



Aplicación de Sistemas de Propulsión Híbrida en Buques de Pesca

Autor: Carlos Gutierrez

Institución: Energylab

Otros autores: Meana Rodríguez, David (Energylab)

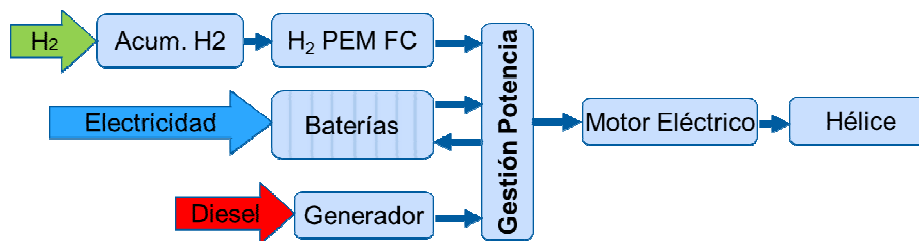
Resumen

En una clara apuesta por la sostenibilidad en el sector de la pesca, la Consellería de Economía e Industria de la Xunta de Galicia y el Centro Tecnológico EnergyLab abordan un proyecto basado en la aplicación de sistemas híbridos para el suministro de energía en un buque pesquero. El objetivo final es la implementación en el sector de sistemas de propulsión más eficientes y ecológicos. El alcance del proyecto consiste en definir una solución técnica para la sustitución del sistema de propulsión diesel en un barco de pesca representativo de la flota gallega de bajura, por un sistema híbrido-eléctrico alimentado por tres tipos diferentes de fuentes de energía.

1 Objetivo

El objetivo principal del proyecto es definir una alternativa para la planta de suministro de energía de los buques de pesca costera, capaz de reducir el ruido, las vibraciones, las emisiones de efecto invernadero y el riesgo medioambiental en caso de accidente, así como la dependencia del precio de los combustibles fósiles. En resumen, diseñar y construir un barco más respetuoso con el medio que mejore las condiciones de operación.

El alcance del proyecto abarca, con tal fin, la sustitución del sistema de propulsión diesel de un buque de pesca estándar, cuya elección se realizó en base a un estudio estadístico de la flota gallega de bajura, por un sistema eléctrico híbrido. Las fuentes de energía primarias serán la electricidad (red eléctrica), el hidrógeno y el diesel.



2 Alcance del Proyecto

1. En primer lugar se realizó un estudio estadístico de la flota gallega para seleccionar un tipo de embarcación objetivo.
2. Una vez determinado el segmento, se caracterizó en barco seleccionado, obteniendo sus dimensiones generales principales y forma del casco. Con dicha información y a través de un modelado CFD se obtienen las curvas de arrastre de la embarcación.
3. Esa información se contrasta con métodos de cálculo clásico del sector y con mediciones recogidas en la ejecución de un protocolo de operación definido con el fin de dimensionar las necesidades reales de energía de la embarcación.
4. Después, el sistema híbrido-eléctrico de suministro de potencia se define en detalle, tratando de alcanzar un compromiso entre la potencia y la autonomía.
5. Siguiendo es proporcionar al barco con un sistema de adquisición de datos, regulación y control que gestiona la información necesaria para hacer funcionar el sistema de suministro de energía de la manera más segura y eficiente.
6. La distribución del equipamiento a bordo se realiza mediante un proceso iterativo en el que se debe alcanzar la solución más equilibrada posible, cumpliendo con los cálculos de estabilidad requeridos por la autoridad del sector.

7. La última fase que se acomete es la de construcción y regularización de la embarcación.

3 Selección de la embarcación objeto

Para determinar el segmento de las embarcaciones en el que la medida podría tener mayor impacto, con la consecuencia adicional de diluir la necesidad de inversión de una tecnología que la por el momento sigue siendo costosa, se realizó un estudio estadístico detallado de la flota gallega de pesca.

DISTRIBUCIÓN POR ACTIVIDAD/LISTA

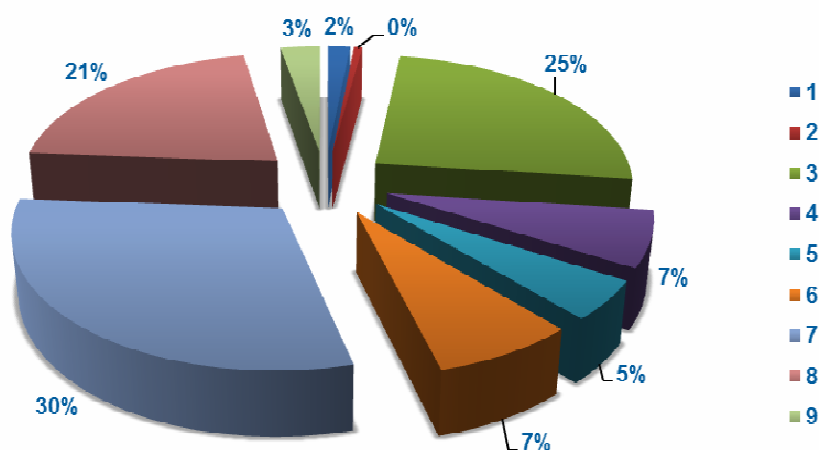


Ilustración 1. Distribución de flota gallega según lista de actividad

La conclusión obtenida de tal estudio fue que la gran mayoría de las matriculas recogidas en el registro de embarcaciones de pesca de la comunidad de Galicia, fundamentalmente de la lista 3ª y algunos casos de la 4ª, se concentran en un rango bastante definido.

Con este enfoque se obtuvo que más de 4.300 buques de pesca, sólo en la región de Galicia, se registran en el segmento de longitud de eslora inferior a 18 m. Esto supone casi el 90% de toda la flota registrada, por lo que se seleccionó tal segmento como el objeto del proyecto.

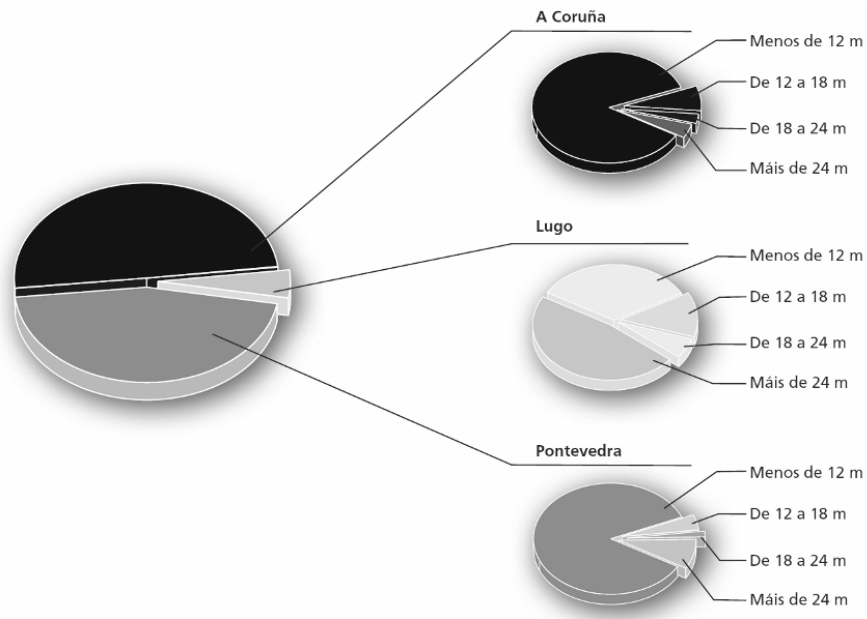


Ilustración 2. Distribución por eslora y provincia

Adicionalmente se acotó la muestra con el límite de potencia de propulsión. En base al mismo criterio expuesto anteriormente se obtuvo que más del 85% del total de la flota pesquera gallega declara potencias inferiores a 100kW.

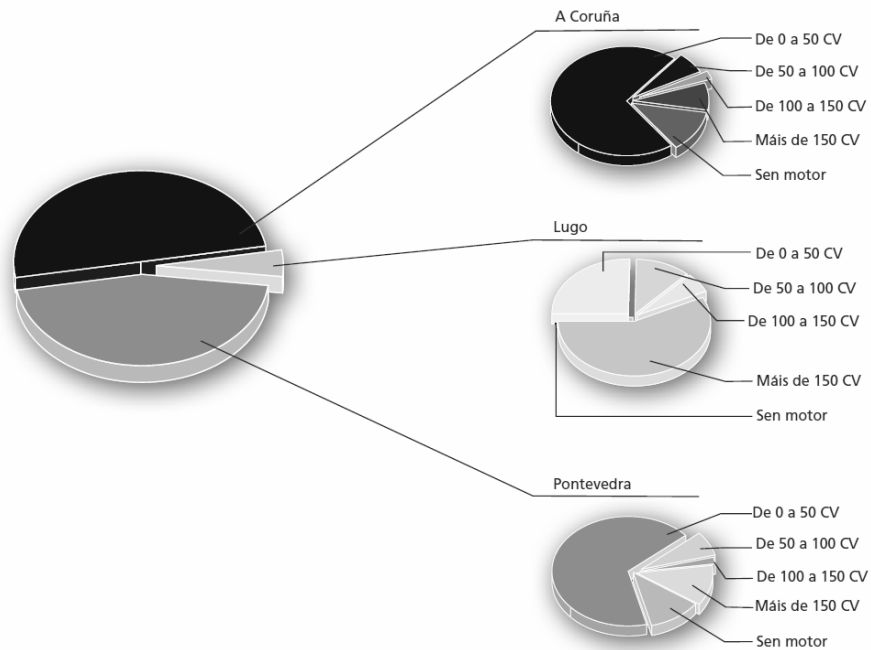


Ilustración 3. Distribución por potencia y provincia

Así pues el segmento definido para el proyecto es el de barcos de pesca de bajura (faena diaria) de eslora inferior a 18 metros y potencia menor de 100kW.

El Servicio de Guardacostas de Galicia cedió para la ejecución del proyecto un barco existente. Se trata de un antiguo pesquero reformado para labores propias del servicio.

Las principales características del barco son:

Tabla 1. Características Principales

Dimensión	Uds
Eslora	11,2 m.
Manga	4,1 m.
Puntal	1,8 m.
Calado	1,25 m.
Arqueo	19,5 GT.
Potencia Motor/Max. Speed	176kW / 9 knots.

4 Realización del Proyecto

4.1 Formas, dimensiones y estabilidades

Desafortunadamente, el barco no presentaba toda la documentación técnica disponible, más allá de la hoja de asiento de registro ordinario, por lo que la primera tarea varar la embarcación a fin de extraer de manera precisa las dimensiones y la forma del casco, así como la distribución de los diferentes compartimientos y todo el equipo presente en el interior del barco. Se aprovechó la ocasión para limpiar la obra viva (superficie exterior del casco en contacto permanente con el agua).

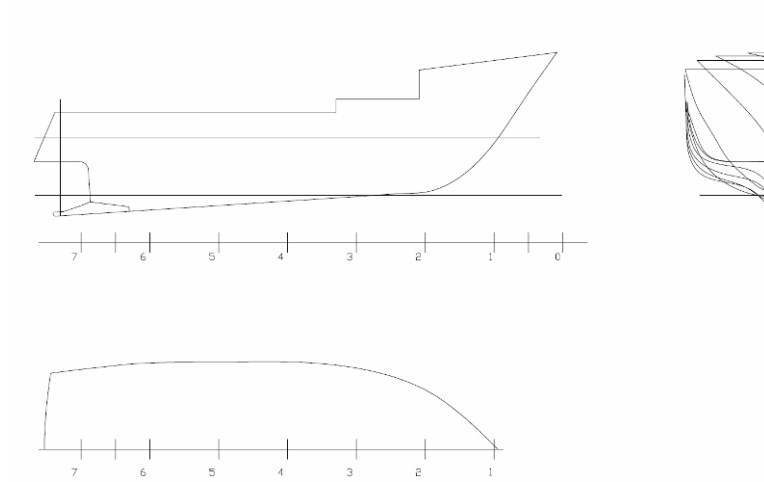


Ilustración 4. Forma del casco

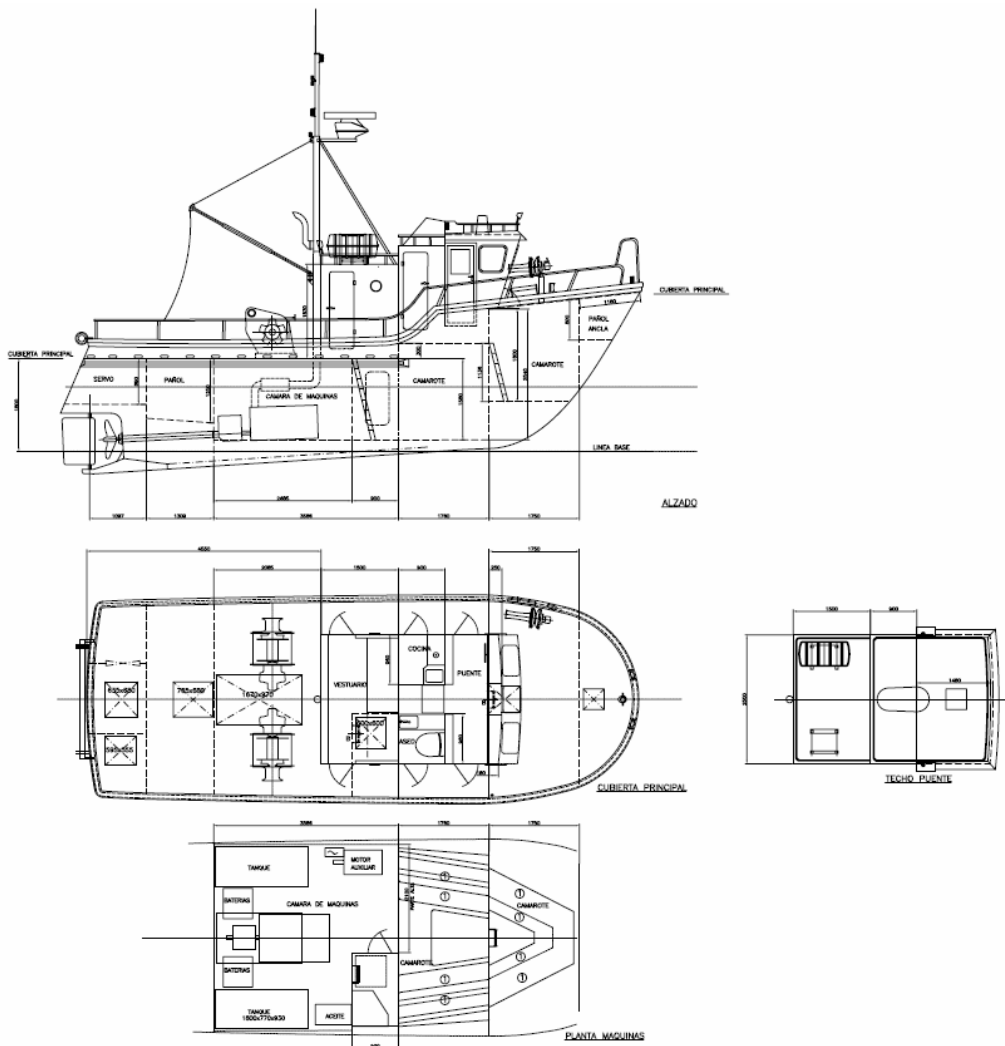


Ilustración 5. Plano General

En esta etapa, y con el fin de permitir comparar el antes y el después de la reforma, se lleva a cabo el cálculo de la estabilidad y francobordo siguiendo el contenido de la opción 6 de la norma ISO12217-1, para barcos de más de 6 metros, en la clase C de diseño. Los resultados obtenidos se encontraban, como se esperaba, dentro del intervalo requerido por la legislación vigente.

4.2 Cálculo de Potencia

Con el fin de obtener la resistencia al avance de la embarcación se construyó un modelo 3D del casco y se sometió a una simulación de navegación mediante un programa CFD (Computational Fluid Dynamics), De esta forma se obtuvo el valor de la magnitud para un punto concreto del mapa de operación de la nave.

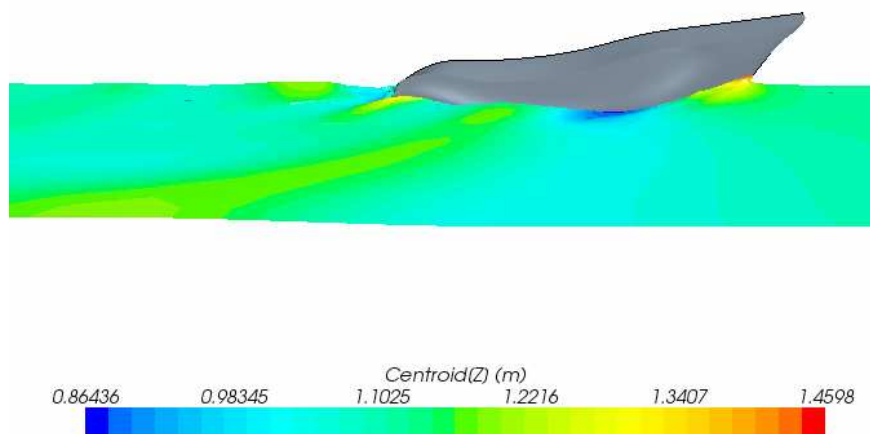
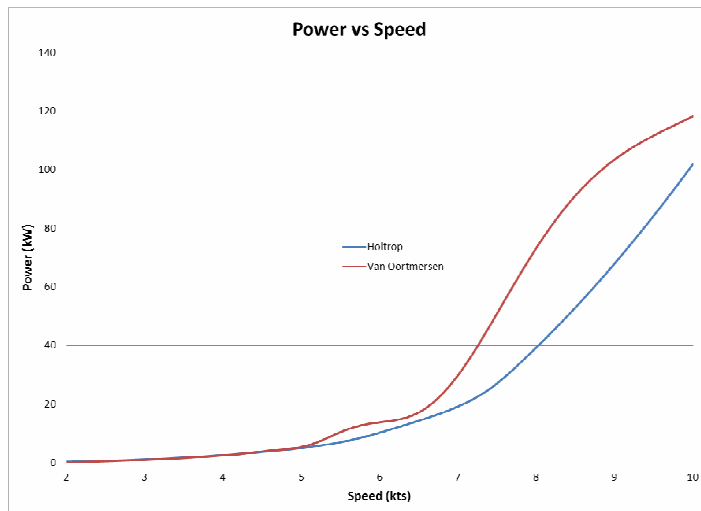


Ilustración 6. Simulación CFD

El resultado obtenido de la simulación se contrastó y extendió al rango total de velocidades a las que el barco está preparado para operar mediante métodos de cálculo clásicos empleados en el sector con un histórico de fiabilidad más que demostrado (Holtrop, Van Oortmerssen, Digernes y Yi, Walderaugh). Se despreciaron los valores extremos. Adicionalmente, y como medida empírica, se realizó un conjunto de ensayos de operación real en los que, para diferentes velocidades de navegación, se registraban el consumo de combustible y el régimen de giro del motor de combustión. Dado que este tipo de embarcaciones no dispone de caja de velocidades, es decir, que la relación de reducción es constante, los parámetros registrados junto con el rendimiento del motor son suficientes para realizar una primera aproximación burda que ratifique el orden de magnitud de los cálculos teóricos previamente comentados. Además estos registros permitirán, una vez transformado el barco, establecer la comparativa de ambos sistemas de propulsión, el convencional y el eléctrico.

Se emplea con tal fin la ecuación del balance de energía del conjunto, según una variante de la expresión de conservación de la energía en la que la potencia útil obtenida, y por tanto propulsiva, debe ser igual a la energía introducida por unidad de tiempo por el ratio de aprovechamiento. Este ratio se representa por los coeficientes de rendimiento del propio motor y de la cadena cinemática de propulsión.



$$PP_D]_{t_0}^{t_1} = PCI \cdot \eta_{Eng} \cdot \eta_{PT} \cdot \int_{t_0}^{t_1} \frac{\partial M}{\partial t}$$

- PCI: inferior calorific power of the fuel
- η_{Eng} : engine coefficient of performance
- η_{PT} : powertrain coefficient of performance
- $\partial M/\partial t$: de diesel mass flow

Ilustración 7. Cálculo de Potencia

De las 3 variantes de cálculo aplicadas se obtienen valores para la resistencia al avance que pueden calificarse de coherentes y se reflejan en el grafico previo. Así pues para una velocidad de navegación de 9 nudos, la máxima reflejada en la hoja de asiento del barco, se corresponde una demanda de potencia de 103kW. En fases posteriores de la definición se valoró la componente eficiente de este régimen de operación.

A este valor se sumó una estimación de potencia consumida por elementos auxiliares como la iluminación, la asistencia a la navegación, sistemas de bombeo, etc. cuantificados en 6 kW adicionales, alcanzando un total de 109 kW de potencia eléctrica necesaria.

4.3 Requerimientos de Servicio

El servicio real realizado por el barco se determinó preguntando directamente al operador, mirando la historia de los últimos servicios realizados (se había registrado poca información e incompleta) y mediante una inspección visual de la maquinaria a bordo.

De esa información se obtuvieron algunas consideraciones respecto a la operación:

- Determinación de la duración promedio de un servicio común y la distribución por modo de navegación.

- La navegación a velocidad máxima no es determinante para el cumplimiento del servicio.
- Algunas máquinas nunca se han utilizado en el ejercicio del servicio como buque guardacostas.

En base a eso, la velocidad máxima se limitó a 8 nudos y la duración máxima de un servicio, sin repostaje intermedio, se estableció en 8 horas. El patrón de operación de un servicio común se caracterizó en función de los requisitos de navegación, y por lo tanto de demanda energética. De tal modo se obtuvieron 4 franjas de operación divididas del siguiente modo:

- 2 horas de maniobras portuarias (<6 nudos).
- 2 horas de travesía a velocidad media (<7 nudos).
- 2 horas de travesía a velocidad máxima (= 8 nudos).
- 2 horas de maniobras de tareas (<6 nudos).

Al aplicar las diferentes velocidades del patrón de servicio sobre las curvas de demanda de potencia, y sumando el consumo de energía auxiliares con un factor de solapamiento temporal de 0,5, se obtuvo el patrón estimado de demanda de potencia.

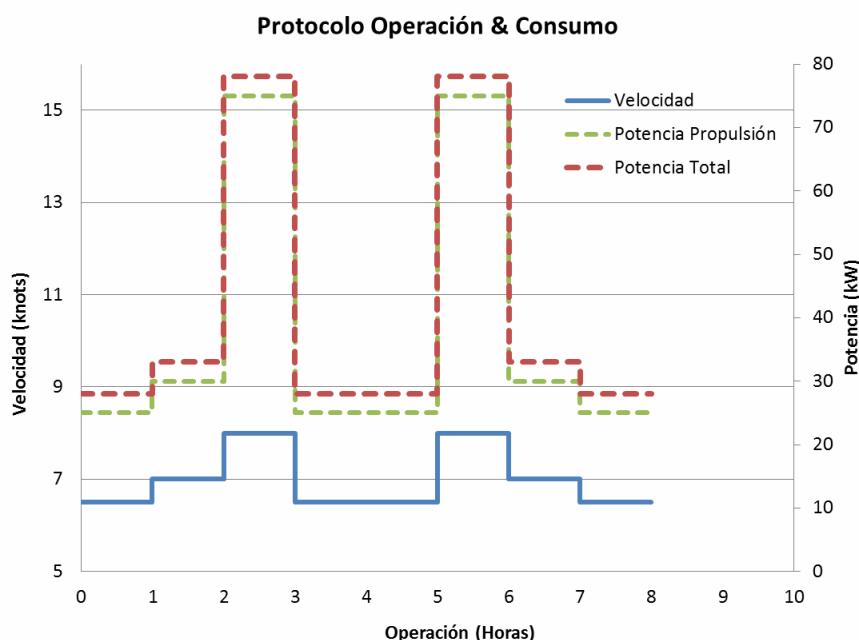


Ilustración 8. Patrón de demanda de potencia

5 Diseño de la planta de propulsión

5.1 Planteamiento

Normalmente la rehabilitación es más compleja que las construcciones nuevas, ya que el escenario ya está dibujado y la tarea consiste en instalar un nuevo concepto en el lugar de uno existente, manteniendo algunos otros intactos. En este caso hay tres temas principales que determinan la viabilidad de la sustitución y la tecnología a instalar:

- Servicio real definido.
- Limitaciones debidas al espacio libre a bordo.
- Coincidencia, tanto como sea posible, del peso a eliminar y a añadir tanto en valor como en distribución.

Estos temas se analizan y se balancean, tanto como sea posible, con el fin de averiguar:

- La tecnología adecuada a instalar, lo que proporcionará las características de potencia demandada por el barco.
- Contribución de cada fuente de energía al suministro de potencia.
- El equilibrio entre la energía almacenada a bordo y su relación de consumo, determinando así la autonomía de la embarcación.

Los criterios que sustentan este planteamiento y la definición de toda la planta, especialmente para la selección de los equipos, se basa principalmente en lo que de ahora en adelante se denominarán los tres factores principales:

- La más alta eficiencia.
- Dimensiones y peso.
- Costes.

5.2 Definición de la solución

El proyecto de ingeniería propuesto de aquí en adelante supone la solución dada a las necesidades descritas, en el marco conformado por una reforma y cumpliendo con los criterios establecidos.

El primer punto de definición fue determinar el concepto de integración de las diferentes fuentes de energía y la naturaleza eléctrica de la misma así como de la carga. Se barajaron las siguientes variantes:

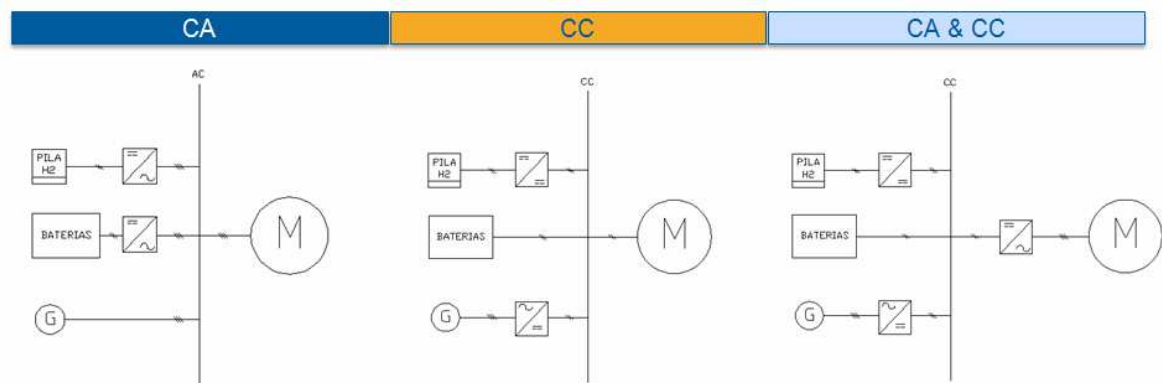


Ilustración 9. Variantes de integración

5.2.1 Motor Eléctrico

En primer lugar, utilizando el valor obtenido para el requerimiento de potencia de propulsión (103 kW) como entrada, se seleccionó el motor eléctrico. Los mencionados tres factores principales encuentran el compromiso en un motor trifásico de jaula de ardilla de 132 kW 3ph.AC, clase Premium Efficiency IE3 según la norma IEC60034-30.

La selección de un motor de corriente alterna exige la adición de un variador de frecuencia que permita variar el régimen de giro y por lo tanto la velocidad de avance de la embarcación.

Este concepto elimina la segunda de las opciones mostradas en el gráfico anterior.

5.2.2 Contribución de las fuentes de energía

Para alimentar dicho motor se definió en detalle un sistema de suministro de potencia híbrido-eléctrico, buscando el compromiso entre las características de la demanda de potencia, el almacenamiento de energía y la autonomía operativa de la embarcación.

Como ya se ha dicho, las fuentes de energía primaria son la electricidad de red (batería), hidrógeno (botellas presurizadas) y diesel (como sistema auxiliar). El ratio de contribución de cada fuente se determina teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- I. La tecnología del hidrógeno se encuentra todavía en la fase de demostración, por lo que es todavía muy costosa y su fiabilidad aún tiene que ser probada [2].
- II. Las baterías de litio tampoco han sido probadas en grandes potencias, pero es la única de las variantes de la escena de alta tecnología desarrollada lo suficiente que encaja con la limitación de espacio y peso a bordo.
- III. El grupo generador diesel garantiza la alimentación del motor de propulsión en caso de fallo de las nuevas tecnologías.

Por lo tanto, y una vez más, acorde con los principales factores mencionados antes, la alimentación se divide de la siguiente manera:

- I. Célula de combustible de hidrógeno de hasta 16kW: Esta es la tecnología más experimental desplegada en el proyecto. La potencia instalada encuentra el equilibrio entre los productos disponibles comercialmente, el coste (operación y tecnología) y el porcentaje de la potencia total necesario para obtener datos representativos.
- II. Batería recargable de litio de hasta 100 kW: Se trata de la principal fuente de energía y tiene que ser capaz de cubrir la demanda total de energía por sí misma. Así que, como la velocidad máxima ha sido limitada hasta 8 nudos, la demanda de energía total no excederá nunca los 80 kW teóricos. Aplicando un coeficiente de seguridad de 1,25 se obtiene que el sistema debe ser capaz de entregar 100 kW.
- III. Generador Diesel de 35kVA: Potencia suficiente para mover por si mismo el barco a un lugar seguro en condiciones aceptables (\approx 6 nudos).

La cantidad de energía a almacenar a bordo se calcula mediante una herramienta hecha con el fin de definir, por un proceso iterativo, la capacidad las células de la batería [3] y los kilogramos de H₂ necesarios para cumplir con el requisito del patrón de consumo de energía. En esta herramienta de cálculo se aplican coeficientes de rendimiento, como el coeficiente de Peukert y el ratio nominal de descarga para obtener el valor real de las necesidades energéticas partiendo del consumo de energía. Esta herramienta encuentra la convergencia en los parámetros finales de diseño.

		Velocidad	Tiempo (horas)	Pot. Bat. (kW)	Pot. Pila (kW)	Pot Total (kW)	Peuk_Coef
Fase 1	75 kW	8 nudos	2	59	16,0	75	1,05
Fase 2	30 kW	7 nudos	2	14	16,0	30	
Fase 3	25 kW	6 nudos	4	9	16,0	25	
Fase Aux	35 kW	7 nudos	5				

Litio Ión (LiFePo4)										
Baterías Li	Max, Descarga	Capacidad Inicial (Ah)	Potencia Fase 1 (kW)	Tiempo Fase 1 (horas)	Capacidad Restante (Ah)	Potencia Fase 2 (kW)	Tiempo Fase 2 (horas)	Capacidad Restante (Ah)	Potencia Fase 3 (kW)	Tiempo Fase 3 (horas)
700 Ah	80,0%	560	59	2	160	14,0	2	72	9,0	4

Pila Combustible											
Pila Combustible	Potencia Fase 1 (kW)	Tiempo Fase 1 (horas)	H2 Consumido (kg)	Potencia Fase 2 (kW)	Tiempo Fase 2 (horas)	H2 Consumido (kg)	Potencia Fase 3 (kW)	Tiempo Fase 3 (horas)	H2 Consumido (kg)	H2 Final Utilizado (kg)	Nº Botellas (50L)
HYD16kW	16,0	2	2,55	16,0	2	2,55	16,0	4	5,09	10,19	14

Ilustración 10. Parámetros de diseño del almacenamiento energético

5.2.3 Contribución de las fuentes de energía

Cada fuente de energía tiene sus propias características de entrega de potencia eléctrica, por lo que es necesario homogeneizarlas de forma que en un punto en común puedan ser combinadas y administradas. Para ello, son necesarias varias transformaciones de corriente y tensión. El objetivo consiste en reducir el número de tales transformaciones, de forma que se minimicen los modos potenciales de fallo y se optimice la eficiencia energética. Así pues, una gestión de la energía eléctrica en el nivel de voltaje de la demanda y en modo corriente continua se erige como mejor opción, ya que, efectivamente, minimiza el número de transformaciones y evita los problemas de sincronismo cuando la energía eléctrica se combina en modo corriente alterna.

Dichas transformaciones se llevan a cabo por el denominado sistema de distribución de potencia, que homogeniza las diferentes alimentaciones en el mencionado punto común, donde se combinan y administran. Incluye además los elementos y mecanismos de seguridad y protección eléctrica necesarios.

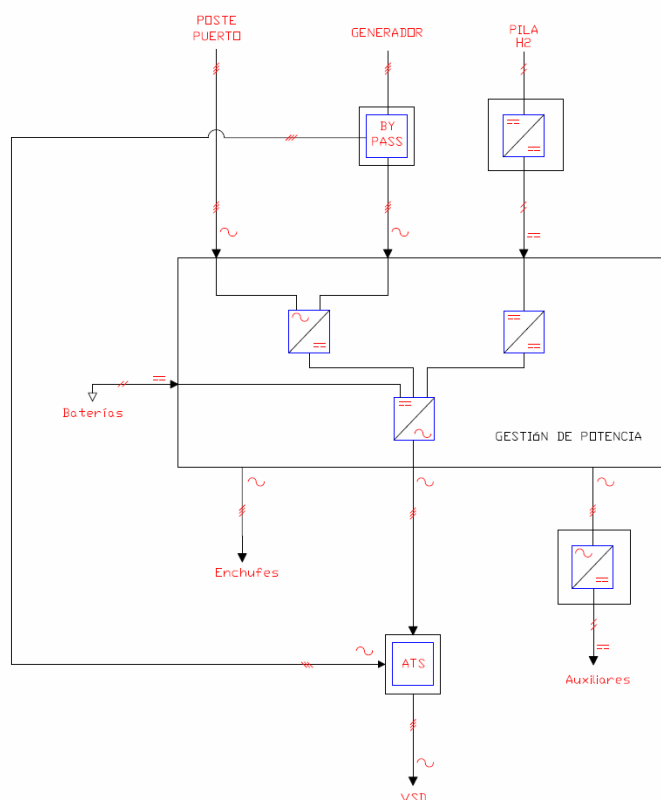


Ilustración 11. Sistema de Gestión de Potencia

Por otro lado, y una vez que la combinación de potencia está definida, la gestión de funcionamiento de las tres fuentes de energía se define atendiendo a las especificaciones técnicas y de seguridad de las diferentes tecnologías, la fiabilidad y los costes operativos.

El modo de trabajo resultante se documenta con un diagrama de bloques programado en el controlador del sistema de distribución de potencia.

GESTIÓN DE LAS FUENTES DE POTENCIA

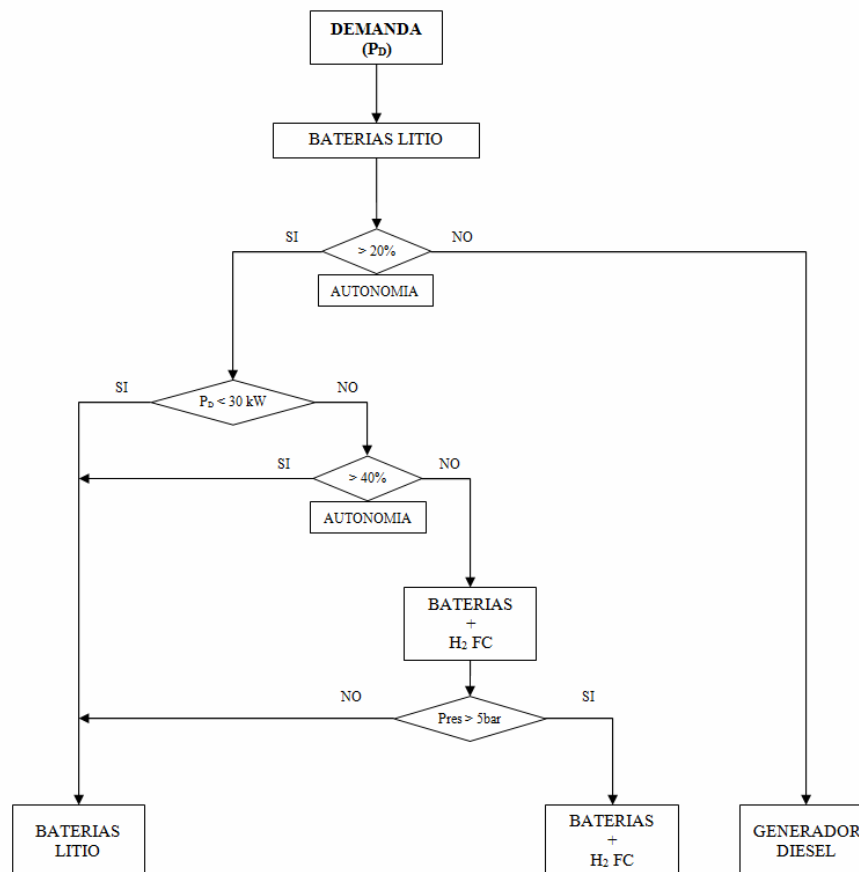


Ilustración 12. Diagrama de gestión de las fuentes de potencia

Una función adicional a realizar por el sistema es la vigilancia, monitorización y adquisición de datos de todo el sistema, incluyendo las siguientes funciones:

- Leer el valor de los principales parámetros de operación y contrastarlos con los patrones establecidos.
- Registrar continuamente dichos valores en ficheros de datos.
- Interpretar los datos recogidos en tiempo real con el fin de emitir las ordenes precisas para garantizar el modo de operación definido en el diagrama de gestión de las fuentes de potencia y proteger al sistema y a la tripulación frente a sobrecargas o funcionamientos inseguros y/o anormales.

El principal problema de tomar datos en tiempo real es la integración de los diferentes protocolos de comunicación que maneja cada subsistema. Para resolver este tema, el sistema de vigilancia y monitorización se compone de:

- PLC: con tarjetas adicionales I/O y modulo de comunicaciones Profinet. su función es integrar las señales analógicas recogidas de los parámetros de operación, la comunicación con el variador de frecuencia y la pantalla de control del puente.
- PC: Un computador industrial es necesario para integrar y normalizar los datos recogidos de todo el sistema.
- Pasarelas de comunicación: Su función es traducir todos los protocolos de comunicaciones a uno único que será el que comande la actividad.

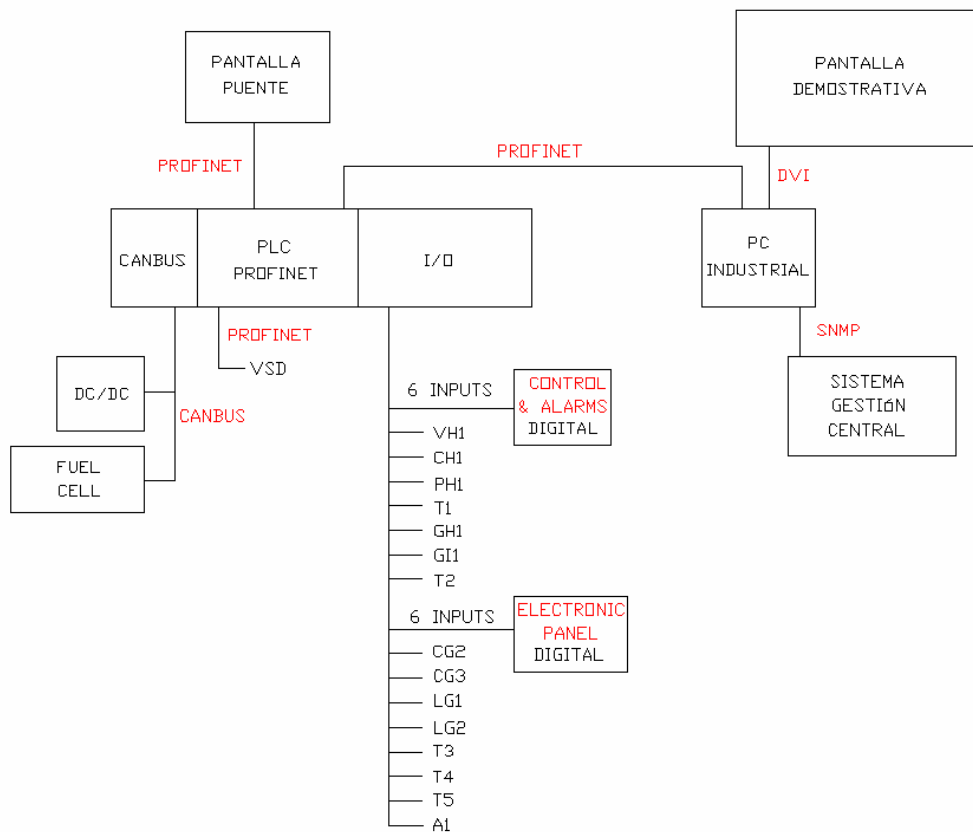


Ilustración 13. Subsistema de vigilancia y monitorización

El conjunto formado por ambos subsistemas constituye el sistema de gestión de la planta de propulsión.

5.2.4 Sistema de hidrógeno

- Método de Alimentación: El hidrógeno es almacenado en tres bastidores reemplazables de botellas de alta presión instalados sobre la cubierta principal, y se suministra a la célula de combustible a través de un circuito en el que la presión y el caudal son adaptados a las condiciones de alimentación requeridas por las pilas de combustible.
- Pilas de combustible de hidrógeno: Se emplea una unidad basada en la tecnología de membrana de intercambio de protones (PEM). Entrega de corriente continua (DC) a un nivel de tensión muy bajo y a una potencia máxima de hasta 16 kW.
- Ajuste eléctrico: es necesario un elevador de voltaje (DC-DC) hasta la cota de gestión de potencia [4].

5.2.5 Baterías de litio Sistema

- Método de alimentación: la batería de litio se alimenta directamente de un poste de recarga que se encuentra en el muelle del puerto, conectado a la red eléctrica y a través de una manguera y un enchufe eléctrico estándar.
- Batería de litio: Se construye conectando en serie tantas células individuales de 3.2VDC y 700Ah como sea necesario para cubrir la máxima potencia demandada. Eso significa alcanzar el nivel de voltaje de la demanda en modo de corriente continua (DC).
- Ajuste eléctrico: No es necesaria transformación en el modo de descarga, pero el modo de carga en el puerto requiere de una conversión AC-DC.

5.2.6 Generador Diesel

- Método de alimentación: El combustible diesel se almacena en un depósito estándar, cerca del motor, en la sala de máquinas, debajo de la cubierta principal.
- Sistema de generador: Tiene que ser capaz de alimentar directamente el motor de propulsión, por lo que está configurado para suministrar el nivel de voltaje de demanda en alimentación trifásica y hasta 35kVA.
- Ajuste Eléctrico: No es necesaria transformación.

Todos estos sistemas y sus transformaciones energéticas unidos entre sí y a la alimentación de la unidad de motor de propulsión dibujan el diagrama eléctrico general de la planta de potencia.

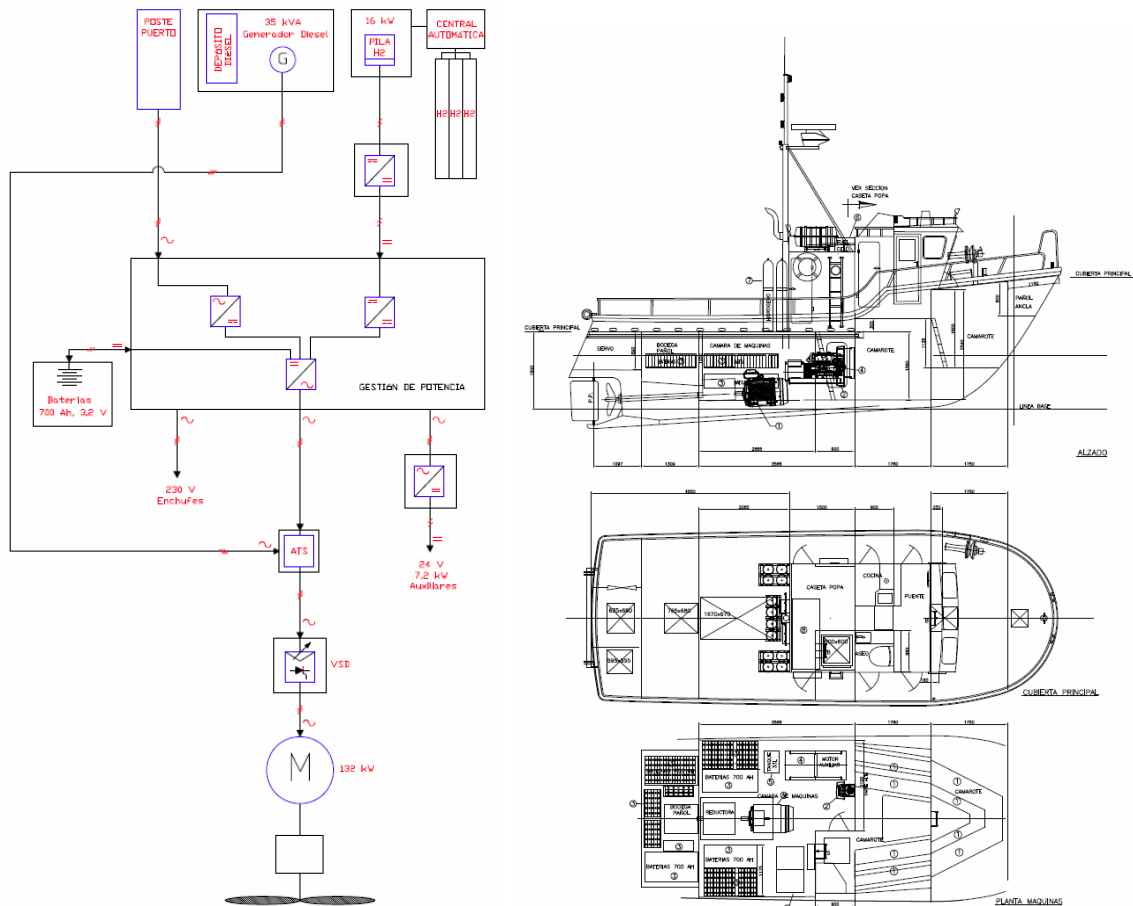


Ilustración 14. Diagrama eléctrico general y plano de reforma

5.3 Distribution of Components on board

La última etapa del proyecto de ingeniería es diseñar y elegir los componentes individuales de cada sistema, con el objetivo principal de ubicarlos en el interior del barco tratando de ocupar los lugares del material eliminado en la medida de lo posible. Esta filosofía tiene como objetivo modificar la distribución del peso original del buque en la menor medida posible, intentando no penalizar mucho los cálculos de estabilidad originales.

Por supuesto, se realiza en paralelo un proceso iterativo, donde el diseño y la distribución de los componentes y la estabilidad tienen que converger en el cumplimiento de todos los

requisitos tanto funcionales como normativos. La disposición final se muestra en la figura anterior.

Referencias

1. C. Gabín, V. Rodríguez, M. Blanco, L. Rodríguez, F. Taibó and Ch. García, *“Registro de buques pesqueros da Comunidade Autonoma de Galicia 2009”* Xunta de Galicia, Consellería do Mar, ISBN: 978-84-453-4886-4, D.L. 406-2010.
2. Gijsbert de Jong and Philippe Corrigan, *“Guidelines for the safe application of fuel cell systems on ships”*, Bureau Veritas, Annual Marine Propulsion Conference, London, March 2009.
3. Suleiman Abu-Sharkh and Dennis Doerffel, *“Rapid test and non-linear model characterization of solid-state lithium-ion batteries”*, Journal of Power Sources 130, 2004.
4. D. Vinnikov, T. Jalakas and I. Roasto, *“A New High-Power DC/DC Converter for Residential Fuel Cell Power Systems”*, Department of Electrical Drives and Power Electronics, Tallinn University of Technology, 2009.