tiempo de captación se mejoraría debemos considerar que el tiempo disponible en la selva no supera las 5 horas en promedio.

Por lo tanto, el tiempo total de operación del sistema fotovoltaico será la suma del tiempo de navegación y el tiempo de espera.

$$Tiempo\ de\ Operación = T.Navegación + T.Espera = 5h \quad (3.91)$$

Por último, con la demanda de energía requerida y el aporte solar se determina la capacidad necesaria de los grupos de baterías que sirven de respaldo.

$$E_{baterias} = E_{9.5kn} - E_{solar} \quad (3.92)$$

$$E\ baterias = 607.5 - 351.1 = 255.65 [kwh]$$

3.12.4.5. Selección de Baterías

Dentro de los tipos de baterías disponibles se tiene de tres tipos: Batería Plomo-ácido con celdas convencionales, Batería Plomo-ácido monoblock y Batería de Litio Ion.

Las primeras de plomo ácido son una opción bastante conservadora, ya que es de uso muy extendido para aplicaciones de acumulación de energía, tanto en instalaciones fotovoltaicas como en sistemas de respaldo de energía como UPS¹⁵⁶.

La segunda tecnología de Litio-Ion, tiene características especiales al ser una opción muy apropiada para el tipo particular de instalación sobre el que se está trabajando.

La selección de la batería ha considerado los siguientes factores:

- Es imprescindible que permita descargas profundas.
- Debe ser libre de mantenimiento durante toda su vida útil.
- Debe estar sellada, ya que al navegar podría derramar su electrolito.

La batería de Litio-Ion es una tecnología más innovadora, siendo una excelente opción para vehículos eléctricos debido a su alta densidad energética. Al utilizar aleaciones de metales más ligeros, se consiguen relaciones energía/peso que cuadriplican las de los acumuladores de plomo ácido. Además del factor peso posee las siguientes ventajas:

- Entrega la energía con unos niveles de descarga muy lineales, independientemente del estado de carga de la batería
- Tiene una vida útil mayor, soportando ciclos de descarga profunda
- En términos de tensión, genera un 60% que las de Pb-Ad, lo que convierte en un argumento suficiente para contemplarla como la mejor opción del diseño.

Realizar un análisis completo de cada una de las tecnologías requiere un recurso de tiempo del que no se dispone, pero existen dos parámetros que hacen la batería de Litio-Ion como la más idónea, su densidad energética y su larga vida útil.

¹⁵⁶ Por sus siglas en inglés, Uninterruptible Power Supply (UPS).

El gran inconveniente de la batería de Li-Ion es la inversión inicial, que comparada con tecnologías como la de plomo es notablemente mayor. Esto no implica que su coste de amortización sea elevado, al tener mayor vida útil su coste en el tiempo se atenúa considerablemente

Con las anteriores características, se ha seleccionado una batería disponible¹⁵⁷, como se muestra en la Tabla 3.57.

Tabla 3.57.- Características de la batería seleccionada

Tecnología	Ion litio (NCA)
Voltaje De Batería	72 V
Capacidad de Batería	334 Ah
Eficiencia de Sistema Acumulador	0.9
Profundidad de Descarga	0.8
Peso	43 kg +/- 160 gr

Fuente: Thunder-sky lithium batteries.

La capacidad de baterías es afectada por dos factores: la eficiencia en la profundidad de la descarga y la eficiencia del sistema de acoplado de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$E_{real\ bat.} = \frac{E_{bat.}}{\eta_{prof. Desc} \eta_{sistema}} [kwh] \quad (3.93)$$

$$E_{real\ bat.} = \frac{255.65}{0.8 \times 0.9} = 355.07 [kwh]$$

Formando un conjunto de elementos que proporcionen una tensión nominal de 72V, la capacidad de baterías vendría dada por la siguiente ecuación:

$$Capacidad_{baterias} = \frac{E_{real\ bat.}}{V_{bat.}} \quad (3.94)$$

¹⁵⁷ Modelos Similares pueden encontrarse en la página Web del fabricante Thunder-sky lithium batteries, visitar: <http://www.thunder-sky.com>

$$Capacidad_{baterias} = \frac{355.07 \text{ kwh}}{72 \text{ V}} = 4931.53 \text{ Ah}$$

La cantidad de baterías es $4931.53 \text{ Ah}/334 \text{ Ah} \approx 15$ baterías, de modo que ubicaremos dos bancos de 8 baterías a cada lado y adicionalmente se colocará 8 baterías extras como reserva de energía adicional, al centro.

3.12.5. Sistema de Emergencia

Las normativas de clasificación indican que el sistema debe estar compuesto de un grupo generador o un grupo de acumuladores. Cualquiera de estas, debe conectarse automáticamente al cuadro de emergencia (en caso de fallo en el cuadro principal), conectarse automáticamente en menos de 45 s y suministrar energía a los servicios como: alumbrado de emergencia, luces de navegación, equipos de comunicaciones interior, alarma general, equipos de comunicación interior, detección de incendios e instalaciones necesarias.¹⁵⁸

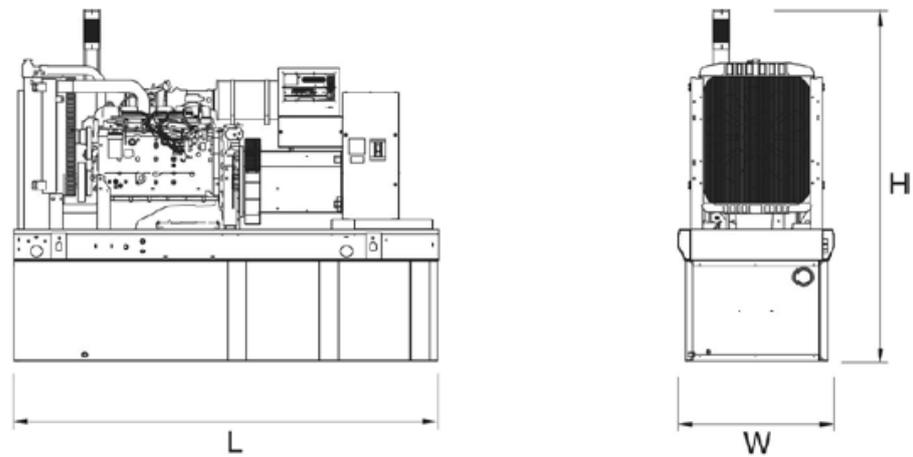
3.12.5.1. Generador Eléctrico

De acuerdo con la Tabla 3.53, la demanda de potencia total máxima a 9.5 kn es de 135.65 kW. Considerando un 10% adicional (149.23 kW) y un factor de potencia de al menos 0.8, la demanda de potencia máxima para la selección del transformador sería de 186.33 kVA.

Se repartirá la potencia máxima en dos transformadores de 90kW/113 kVA @ 1800 rpm, los cuales trabajarán al menos en un 82.7%.¹⁵⁹

¹⁵⁸ Tomado de NR 217 D, Ch 1, Sec. 6, 5.2.1-5.2.3/ NR 217 C, Ch 2, Sec. 2, 4.1.1.

¹⁵⁹ Datos seleccionados de un SD 100 – Generac Industrial Power. Modelo similar al 90/113 kVA Cummins, pero más ligero, encapsulado y con tanque de reserva incorporado.

**OPEN SET**

RUN TIME HOURS	USABLE CAPACITY GAL (L)	L x W x H in (mm)	WT lbs (kg) - Tank & Open Set
NO TANK	-	110 (2794) x 40 (1016) x 65 (1651)	3104 (1408)
12	90 (340.7)	110 (2794) x 40 (1016) x 77 (1955.8)	3813 (1730)
30	220 (832.8)	110 (2794) x 40 (1016) x 89 (2260.6)	4146 (1881)
48	350 (1324.9)	110 (2794) x 40 (1016) x 101 (2565.4)	4488 (2036)
70	510 (1930.6)	110 (2794) x 40 (1016) x 105 (2667)	4469 (2029)
81	589 (2229.6)	128 (3251.2) x 49 (1244.6) x 107 (2717.8)	4948 (2244)
95	693 (2623.3)	136 (3454.4) x 53 (1346.2) x 107 (2717.8)	4667 (2117)

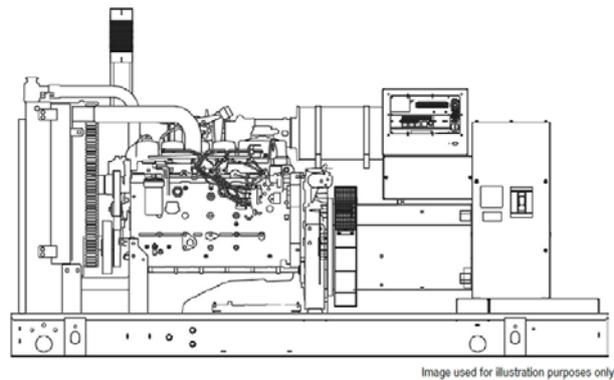
Figura 3.20.- Características del generador

Fuente: Generac Industrial Power

El consumo de combustible para este transformador es de 27.6 [Lph] para un funcionamiento a plena carga.¹⁶⁰ Considerando que los transformadores trabajaran alrededor de un 83 %, el consumo de combustible sería de 23.996 [Lph] para estas nuevas condiciones.¹⁶¹

¹⁶⁰ El peso del combustible estimado para estas condiciones sería de 2.17 toneladas (2649.6 L / 48 Horas de servicio continuo) para ambos generadores.

¹⁶¹ El peso del combustible estimado para estas condiciones sería de 1.89 toneladas (2303.6 L / 48 Horas de servicio continuo) para ambos generadores.



Fuel Pump Lift - ft (m)
3 (1)

Total Fuel Pump Flow (Combustion + Return)
29.1 gph

Diesel - gph (lph)

Percent Load	gph (lph)
25%	2.2 (8.3)
50%	4.2 (15.9)
75%	5.9 (22.3)
100%	7.3 (27.6)

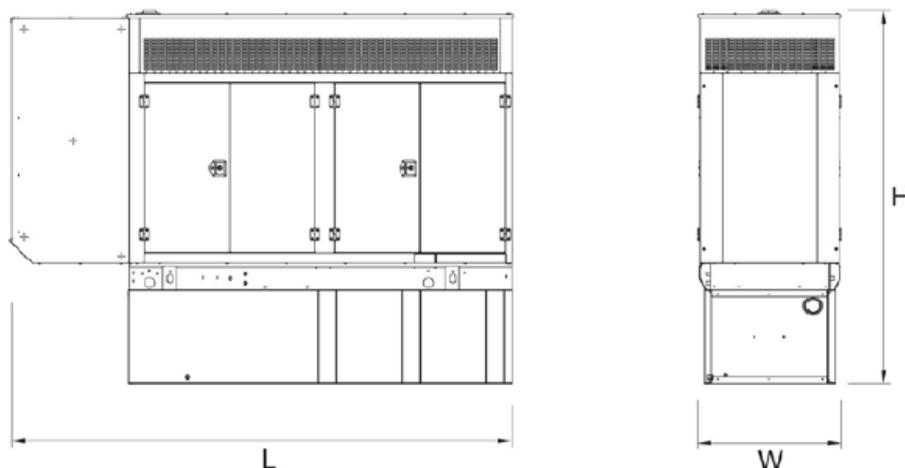
* Fuel supply installation must accommodate fuel consumption rates at 100% load.

Figura 3.21.- Consumo de combustible

Fuente: Generac Industrial Power

El transformador pesa aproximadamente 1.408 [ton]. Si le adicionamos un protector de ruido totalmente encapsulado nivel II (ideal para transporte de pasajeros y evitar un ruido superior a 90 db), el peso final sería de 1.558 [ton].

La Figura 3.22 muestra las medidas finales del transformador elegido.



LEVEL 2 ACOUSTIC ENCLOSURE

RUN TIME HOURS	USABLE CAPACITY GAL (L)	L x W x H in (mm)	WT lbs (kg) - Enclosure Only	
			Steel	Aluminum
NO TANK	-	145 (3683) x 40 (1016) x 81 (2057)	1000 (454)	330 (150)
12	90 (340.7)	145 (3683) x 40 (1016) x 84 (2134)		
30	220 (832.8)	145 (3683) x 40 (1016) x 106 (2692)		
48	350 (1324.9)	145 (3683) x 40 (1016) x 118 (2997)		
70	510 (1930.6)	145 (3683) x 47 (1194) x 122 (3099)		
81	589 (2229.6)	145 (3683) x 49 (1245) x 124 (3150)		
95	693 (2623.3)	145 (3683) x 53 (1346) x 124 (3150)		

Figura 3.22.- Dimensiones finales del generador

Fuente: Generac Industrial Power

3.12.5.2. Sistema Transitorio de Emergencia

Generalmente, se dimensiona un sistema de baterías de emergencia para facilitar la iluminación de los pasajeros (360 W/24 V) a fin de evitar el pánico hasta que entre en funcionamiento el generador, en un tiempo aproximado de 30 min.

La capacidad de estas baterías será dada por la siguiente expresión:

$$Baterias_{ST} = I * t = P * t / V \tag{3.95}$$

$$Baterias_{ST} = \frac{360 * 0.5}{24} = 7.5 [Ah]$$

Bastará elegir dos baterías 20 Ah/12 V¹⁶², las cuales no representan mayores complicaciones.

3.12.5.3. Transformadores y Rectificadores

Cuando se active el sistema de emergencia se debe transformar la energía eléctrica para que supla la demanda DC (red 24/72V CC) que es de 107.72 [kW]¹⁶³. Por tanto, para cada generador, se instalarán dos transformadores/rectificadores con capacidad de 60 kW/75 kVA (cos φ = 0.8).

3.12.6. Conexión Eléctrica

No entraremos en detalle debido al alcance del trabajo y lo minucioso de la selección, pero la norma recomienda que todas las conexiones en general, para nuestro tipo de propulsión y sistemas deban ser aislados, de tipo retardante de llama y auto extingüibles (IEC 60332). El diámetro mínimo recomendado para los diferentes tipos de corriente y opciones se muestran, de acuerdo con las recomendaciones de la NR 217 C, Ch. 2, Sec. 12 – Tablas 2 y 3.¹⁶⁴

Como una característica, la norma establece que la sección mínima de las líneas permanentes de cables eléctricos, calefacción, sistemas de iluminación y los circuitos de control para centrales eléctricas serán de 1.0 mm²; en sistemas de seguridad y control automático de 0.75 mm²; para equipos de telecomunicación y automatización de al menos 0.5 mm²; para sistemas de telecomunicaciones y sistemas no relevantes para la seguridad del buque y como gestor de datos / cables de datos, y similares, de al menos 0.2 mm².

¹⁶² Capacidad tomada de una batería del tipo YFT150-12, catalogo disponible en:

https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/86290/Yuasa.pdf

¹⁶³ De acuerdo con la Tabla 3.50, la demanda eléctrica es de 99.1 kW, al cual se ha considerado una eficiencia de 0.92 ascendiendo a 107.72 kW.

¹⁶⁴ Tablas completas pueden verse descargando la normativa en:

<https://www.veristar.com/portal/veristarinfo>

Dentro de las casetas y pañoles diarios, los conductores deben tener una sección de 0.75 mm² o superior. También puede ser utilizado para conexiones móviles de aparatos con una corriente entrada de hasta 6 A.

Tabla 3.58.- Tabla para la selección del diámetro de conductores

Table 2 : Current rating of cables with a maximum permissible conductor temperature of 60°C at an ambient temperature of 40°C

1 Nominal cross-section of the copper conductor (mm ²)	2		3		4		5		6		7	
	Continuous service				Short time service S 2 = 30 min.				Short time service S 2 = 60 min.			
	Max. permissible current (A)		Rated fuse current (A)		Max. permissible current (A)		Rated fuse current (A)		Max. permissible current (A)		Rated fuse current (A)	
Single-core cables												
1,0	9	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
1,5	14	16	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
2,5	19	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
4	26	25	28	28	25	25	28	28	25	28	28	25
6	34	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
10	46	50	49	50	50	50	49	49	50	50	50	50
16	62	63	66	66	63	63	66	66	63	66	66	63
25	82	80	87	87	80	80	87	87	80	87	87	80
35	101	100	108	108	100	100	107	107	100	107	107	100
50	126	125	136	136	160	160	134	134	160	160	160	160
70	156	160	171	171	160	160	165	165	160	165	165	160
95	189	160	217	217	224	224	202	202	200	202	202	200
120	219	224	251	251	250	250	234	234	224	234	234	224
150	251	250	294	294	300	300	271	271	250	271	271	250
185	287	250	353	353	315	315	311	311	300	311	311	300
240	337	315	420	420	–	–	371	371	–	371	371	–
300	388	355	500	500	–	–	435	435	–	435	435	–
Two-core cables												

Fuente: NR 217 C, Ch. 2, Sec. 12, pág. 180

La conexión en puerto, por temas de reparaciones, fallas en el sistema, o algún otro problema debe realizarse mediante una conexión universal adecuada, al igual que cualquier conexión entre equipos.

La Figura 3.23 nuestro el esquema de conexión general que se ha tomado como referencia por parte del proveedor de los motores DC. Lógicamente, las tensiones de trabajo y corriente varían de acuerdo con los elementos seleccionados anteriormente, pero es una gran ayuda para entender la conexión eléctrica global.

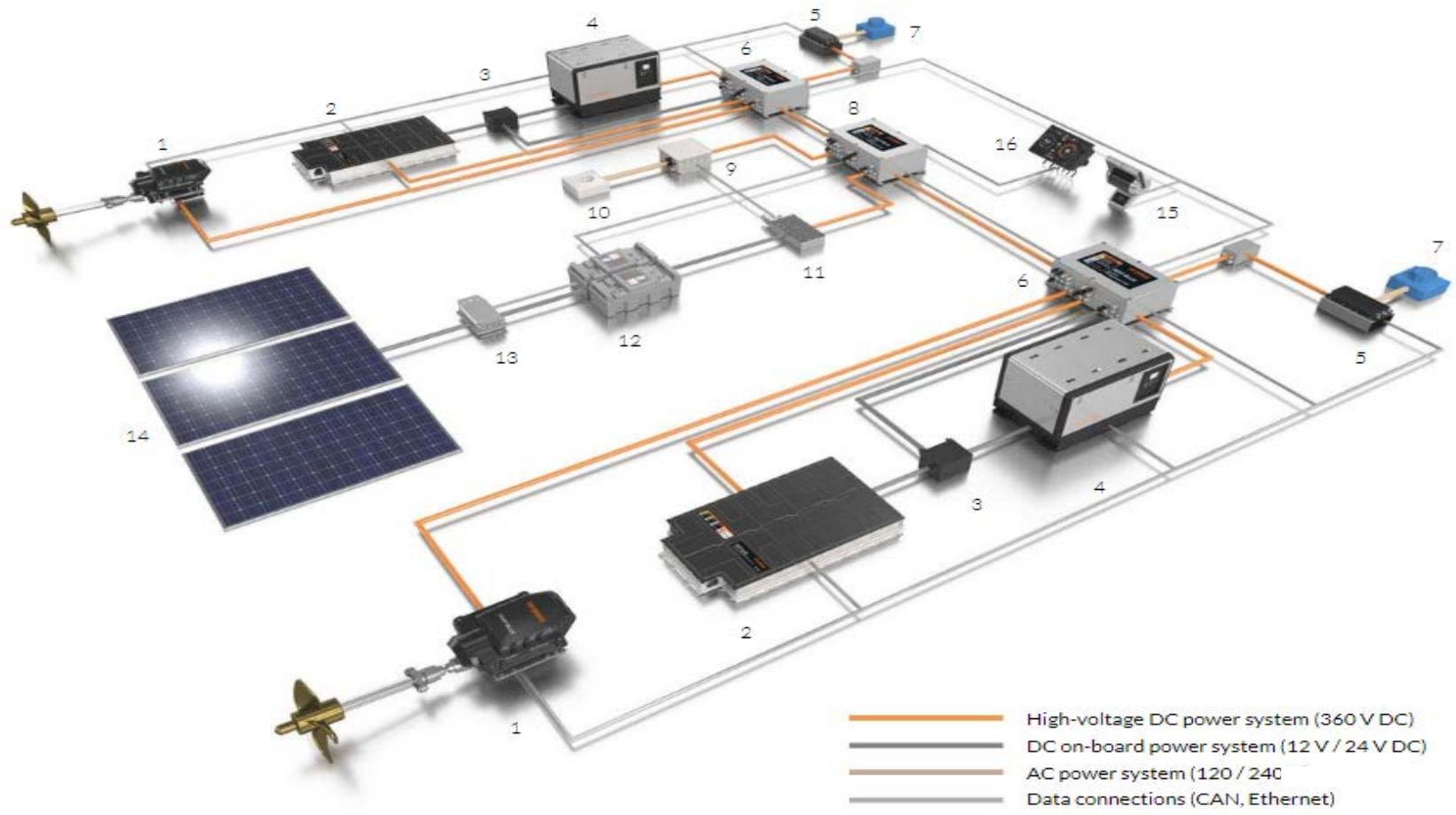


Figura 3.23.- Esquema General de Conexión Eléctrica

Fuente: <https://www.torqueedo.com/us/en-us/products/hybrid-drives>

Según el esquema numérico de la Figura 3.23 se tiene:

1. Motor Eléctrico
2. Sistema de batería de litio de alta capacidad.
3. Baterías de 12 V: Fuente de alimentación del sistema para poner en marcha el sistema de batería de alto voltaje y el generador diesel.
4. Generador diésel.
5. Cargadores de energía en tierra: para cargar el sistema desde la fuente de alimentación de AC en el puerto.
6. Caja de conexión de la unidad: el corazón del sistema de gestión de la unidad. Aquí es donde se concentran todas las conexiones y las funciones de administración del sistema para el tren de transmisión.
7. Conexión eléctrica en tierra: el gran banco de baterías se puede recargar con suficiente energía para el viaje cuando está en el puerto.
8. Caja de conexión del sistema: aquí es donde las conexiones y las funciones de administración del sistema están conectadas entre sí para formar un sistema completo y donde se integran otras funciones (conveniencia) para barcos y yates más grandes.
9. Inversor de AC: proporciona independencia de las condiciones de energía en tierra. El voltaje y la frecuencia se pueden configurar libremente.
10. Sistema de alimentación de AC aislado (corriente de 120/240 V AC, 50/60 Hz): el equipo y la toma de alimentación están conectados a través de un distribuidor de alimentación de AC.

11. Convertidor bidireccional de CC / CC: conecta el sistema de alimentación de 24 V CC con el sistema de batería, lo que permite la transferencia gratuita de energía.
12. Baterías a bordo de 24 V: actúan como un búfer y una fuente de alimentación redundante para todo el sistema eléctrico a bordo.
13. Controlador de carga solar: convierte la energía generada por la energía fotovoltaica en el voltaje correcto para el sistema de energía a bordo.
14. Módulos fotovoltaicos: generan energía solar como potencia adicional para el sistema.
15. Acelerador electrónico: controla el rendimiento de los motores eléctricos.
16. Pantalla con computadora integrada: permite la administración y modificación flexibles de los parámetros que controlan el sistema.

Para nuestro caso, las baterías a bordo están conformadas por un sistema de 72V (permite obtener 360V), mientras que las baterías de 12 V se usan para arranque inicial¹⁶⁵. Otros servicios son cubiertos a través de rectificadores y transformadores como ya hemos señalado.

3.12.7. Diagrama Unifilar

El diagrama unifilar aproximado se muestra en el plano TMC – 18 - 011 - Diagrama Unifilar Eléctrico.

¹⁶⁵ Estas baterías dependen del equipo seleccionado. Generalmente, vienen incorporadas.

3.13. RESISTENCIA ESTRUCTURAL

El diseño estructural propuesto, seguirá los lineamientos de la normativa NR 217 B Ch. 5 Sec. 6, ¹⁶⁶ la estructuración de embarcaciones similares y el escantillonado estructural compatible, según aplique y dentro del alcance propuesto.

3.13.1. Materiales

De acuerdo con las especificaciones de la Tabla 3.4, el casco y las estructuras serán de aluminio 5083 - H111. Las características se muestran en la Tabla 3.59, tomadas de su ficha técnica.

Tabla 3.59.- Características del aluminio 5083-H111

-5083- (ALUMINIO-MAGNESIO 4,5%)										
COMPOSICIÓN QUÍMICA										
%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros elementos	Al
Mínimo				0,40	4,00	0,05			Zi + Total	
Máximo	0,40	0,40	0,10	1,00	4,90	0,25	0,25	0,15	Ti 0,15	El resto
PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS (a temperatura ambiente de 20°C)										
Estado	Características a la tracción					Dureza				
	Carga de rotura Rm. N/mm ²	Limite elástico Rp 0,2. N/mm ²	Alargamiento A 5,65%	Limite a la fatiga N/mm ²	Resistencia a la cizalladura τ N/mm ²	Brinell (HB)		Vickers		
0/H111	300	145	23	250	175	70				
HX2	330	240	17	280	185	90				
HX4	360	275	16	280	200	100				
HX6	380	305	10		210	105				
HX8	400	335	9		220	110				
Hx9	420	370	5		230	115				
PROPIEDADES FÍSICAS TÍPICAS (a temperatura ambiente de 20°C)										
Módulo elástico N/mm ²	Peso específico g/cm ³	Intervalo de fusión °C	Coefficiente de dilatación lineal 1/10 ⁶ K	Conductividad térmica W/m K	Resistividad eléctrica a 20°C - $\mu\Omega$ cm	Conductividad eléctrica % IACS	Potencial de disolución V			
71,000	2,66	580-640	23,8	117	6,0	28,5	-0,86			

Fuente: Ficha Técnica disponible en Internet. ¹⁶⁷

Se puede afirmar que presenta un muy buen acabado de soldadura, un excelente comportamiento en mar, con un buen desempeño estructural y de acabado.

¹⁶⁶ Las disposiciones y escantillonados no cubiertos por esta Sección se encuentran especificados desde el Cap. 5, Sec 2 hasta el Cap. 5, Sec. 4.

¹⁶⁷ Tomado de http://www.alacermas.com/img/galeria/files/aluminio/chapa_5083_aluminio.pdf

Los radios de plegado lo hacen trabajable para el rango desarrollado por las líneas de forma.¹⁶⁸ Lo que le permitiría adoptar las formas de proa y popa del patín y la estructura central.

3.13.2. Sistema de Construcción

Los elementos primarios y secundarios quedarán definidos de acuerdo con el espacio entre refuerzos similares, la longitud no soportada y disponibilidad en el medio, prefiriendo los comerciales.

Se ha elegido un arreglo de construcción longitudinal, constituyendo los elementos primarios y refuerzos secundarios para la transmisión de esfuerzos estructurales. Los elementos principales serán los elementos longitudinales, mientras los elementos secundarios los transversales.

Los mamparos, cuadernas reforzadas, varengas, vagras, esloras y palmejares serán considerados elementos primarios para el soporte y transmisión de esfuerzos estructural. Los longitudinales de costado, cubierta y fondo, además de los refuerzos mamparo y otros, serán considerados refuerzos secundarios, de acuerdo con las definiciones de la norma.

Para el cálculo de los elementos se tomará las siguientes distancias. Estas podrán ser modificadas según lo permita las líneas de forma obtenida. En ningún caso serán mayores, garantizando un factor de seguridad adicional.

- Espacio de los elementos Primarios (S): 2.0 m
- Espacio de los Refuerzos Secundarios (s): 0.5 m
- Longitud no soportada de los elementos Primarios (l): 2.0 m
- Longitud no soportada de los refuerzos Secundarios (l): 2.0 m

¹⁶⁸ El radio de plegado es de 2 veces el espesor de la chapa para espesores entre 6 y 10 mm.

3.13.3. Presiones Estimadas

De acuerdo con la norma N R 217 B Ch. 5, se debe estimar, mediante una serie de coeficientes, las presiones para los elementos primarios y refuerzos secundarios.¹⁶⁹ Las presiones estimadas de los elementos, según su ubicación, se muestran en la Tabla 3.60.

Tabla 3.60.- Presiones estimadas

Presión Externa			
Costado y fondo (Z=0)			
Presión de diseño de río	[PE]	14.55	[kN/m ²]
Contrapresión de río	[Pem]	14.55	[kN/m ²]
Presión de aguas tranquilas	[PSE]	11.77	[kN/m ²]
Presión de ola de río	[PWE]	2.31	[kN/m ²]
Cubiertas Expuestas			
Cubierta Abierta	[PE]	4.9125	[kN/m ²]
Primera Cubierta - Sup.	[PE]	2	[kN/m ²]
Cubiertas Superiores - Sup.	[PE]	1.5	[kN/m ²]
Cubiertas Publicas	[PE]	4	[kN/m ²]
Cargas Internas			
Líquidos			
Carga líquida / Suministro	[PC]	24.42	[kN/m ²]
Presión de aguas Tranquilas	[PS]	22.563	[kN/m ²]
Presión de Inercia	[PW]	1.548	[kN/m ²]
Acomodación			
Presión Transmitida	[P]	26.50	[kN/m ²]
Presión de aguas tranquilas	[Ps]	4	[kN/m ²]
Presión de Inercia	[Pw,z]	22.50	[kN/m ²]
Grandes Áreas	[Ps]	4	[kN/m ²]
Cabinas	[Ps]	3	[kN/m ²]
Otros Compartimentos	[Ps]	2.5	[kN/m ²]
Presión de inundación			
Presión de aguas Tranquilas	[PFL]	22.563	[kN/m ²]

Fuente: Elaboración propia.

¹⁶⁹ Los coeficientes y detalle de presiones se ven claramente definidas en el Capítulo 3 Sec. 4 de la norma. Hoja de cálculo en los Anexos.

Los valores obtenidos consideran que nuestra embarcación realizará una navegación interna con un régimen de velocidad relativamente bajo a moderado, compatibles al rango de navegación IN (0,6), con altura de ola significativa máxima de 0.6 m y una velocidad de corriente mayor a 5.5 km/h.

3.13.4. Área Seccional de Cubierta Resistente

La cubierta resistente es la cubierta continua más alta. El área seccional de la cubierta resistente es la suma del área seccional de los elementos que contribuyen a su resistencia longitudinal.

Esta área seccional incluye las planchas de cubierta (fuera de las escotillas), palmejares, estructuras de troncos, esloras longitudinales de cubierta siempre que se garantice su continuidad, longitudinales de cubierta cuando la cubierta está reforzada longitudinalmente siempre que se garantice su continuidad.

En el cuerpo medio, el área seccional total de la cubierta deberá no ser menor, en cm^2 , a:

$$A = 6BsK_{MZ}(kL)^{0.5} [cm^2] \quad (3.96)$$

$$A = 282.81 [cm^2]$$

Tabla 3.61.- Área seccional de cubierta resistente

ÁREA SECCIONAL DE CUBIERTA RESISTENTE		
Ítem	Cantidad	Unidad
B	12.50	m
s	0.50	m
K_{MZ}	1.22	---
k	1.3165	---
L	28.8	m

Fuente: Elaboración propia

3.13.5. Escantillonado de Planchas

Los espesores netos de las planchas del casco en el cuerpo central no deberán ser menores a los valores t_1 , t_2 y t_3 que se mostraron en la Tabla 2.28. Considerando los coeficientes que exigen la norma y las presiones estimadas, se ha seleccionado los siguientes espesores de planchas.¹⁷⁰

Tabla 3.62.- Espesores mínimos de las planchas del casco

ESPEORES MÍNIMOS DEL PLANCHAJE		
Tipo de elemento	Espesor mínimo de Reglamento [mm]	Espesor seleccionado [mm]
Cubierta Resistente	6.38	6.4
Cubiertas de Superestructura	4.5	4.5
Mamp. de colisión, Transversal	2.65	4.5
Otros Mamparos	3.89	4.5
Planchaje de Fondo	4.04	6.4
Planchaje de Costado	3.71	5.0
Planchaje de costado y extremos de Superestructura ¹⁷¹	3.69 4.35	4.5

Fuente: Elaboración propia

3.13.6. Escantillonado de Componentes Estructurales

3.13.6.1. Escantillonado Mínimo

La Tabla 3.59 muestra el área solicitada, módulo de sección requerida y espesor del alma solicitada para los elementos primarios y refuerzos secundarios definidos. Las presiones de diseño han sido realizadas de acuerdo con 3.9.3 y las disposiciones de la norma NR 217 B, Ch. 6, Sec. 2-6.

La estructura de la cubierta donde se instalarán los paneles considera una carga distribuida de 2.21 kN/m^2 (225 kg/m^2), suficiente para soportar los paneles y accesorios propios.

¹⁷⁰ Los coeficientes y tablas de fórmulas se muestran en detalle en los Anexos.

¹⁷¹ Planchaje exterior de la superestructura, los mamparos interiores son de fibra y tripley. será de tipo no contribuyente.

Los cálculos para bases del motor, bases de tanques, cartelas, amuradas, entre otros similares, no han sido desarrollados por ser materia del diseño de detalle. Aunque se debe señalar que se ha elegido conexiones con cartelas, configuraciones a tope y/o filete para soldadura, aligeramientos típicos y otros recomendados por la NR 217 B, según sean necesarios.

Tabla 3.63.- Características de los perfiles solicitados

REQUERIMIENTOS DE MÓDULOS DE SECCIÓN MÍNIMOS			
Ítem	Espesor solicitado t min [mm]	Área solicitada A_{sh} [cm²]	Módulo solicitado W [cm³]
Long. de fondo	4.01	0.742	18.34
Vagras Reforzadas	4.32	3.823	95.59
Cuadernas Reforzadas	4.32	2.650	43.34
Baos Reforzados	4.32	1.545	33.79
Varengas Reforzadas	4.32	0.836	95.59
Long. de Costado	4.01	0.836	15.93
Palmejar	4.32	2.868	95.59
Refz. Mamp. Colisión	3.65	1.429	24.57
Refuerzos de Mamparo	3.65	1.429	24.57
Long. de Cubierta	4.01	1.352	25.37
Esloras	4.32	5.225	174.15
Puente de Mando	4.29	---	17.33
Refz. Superestructura	4.29	---	17.33

Fuente: Elaboración propia

3.13.6.2. Perfiles Estructurales Seleccionados

Para la selección apropiada de los perfiles estructurales hemos considerado un ancho efectivo de 500 mm, y los espesores seleccionados de la Tabla 3.62 y 3.63.

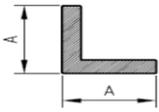
La Tabla 3.64 muestra las dimensiones, espesor del alma, módulo de sección y área calculada para los perfiles seleccionados.¹⁷²

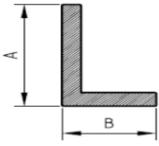
¹⁷² Hojas de calculo para determinar el espesor del alma, módulo de sección y área ha calcular de acuerdo a norma, se muestran en los anexos.

Tabla 3.64.- Características de los perfiles seleccionados

PERFILES SELECCIONADOS			
Ítem	Espesor t min [mm]	Área del perfil A _{sh} [cm ²]	Módulo calculado W [cm ³]
Longitudinal de fondo - Pl.120x6.4 mm	6.4	7.68	30.70
Vagra Refz. - L 127x100x6.4 mm	6.4	14.53	104.98
Cuaderna Refz. - T 245x100x6.4 mm	6.4	22.08	246.86
Baos Reforzados - T 245x100x6.4 mm	6.4	22.08	252.85
Varenga Refz. - T 245x100x6.4 mm	6.4	22.08	252.85
Long. de Costado - Pl.100x6.4 mm	6.4	6.4	21.77
Palmejar - L 127x100x6.4 mm	6.4	14.53	102.88
Refz. Mamp. Colisión - Pl. 120x6.4 mm	6.4	7.68	30.70
Refuerzos de Mamparo Pl. 120x6.4 mm	6.4	7.68	30.70
Long. de Cubierta - L 80x40x6.4 mm	6.4	7.68	30.37
Esloras - T 245x100x6.4 mm	6.4	22.08	252.85
Puente de Mando - L 80x40x5mm	5.0	6.00	23.94
Refz. Superestructura - L 80x40x5 mm	5.0	6.00	23.94

Fuente: Elaboración propia

ANGULOS LADOS IGUALES	A		
	15		
	20		
	25		
	30		
	40		
	50		
	60		
	60		

ANGULOS LADOS DESIGUALES	A	B
	20	10
	35	15
	40	20
	50	25
	60	20
	60	40
	70	40
	80	40
	90	40
	90	60

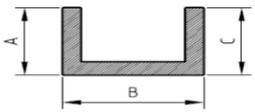
PERFILES EN "U"	A	B	C
	10	10	10
	15	15	15
	20	20	20
	15	18	15
	30	18	30

Figura 3.24.- Perfiles comerciales típicos

Fuente: <http://www.metalras.com>

Tabla 3.65.- Escantillonado final

RESUMEN DE ESCANTILLONADO FINAL E/F AMAZON 130 KW	
Elemento	Perfil / Espesor
Cubierta Resistente	Pl. 6.4 mm
Cubiertas de Superestructura	Pl. 4.5 mm
Otro tipo de Cubiertas	Pl. 6.4 mm
Mamparos Estancos, Colisión	Pl. 4.5 mm
Otros Mamparos de Subdivisión	Pl. 4.5 mm
Planchaje de Fondo	Pl. 6.4 mm
Planchaje de Costado	Pl. 5.0 mm
Pl. Costado de Superestructura	Pl. 4.5 mm
Pl. Extremo de Superestructura	Pl. 4.5 mm
Long. de fondo	Pl. 120x6.4 mm
Vagras Reforzadas	Perfil "L" 127x100x6.4 mm
Cuadernas Reforzadas	Perfil "T" 245x100x6.4 mm
Baos Reforzados	Perfil "T" 245x100x6.4 mm
Varengas Reforzadas	Perfil "T" 245x100x6.4 mm
Long. de Costado	Pl. 100x6.4 mm
Palmejar	Perfil "L" 127x100x6.4mm
Refz. Mamparo de Colisión	Pl. 120x6.4 mm
Refuerzos de Mamparo	Pl. 120x6.4 mm
Long. de Cubierta	Perfil "L" 80x400x6.4 mm
Esloras	Perfil "T" 245x100x6.4 mm
Puente de Mando	Perfil "L" 80x40x5mm
Refz. Superestructura	Perfil "L" 80x40x5mm

Fuente: Elaboración propia

3.13.7. Cálculo de Torsión Estructural

Aunque el cálculo torsional es un fenómeno complejo, por lo que se recomienda un análisis por elementos finitos, realizaremos una aproximación mediante las recomendaciones de la NR 217. El cálculo de torsión estructural del catamarán se realizará tomando como guía el apéndice NR217 B Ch. 5, App 3.

La Tabla 3.66 presenta las fórmulas y definiciones usadas en esta sección mientras que la Figura 3.25 nos representa esquemáticamente los parámetros a evaluar.

Tabla 3.66.- Fórmulas y símbolos para el análisis torsional del catamarán

Símbolos	Descripción
<i>G</i>	Centro de las rigideces r_i , de los m baos de cubierta
<i>O</i>	Origen de las abscisas, elegidas arbitrariamente
<i>m</i>	Cantidad de baos de cubierta
x_i	Abscisa, en m, del i -ésimo bao de cubierta con respecto del origen O
S_i	Espaciado del i -ésimo bao de cubierta, en m, entre las caras internas de los cascos
I_i	Inercia a flexión del i -ésimo bao de cubierta, en m^4
E_i	Módulo de Young del i -ésimo bao de cubierta, en N/mm^2 . Para aleaciones de aluminio a ser tomado igual a: $7.0 \times 10^4 N/mm^2$
r_i	Rigidez del i -ésimo bao de cubierta, en N/m , igual a: $r_i = \frac{12 \cdot E_i \cdot I_i}{S_i^3} \cdot 10^6$
a	Abscisa, en m, del centro G con respecto del origen O $a = \frac{\sum r_i \cdot x_i}{\sum r_i}$
y_i	La deformación, en m, del casco en la zona del i -ésimo bao, es: $y_i = \frac{F_i S_i^3 \cdot 10^{-6}}{12 E_i I_i} = \frac{F_i}{r_i} = d_i \omega$
F_i	La fuerza, en N, tomada sobre el i -ésimo bao de cubierta
d_i	Abscisa, en m, del i -ésimo bao de cubierta con respecto al origen G : $d_i = x_i - a$
w	Ángulo de rotación, en rad, de un casco en relación al otro alrededor de un eje transversal pasando a través de G .

Fuente: Elaboración propia¹⁷³

¹⁷³ Las fórmulas han sido tomadas del apéndice A3 – NR217 B Ch. 6, Sec. 7

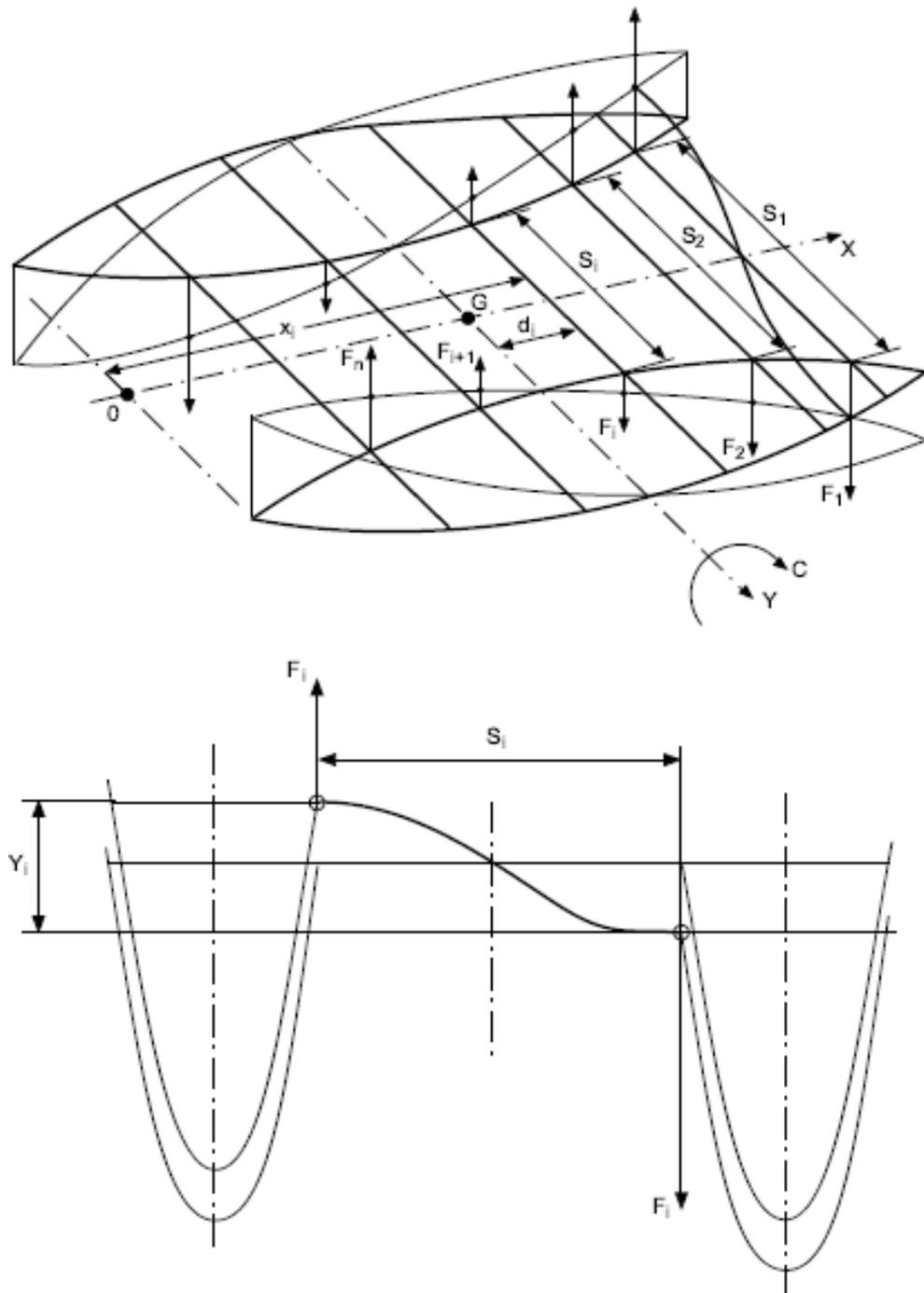


Figura 3.25.- Esquema para el cálculo torsional

Fuente: NR217 B Ch. 5, App 3, pág. 156

3.13.7.1. Momento de Conexión Torsional Transversal

El momento de conexión torsional transversal del catamarán, en [kN.m], sobre el eje transversal es dado por las siguientes expresiones:

$$M_{tt} = 1.23\Delta L a_{CG} [kN.m] \quad (3.97)$$

$$a_{CG} = 0.36 * Soc * \frac{v}{\sqrt{L}} [m/s^2] \quad (3.98)$$

$$Soc = 0.1(n + 1.1) \quad (3.100)$$

$$M_{tt} = 370.76 [kN.m]$$

Tabla 3.67.- Momento de conexión torsional transversal

MOMENTO DE CONEXIÓN TORSIONAL TRANSVERSAL		
Ítem	Cantidad	Unidad
Δ	55.47	[Ton]
a_{CG}	0.187	[m/s ²]
v	17.5	[Km/h]
$Soc:$	0.161	---
n	0.51	---
L	28.8	[m]

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, el momento torsional transversal puede ser expresado como:

$$M_{tt} = \sum F_i d_i * 10^{-3} [kN.m] \quad (3.101)$$

De modo que, al calcular el valor del momento de conexión torsional transversal, podemos calcular la fuerza actuante en cada bao o perfil estructural de conexión, que en nuestro caso será un perfil compuesto entre el bao reforzado y el refuerzo del fondo de la plataforma o puente de conexión ambos de T 200x100x6.4 mm.

Se mantendrá la distancia total entre el puente o plataforma de conexión y la sección de análisis será el perfil asociado a su respectiva plancha. Se prefiere elegir un perfil compuesto para la plataforma de conexión que baos simples, debido a que se disminuye considerablemente el peso¹⁷⁴ y se disminuyen los esfuerzos estructurales y deflexiones locales.

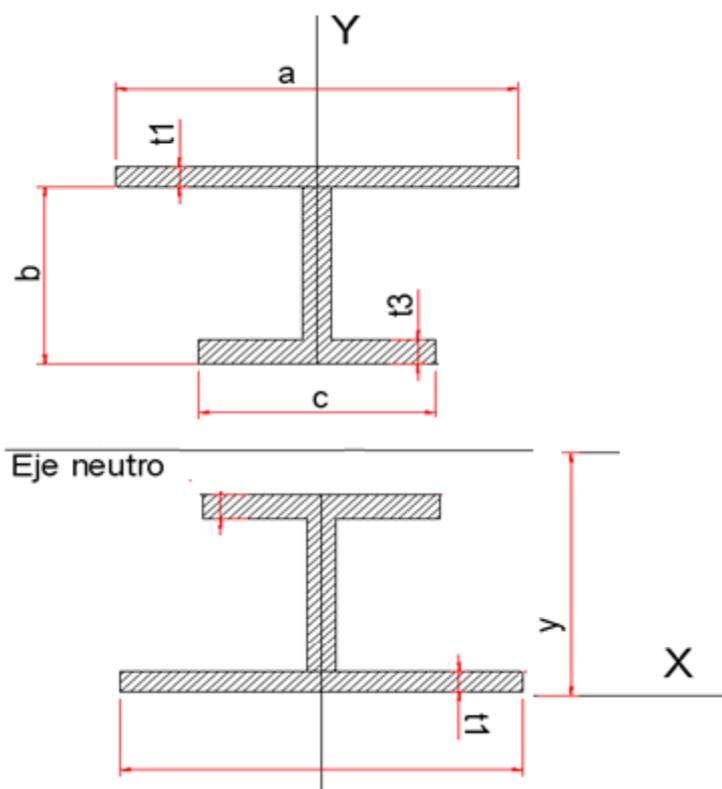


Figura 3.26.- Sección compuesta del puente de conexión

Fuente: Elaboración propia

No realizaremos modelamientos complejos, únicamente nos centraremos en los perfiles de conexión transversal de la plataforma. Cualquier otro refuerzo estructural adicional contribuye a la rigidez y disminución de esfuerzos. Por tanto, los valores obtenidos en la práctica serán mucho menores.

¹⁷⁴ Un bao simple demanda relaciones de espesor y alturas mayores a las de un perfil compuesto, de modo que se incrementaría el espesor y aún se tendría que incrementar la altura del perfil en busca de aminorar las deflexiones principalmente.

3.13.7.2. Cálculo del Ángulo de Rotación

El ángulo de rotación puede ser obtenido a partir del momento de conexión torsional transversal.

El ángulo de rotación es proporcionado por la fórmula:

$$\omega = \frac{M_{tt} \cdot 10^3}{\sum r_i d_i^2} [\text{rad}] \quad (3.102)$$

3.13.7.3. Cálculo de Deflexión

Como M_{tt} , r_i y d_i son conocidos, ω puede ser deducida, entonces, F_i en N, el momento flector M_i , en N.m, y las correspondientes deflexiones pueden ser evaluadas en cada bao o perfil de sección:

$$F_i = \omega \cdot r_i \cdot d_i [N] \quad (3.103)$$

$$M_i = \frac{F_i \cdot S_i}{2} [N \cdot m] \quad (3.104)$$

La Tabla 3.68 nos muestra los resultados de estos cálculos, expresados para cada bao, de acuerdo con la posición estimada a partir de la línea de forma. Se ha tomado como referencia constructiva las estaciones del plano de líneas de forma y disposición general.

La deflexión calculada, Y_i , y la deflexión máxima permitida, $Y_{\text{máx.}}$, se muestra en las últimas columnas de la Tabla 3.68. De acuerdo con la REC 47 IACS, la deflexión permitida se encuentra entre $5l/1000$ - $6l/1000$ [mm].

Tabla 3.68.- Cálculo torsional del catamarán

	Bao n-ésimo	di	O (Xi)	Si [m]	li [m ⁴]	ri [N/m]	di [m]	ri.Xi	ridi ²	Fi*di [N]	Fi [N]	Mi [N.m]	Yi [mm]	Y máx. [mm]	Esfuerzo normal [N/mm ²]	Esfuerzo cortante [N/mm ²]	
Popa	1 FR1 (espejo)	-14.73	0	---													
	2 FR2	-12.73	2	7.924	0.000134	226920.3	-12.73	453840.64	36786866.2	96279.83	-7561.81	-29959.88	-33.32	47.54	-89.16	-14.72	
	4 FR4	-8.73	6	7.676	0.000134	249632.9	-8.73	1497797.64	19035639.2	49820.72	-5705.28	-21896.88	-22.85	46.06	-65.17	-11.10	
	5 FR5	-6.73	8	7.578	0.000134	259443.6	-6.73	2075548.92	11759277.7	30776.78	-4571.45	-17321.24	-17.62	45.47	-51.55	-8.90	
	7 FR7	-2.73	12	7.508	0.000134	266768.2	-2.73	3201217.95	1991669.26	5212.66	-1907.74	-7161.64	-7.15	45.05	-21.31	-3.71	
Proa	9 FR9	1.27	16	7.532	0.000134	264226.2	1.27	4227618.98	424572.448	1111.21	876.61	3301.31	3.32	45.19	9.82	1.71	
	10 FR10	3.27	18	7.548	0.000134	262549.5	3.27	4725890.13	2803324.34	7336.96	2245.35	8473.97	8.55	45.29	25.22	4.37	
	12 FR12	7.27	22	7.71	0.000134	246344.9	7.27	5419588.80	13011509.8	34054.16	4685.74	18063.53	19.02	46.26	53.76	9.12	
	14 FR14	11.27	26	8.166	0.000134	207337.9	11.27	5390785.00	26323449.4	68894.62	6114.39	24965.06	29.49	49.00	74.30	11.90	
	16 FR16	13.27	28	8.764	0.000134	167725.7	13.27	4696320.36	29524701.8	77273.05	5824.18	25521.58	34.72	52.58	75.95	11.34	
	17 FR17 (refuerz. Parcial)	14.27	29	---													
	18 Roda	15.27	30	---													
Sumatoria:						2150949.23		31688608.42	141661010	370760.00	a [m]	14.73	w [rad]	0.00262			

Fuente: Elaboración propia

Los esfuerzos normales y de corte, para los perfiles superiores, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.69.- Cálculo de Esfuerzos en el puente de conexión¹⁷⁵

O (Xi)	Esfuerzo Normal [N/m ²]	Esfuerzo Cortante [N/m ²]
2	-89.16	-14.72
6	-65.17	-11.10
8	-51.55	-8.90
12	-21.31	-3.71
16	9.82	1.71
18	25.22	4.37
22	53.76	9.12
26	74.30	11.90
28	75.95	11.34

Fuente: Elaboración propia

El esfuerzo normal aproximado se muestra en la primera columna, es menor a los 171.56 [N/mm²] que establecen como límite para el material. Mientras que el esfuerzo cortante no supera los 85.78 [N/mm²] permitidos de acuerdo con norma.

3.13.8. Cálculo de Resistencia en la Viga-Buque

Los cálculos estimados para el momento flector, esfuerzo cortante y esfuerzo de sección maestra se han realizado de acuerdo con la NR 217 B Ch. 5, Sec. 2.¹⁷⁶

¹⁷⁵ Dado que no se han considerado las uniones acarteladas, mamparos longitudinales aligerados, mamparos transversales y esloras, los esfuerzos aproximados reales serán mucho menores.

¹⁷⁶ Coeficientes, parámetros y resultados se muestran con mayor detalle en los anexos.

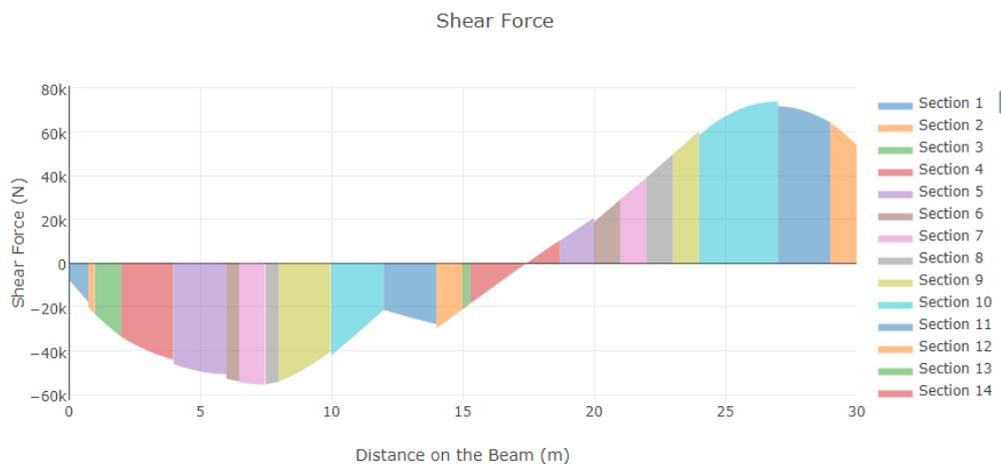


Figura 3.27.-Diagrama de fuerzas cortantes en condición liviano¹⁷⁸

Fuente: Elaboración Propia

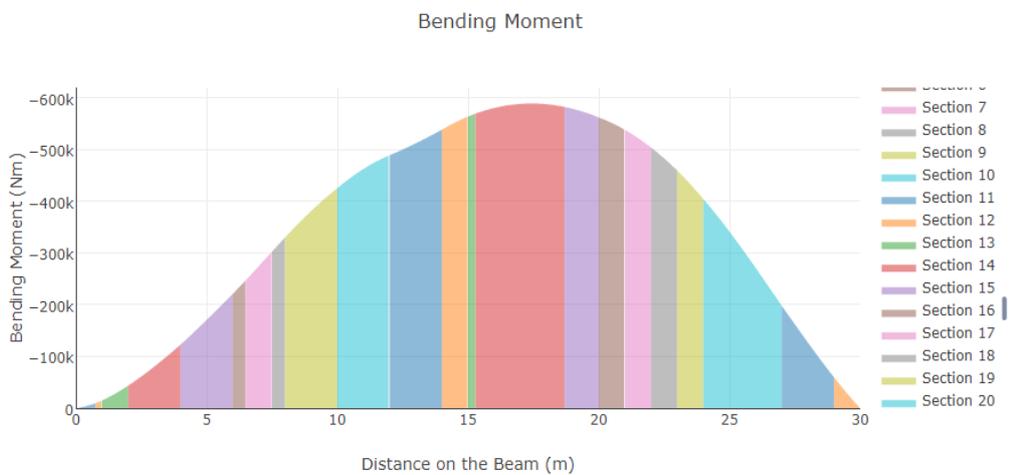


Figura 3.28.-Diagrama de momento flector en condición liviano¹⁷⁹

Fuente: Elaboración Propia

Los diagramas de fuerza cortante y momento flector para la condición de máxima carga¹⁸⁰, se muestran en las Figuras 3.29 y 3.30, respectivamente.

¹⁷⁸ Fuerza Cortante Máxima estimada de 73.86 kN, ubicado a 26.96 m del espejo de popa.

¹⁷⁹ Momento Flector Máximo estimado de 588.73 kN.m, ubicado a 17.378 m del espejo de popa.

¹⁸⁰ Con la ayuda del programa Viga.online, se estimó la distribución de cargas. Link de cálculos: [http://viga.online/#L\(30\):P\(0\)P\(30\):W\(0,30,10871.51045,10871.51045\)F\(27,2166.171\)F\(4,1959.6885](http://viga.online/#L(30):P(0)P(30):W(0,30,10871.51045,10871.51045)F(27,2166.171)F(4,1959.6885)

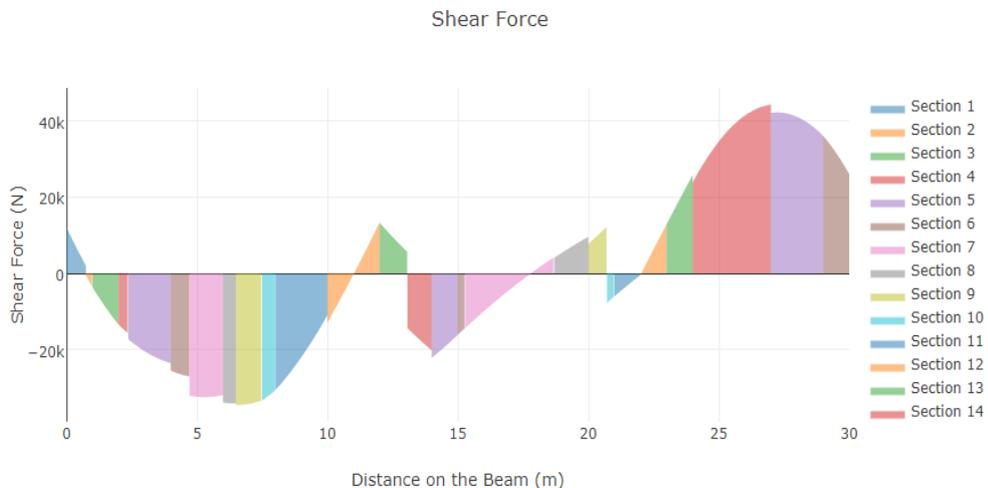


Figura 3.29.-Diagrama de fuerza cortante - Máxima carga¹⁸¹

Fuente: Elaboración Propia

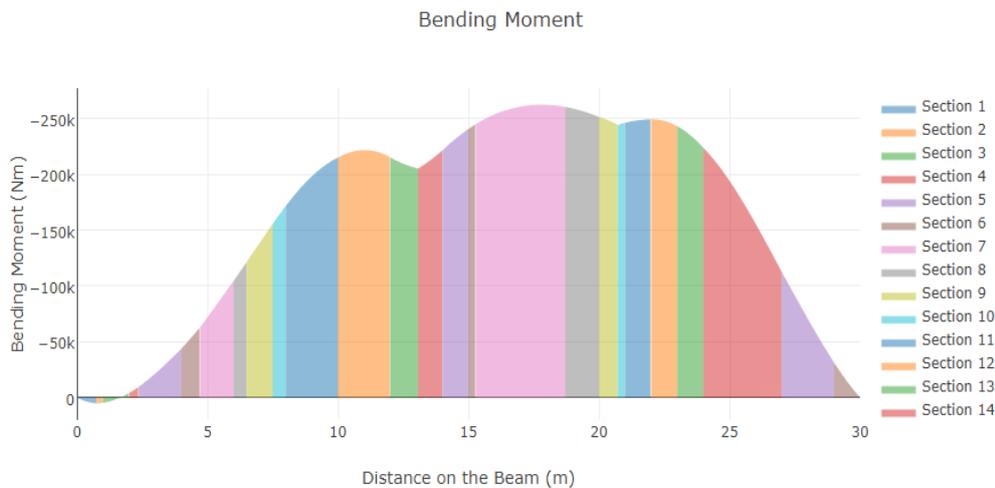


Figura 3.30.-Diagrama de momento flector - Máxima carga¹⁸²

Fuente: Elaboración Propia

[\)F\(6,1959.6885\)F\(10,1959.6885\)F\(14,1959.6885\)F\(20,1959.6885\)F\(24,1959.6885\)W\(6,12,500,500\)W\(12,22,8240,8240\)W\(4,8,1125,1125\)W\(0,1,1125,1125\)W\(29,30,1125,1125\)W\(12,14,14090.90909,14090.90909\)W\(14,20,2683.2,2683.2\)W\(0,2,2500,2500\)W\(2,8,500,500\)W\(6,7.5,2333.333333,2333.333333\)W\(21,23,200,200\)F\(6.5,370\)F\(0.75,2500\)F\(18.7,200\)F\(15.28,50\)W\(0,10,0,-23589.74\)W\(10,15,-23589.74,-28307.69\)W\(15,24,-28307.69,-23589.74\)W\(24,30,-23589.74,0\)F\(2.372,1500\)F\(13.07,20000\)F\(4.72,5000\)F\(20.72,20000\)](#)

¹⁸¹ Fuerza Cortante Máxima estimada de 44.34 kN, ubicado a 27 m del espejo de popa.

¹⁸² Momento Flector Máximo estimado de 262.25 kN.m, ubicado a 17.87 m del espejo de popa.

Por navegar en aguas tranquilas, el momento flector estimado de diseño, en condición de arrufo, será igual a 0. Estos valores deben compararse con los obtenidos mediante norma, según la Tabla 3.70. Usaremos el mayor valor obtenido.

3.13.8.1. Momento Flector Estimado

Los momentos flectores de aguas tranquilas, (sección media) en kN.m, para buques de pasaje, en condición de quebranto y arrufo respectivamente, se obtiene mediante las siguientes ecuaciones.

$$M_{H0} = 0.273L^2B^{1.342}D^{0.172}(1.265 - C_b) [kN.m] \quad (3.105)$$

$$M_{H0} = 2126.45 [kN.m]$$

$$M_{S0} = 0 [kN.m]$$

Para el rango de Navegación IN (0,6), se debe adicionar el momento flector adicional en M_W , el cual se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$M_W = 0.045L^2BC_b [kN.m] \quad (3.106)$$

$$M_W = 81 [kN.m]$$

Entonces, el momento flector total de quebranto (M_{TH}) y de arrufo (M_{TS}), en condición de navegación, quedará expresado como:

$$M_{TH} = M_{H0} + y_w M_W [kN.m] \quad (3.107)$$

$$M_{TS} = M_{S0} + y_w M_W [kN.m]^{183} \quad (3.108)$$

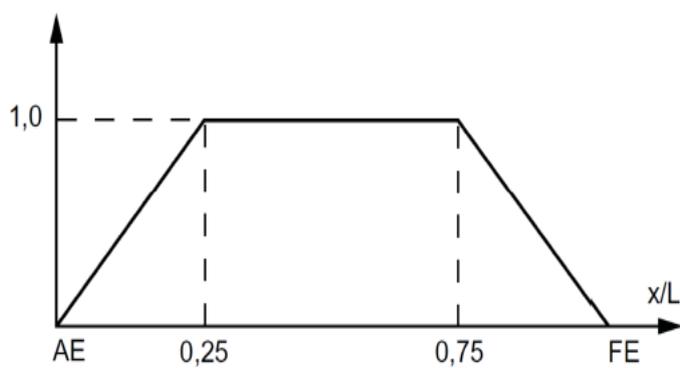
$$M_{TH} = 2207.45 [kN.m]$$

$$M_{TS} = 81 [kN.m]$$

¹⁸³ El valor y_w es 1 para el rango de navegación IN (0,6).

Por tanto, se usará los valores estimados por norma (por ser mayores a los estimados de acuerdo con el balance de pesos y condiciones de carga) para el cálculo de esfuerzos en la sección maestra.

Cuando se utilizan valores estimados de momentos flectores en aguas tranquilas, los momentos flectores verticales totales en cualquier sección transversal del buque-viga deberán ser determinados de acuerdo con la Figura 3.31, donde FMT, es el factor de distribución del momento flector estimado.



Ubicación de la sección transversal del casco	Factor de distribución F_{MT}
$0 \leq x < 0,25 L$	$4,0 \frac{x}{L}$
$0,25 L \leq x \leq 0,75 L$	1,0
$0,75 L < x \leq L$	$4,0 \left(1 - \frac{x}{L}\right)$

Figura 3.31.- Factor de distribución

Fuente: NR217 B Ch. 3, Sec. 2, pág. 84

3.13.8.2. Fuerza Cortante Total

La fuerza cortante vertical total estimada, en kN, deberá obtenerse de la siguiente fórmula:

$$T_s = \frac{\pi M}{L} [kN] \quad (3.109)$$

$$T_s = \frac{\pi 2207.45}{30} = 231.15 \text{ [kN]}$$

Donde:

- M, es el momento flector vertical M_{TH} o M_{TS} , en kN.m, el que sea mayor.

El esfuerzo cortante máximo calculado con este valor es de 22952.2 [kN/m²] <> 22.95 [N/mm²].

3.13.8.3. Esfuerzo de Sección Maestra

Considerando el módulo de sección de la cuaderna maestra¹⁸⁴ y los momentos flectores determinados, se ha realizado el cálculo de los esfuerzos de la sección maestra¹⁸⁵. Los resultados se muestran en la Tabla 3.71.

Tabla 3.71.- Esfuerzos de Sección maestra

ESFUERZOS DE SECCIÓN MAESTRA		
Ítem	Cantidad	Unidad
Momento de Inercia	5.2961	[m ⁴]
Momento Flector Vertical	2207.45	[kN.m]
Fuerza Cortante	231.15	[kN]
Centroide (Y)	1.535	[m]
Área de Cubierta	0.0932	[m ²]
Área Total	15.5271	[m ²]
Esf. Compresión máx.	318.85	[kN/m ²]
Esf. Tracción máx.	639.79	[kN/m ²]

Fuente: Elaboración Propia

¹⁸⁴ Plano Estructural TMC -18-007 – Sección media.

¹⁸⁵ Detalles y propiedades en los anexos. Ver planos de Sección media.

3.14. PESOS Y CENTRO DE GRAVEDAD

Con la ayuda del software Maxsurf, en el módulo *Maxsurf Structure*, se ha podido realizar una estimación de los elementos estructurales y del planchaje del catamarán.

El desplazamiento en liviano o en rosca, está conformado por el peso propio de la embarcación sin considerar el combustible almacenado, las provisiones, agua dulce, pasajeros, entre otros.

Puede subdividirse en el peso del casco y estructuras, peso de la sala máquinas (generalmente conformado por peso de los sistemas principales y auxiliares, que se ubican en este espacio) y sistemas, además del peso de las acomodaciones.

El peso del casco y estructuras está conformado por:

- Peso del planchaje del casco
- Peso de los mamparos
- Peso de los elementos principales y secundarios
- Refuerzos estructuras y elementos de unión
- Peso de la superestructura y puente de mando
- Soldadura
- Otros.

El peso de sala de máquinas abarcará la maquinaria y los equipos de los sistemas principales y auxiliares que se auxiliares permiten la operación del buque y el desarrollo de los servicios, tales como:

- Sistema de Propulsión.
- Sistema Eléctrico.
- Sistema de Refrigeración.
- Sistema de Gobierno y Maniobras.
- Sistemas de Alimentación de Combustible.
- Sistema de Aceite Lubricante.

- Sistema de Aire Comprimido.
- Sistema de Amarre y Fondeo.
- Sistema de Acceso y Aprovisionamiento del buque.
- Sistema de Salvamento.
- Sistema de Prevención, Detección y Extinción de Incendios.
- Sistema de Achique.
- Sistema de Lastre.
- Sistema de Aireación, Rebose Y Sonda.
- Sistema de Agua Dulce y Sanitaria.
- Sistema de Almacenamiento y Tratamiento de Residuos.
- Sistema de Exhaustación.
- Sistemas de Ventilación, Climatización, Refrigeración y Congelación.
- Entre otros.

El mobiliario, los acabados, muebles y demás, constituyen un peso variable¹⁸⁶ en el buque y este debe ser acotado durante el diseño. El peso de las acomodaciones se puede estimar de acuerdo con el porcentaje del casco y estructuras¹⁸⁷ y/o realizar una aproximación de la habilitación de los espacios con una metrado. En general, estos no superan de 1.5 ton.

La Tabla 3.72, nos muestra el resumen de pesos y centro de gravedad estimado para las estructuras, equipos y servicios considerados.¹⁸⁸

¹⁸⁶ Debido a que el mobiliario final depende exclusivamente de la habilitación final en obra.

¹⁸⁷ De acuerdo con los datos de la Empresa EGIAN, el % peso de las acomodaciones no representa más del 5% del peso del casco y estructuras del buque en embarcaciones similares.

¹⁸⁸ Detalles de pesos estimados, ubicación y centro de gravedad, para cada ítem en los anexos.

Tabla 3.72.- Resumen de pesos y centro de gravedad

RESUMEN DE PESOS				
ÍTEM	PESO	X (SM)	Y (KB)	Z
Peso de Casco y Estructuras	25.35	-0.05	1.46	0
Peso de Máquinas y Sistemas	14.96	-1.86	2.4	0
Peso de Acomodaciones - Otros	2.87	-0.68	3.01	0
TOTAL	43.17	-0.718	1.891	0

Fuente: Elaboración Propia