



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Evaluación de alternativas de propulsión descarbonizada
para embarcaciones. Aplicación a una lancha de prácticos
en el Puerto de Valencia

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: Chiralt Taberner, Rafael

Tutor/a: Novella Rosa, Ricardo

Cotutor/a: Tinaut Fluixá, Francisco Vicente

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Evaluación de alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones. Aplicación a una lancha de prácticos en el Puerto de Valencia

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Mecánica

REALIZADO POR

Rafael Chiralt Taberner

TUTORIZADO POR

Francisco Vicente Tinaut Fluixá

Ricardo Novella Rosa

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

RESUMEN

Ante el aumento del cambio climático, generado principalmente por la quema de combustibles fósiles, es de vital importancia la investigación sobre sistemas de propulsión que sean “cero emisiones” o reduzcan las emisiones generadas por los combustibles fósiles. Es por ello por lo que en este trabajo se han planteado distintas alternativas para la propulsión de una embarcación marina, con diferentes sistemas de propulsión y diferentes combustibles. Entre estas alternativas se ha considerado un motor de combustión alimentado con combustible diésel (referencia), con biodiésel (HVO) y e-fuel, una pila de combustible alimentada con hidrógeno (tres orígenes de producción), y un motor eléctrico con almacenamiento en baterías (dos orígenes de producción). Para considerar condiciones realistas de operación, se han analizado los datos de posición reales de una embarcación de prácticos del puerto de Valencia, obteniéndose distintos perfiles de velocidad, aceleraciones y recorridos típicos realizados por la misma. Se han obtenido los resultados relevantes de cada alternativa, que se han comparado en términos de energía consumida en el almacenamiento para la propulsión, energía primaria consumida, emisiones de CO₂ directas y en la producción de los combustibles/electricidad, las masas y volúmenes de almacenamiento de cada opción de propulsión, así como el coste total de propiedad. Se ha hecho uso de los conceptos Tank-To-Wake, Well-To-Tank, y Cradle-To-Grave para obtener dichos resultados.

Palabras clave: embarcaciones, combustibles alternativos, descarbonización, hidrógeno, motores de combustión interna alternativo, pilas de combustible, baterías, reducción de CO₂

ABSTRACT

Given the increase in climate change, generated mainly by the burning of fossil fuels, research into propulsion systems that are "zero emissions" or reduce the emissions generated by fossil fuels is of vital importance. This is why in this work different alternatives for the propulsion of a marine vessel have been considered, with different propulsion systems and different fuels. Among these alternatives, a combustion engine fueled with diesel fuel (reference), with biodiesel (HVO) and e-fuel, a fuel cell fed with hydrogen (three production sources), and an electric motor with battery storage (two production sources) have been considered. In order to consider realistic operating conditions, the real position data of a pilot boat in the port of Valencia have been analysed, obtaining different profiles of speed, accelerations and typical routes made by the boat. The relevant results for each alternative were obtained and compared in terms of energy consumed in storage for propulsion, primary energy consumed, direct CO₂ emissions and in the production of fuel/electricity, the masses and storage volumes of each propulsion option, as well as the total cost of ownership. The Tank-To-Wake, Well-To-Tank, and Cradle-To-Grave concepts have been used to obtain these results.

Keywords: boats, alternative fuels, decarbonization, hydrogen, internal combustion engines, fuel cells, CO₂ reduction

ÍNDICE

RESUMEN	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE	IV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Objetivos del trabajo	1
1.3. Alcance del trabajo	2
1.4. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.	2
2. ALTERNATIVAS PARA LOS SISTEMAS DE PROPULSIÓN DE EMBARCACIONES.....	4
2.1. Posibles combinaciones de motores-combustibles y de almacenamiento de energía a bordo. 4	
2.2. Consumos de energía y emisiones de CO ₂ asociadas a las transformaciones energéticas de los combustibles.	10
3. EMBARCACIONES DE PRÁCTICOS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RECORRIDOS EN EL PUERTO DE VALENCIA.....	13
3.1. Aspectos generales del servicio de prácticos.....	13
3.2. Características generales de las embarcaciones de prácticos en el puerto de Valencia.	13
3.3. Identificación de recorridos típicos en las condiciones de servicio.	14
3.3.1. Resultados de la web Marine Traffic.....	14
3.3.2. Resultados correspondientes al seguimiento en tiempo real de las embarcaciones.....	20
3.4. Tratamiento de los archivos de datos de posición (definidos por latitud y longitud, con tiempos asociados).....	22
3.5. Métodos para el cálculo de la distancia recorrida en cada intervalo de tiempo.....	26
3.5.1. Cálculo de la distancia recorrida por la expresión del teorema del coseno en geometría esférica. 26	
3.5.2. Cálculo de la distancia recorrida por la expresión del semisenno.	27
3.5.3. Cálculo de la distancia recorrida suponiendo geometría plana.....	27
3.5.4. Resultados de los recorridos medios diarios.....	28
3.6. Métodos para el cálculo de las velocidades.....	29
3.7. Métodos para el cálculo de las aceleraciones.....	32
3.8. Resumen de los métodos de cálculo de la distancia recorrida, la velocidad y la aceleración de la embarcación.....	35
3.9. Características cuantitativas típicas de un servicio de pilotaje.....	36
4. VARIABLES NECESARIAS PARA LA EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE PROPULSIÓN PARA LAS LANCHAS DE PRÁCTICOS.	38
4.1. Estimación de la potencia para impulsar la embarcación.....	38
4.2. Consumos de energía y emisiones de CO ₂ W-T-T.	41
4.3. Potencias y energías específicas de los sistemas de propulsión.....	43
4.4. Masas y volúmenes específicos de los sistemas de almacenamiento	43

4.5. Emisiones de CO ₂ para los componentes y la embarcación	44
4.6. Costes específicos de los elementos de los sistemas de propulsión	44
5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS ALTERNATIVAS DE PROPULSIÓN.	46
5.1. Energías consumidas por unidad de longitud en cada alternativa de propulsión.	46
5.2. Emisiones de CO ₂ de cada alternativa.	49
5.3. Masas y volúmenes de cada alternativa de propulsión y almacenamiento	53
5.4. Costes de las distintas alternativas.	55
6. CONCLUSIONES SOBRE LAS ALTERNATIVAS DE PROPULSIÓN PARA LANCHAS DE PRÁCTICOS.	58
6.1. Conclusiones.....	58
6.2. Sugerencias para desarrollos futuros.....	61
REFERENCIAS.	62
PRESUPUESTO	63

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El aumento del cambio climático debido a la emisión de gases contaminantes y de efecto invernadero a la atmosfera se ha convertido en un problema a nivel mundial para los distintos países de la unión europea y del mundo. Además, gran parte de culpa la tiene la quema de combustibles fósiles principalmente en sectores como el transporte, ya sea de personas o de mercancías, y la generación de energía eléctrica.

Históricamente en el sector marítimo no se ha avanzado mucho en la búsqueda de alternativas para sustituir los combustibles fósiles por combustibles que sean más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, ya que ello es debido a las demandas del sector, las cuales son en su mayoría la necesidad de tener una autonomía suficiente para cubrir grandes distancias y la imposibilidad de estar conectado a la red eléctrica. Esto ha conllevado a que el motor más utilizado en este sector sea el motor de combustión interna alternativo MCI tanto para la propulsión del buque como para la generación de energía mediante grupos electrógenos, y por tanto el gasoil como combustible en la gran mayoría de los casos.

La combustión en este tipo de motores y combustibles emite gases de efecto invernadero como se ha mencionado anteriormente como el CO₂ y tóxicos como el monóxido de carbono CO el cual se produce cuando la combustión se realiza de forma incompleta y es tóxico y perjudicial para las personas. El primero es de origen antropogénico y se produce de forma natural en la naturaleza, pero su abundancia en la atmosfera está produciendo problemas de efecto invernadero como el aumento de la temperatura global del planeta y el deshielo de las masas glaciares entre otros.

Por otro lado, la IMO (International Maritime Organization) ha establecido los siguientes objetivos los cuales se revisarán al final del 2023:

- Reducir en al menos un 50% las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte marítimo internacional en 2050, comparado con los niveles de 2008; y trabajar para eliminar por completo las emisiones de GEI del transporte marítimo lo antes posible en este siglo.
- Reducir la intensidad del carbono del transporte marítimo internacional, es decir, reducir las emisiones de CO₂ por trabajo de transporte, como promedio para todo el transporte marítimo internacional, en al menos un 50 % de aquí a 2030 comparado con los niveles de 2008, y proseguir los esfuerzos hacia el 70 % de aquí a 2050 comparado con los niveles de 2008).

Por otro lado, el Puerto de Valencia ha adoptado también una estrategia de descarbonización de todos los sistemas y vehículos terrestres y marítimos que operen en el puerto para 2030, lo que incluye las embarcaciones de servicio, lanchas de prácticos, movimiento de personal de amarre y barcos turísticos.

Es por todo ello por lo que el sector del transporte está obligado a buscar alternativas como combustibles como el hidrógeno, el gas natural y el biodiesel entre otros y la producción de dichos combustibles de forma que se produzcan de forma sostenible

1.2. Objetivos del trabajo

El **objetivo general** del trabajo es evaluar distintas alternativas para la propulsión descarbonizada para embarcaciones de servicio en puerto, considerando diversas posibilidades de las combinaciones sistema de propulsión/combustible, como son el gasóleo, biodiésel (HVO), e-fuel (gasóleo sintético), hidrógeno en pila de combustible, y almacenamiento en baterías eléctricas.

Este objetivo general de evaluación de distintas alternativas de propulsión se puede desglosar en varios **objetivos específicos** como los siguientes:

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

- Planteamiento de las posibles alternativas de propulsión para centrarse en las de implantación más factible en embarcaciones de servicio.
- Identificación de recorridos representativos y de las velocidades y aceleraciones típicas en dichos recorridos.
- Estimación de masas y volúmenes de los sistemas de propulsión y del almacenamiento de combustibles/electricidad.
- Cálculo de los consumos de combustibles y/o electricidad, los consumos de energía asociados (Tank-to-Propeller, Well-to-Tank), y las emisiones de CO₂ (T-T-P, W-T-P).
- Estimación de los consumos de energía y emisiones de CO₂ asociadas a la fabricación de las embarcaciones con las distintas alternativas de propulsión.
- Estimación de los costes totales para la propiedad (TCO) de las distintas alternativas.
- Realización de comparativas globales de las distintas alternativas desde el punto de vista de diferentes criterios (consumos de energía, emisiones de CO₂, masa y volumen de almacenamiento, y coste).

1.3. Alcance del trabajo

Con este trabajo se buscan nuevas alternativas de propulsión para descarbonizar el sector marítimo como se ha dicho anteriormente, y posteriormente realizar una evaluación de cada alternativa desde un punto de vista energético, de emisiones y económico.

En el capítulo 1 se realiza una introducción general del trabajo y en el capítulo 2 se realiza un planteamiento general de todas las alternativas y sus posibles combinaciones de combustibles y motores, así como los consumos de energía y emisiones de CO₂ asociadas a las transformaciones energéticas de los combustibles.

En el capítulo 3 se introducen las características de la embarcación que se va a estudiar, las características generales y cuantitativas de un servicio de practica, los recorridos típicos realizados por la misma y el tratamiento de datos realizado para realizar el cálculo de las velocidades y aceleraciones de esta.

En el capítulo 4 se incluyen los criterios para la evaluación de las alternativas de propulsión, como una estimación de la potencia, los consumos de energía y emisiones de CO₂, las potencias y energías específicas de las mismas, las masas y volúmenes de los sistemas de almacenamiento y por último los costes específicos de los elementos del sistema de propulsión.

En el capítulo 5 se comparan los resultados de las diferentes alternativas como las energías consumidas, emisiones de CO₂, masas y volúmenes y los costes de cada alternativa

Por último, en el capítulo 6 se se van a recoger las conclusiones generales y específicas del trabajo, presentando diversas sugerencias para el desarrollo futuro.

1.4. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Los objetivos del desarrollo sostenible (ODS) son 17 objetivos globales interconectados entre sí y diseñados para conseguir un futuro mejor y más sostenible para todos. Estos ODS fueron establecidos en 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas (ONU) y se pretende que sean alcanzados en 2030.

Los objetivos con los que tiene relación este trabajo son los siguientes:

- **Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante**, ya que es necesario expandir el uso de la energía renovable más allá del sector eléctrico y continuar mejorando en la eficiencia energética.
- **Objetivo 13: Acción por el clima**, ya que busca disminuir los niveles de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

- **Objetivo 14: Vida submarina**, ya que este objetivo se centra en la protección del medio marino y de los seres que habitan en él. Actualmente existe un deterioro de las aguas costeras debido a la contaminación y acidificación de los océanos que está teniendo un efecto adverso en el funcionamiento de los ecosistemas y biodiversidad.

2. ALTERNATIVAS PARA LOS SISTEMAS DE PROPULSIÓN DE EMBARCACIONES

2.1. Posibles combinaciones de motores-combustibles y de almacenamiento de energía a bordo.

En un planteamiento general, se pueden considerar distintos sistemas propulsivos con distintos combustibles y sus posibles variantes con hibridación eléctrica.

En general, se consideran en primer lugar que los sistemas de propulsión pueden estar basados en **motores de combustión interna alternativos**, alimentados con combustibles como el diésel (o gasóleo), biodiésel, e-diesel, gas natural, biometano, hidrógeno, y sus mezclas. Estos sistemas de propulsión de combustión pueden llevar en paralelo un sistema de propulsión eléctrico (**hibridación en paralelo**). En segundo lugar, se consideran las **pilas de combustible**, alimentadas con hidrógeno puro, con presencia de baterías eléctricas en el vehículo. Finalmente, existe la posibilidad de que el sistema de propulsión será totalmente **eléctrico**, almacenando la energía de propulsión en **baterías eléctricas**. También se puede considerar un sistema de propulsión eléctrico que genere la electricidad a bordo del vehículo mediante un motor de combustión con diésel u otro combustible (**hibridación en serie**).

La Tabla muestra las posibles combinaciones entre sistemas de propulsión y sus combustibles, así las mezclas de combustibles y las hibridaciones de sistemas térmico-eléctricos. Se indican también las opciones que, siendo posibles, no se consideran en este trabajo, como son por ejemplo las basadas en la gasolina como combustible. Adicionalmente a lo recogido en la Tabla, también es posible un sistema de hibridación en serie.

Tabla 1. Posibles combinaciones de sistemas de propulsión y combustibles/electricidad

Combinaciones de Sistemas de Propulsión y Combustibles/Electricidad						
		Sistema de Propulsión				
Combustible		MCIA-MEP	MCIA-MEC	Hibridación paralelo	Motor Eléctrico con Batería	Pila Combustible
Diésel		-	1	1.2	-	-
Biodiésel		-	2	2.2	-	-
Gasolina		X	-	X	-	-
Bioetanol		X	-	X	-	-
GNC		3	-	X	-	-
Biometano		4	-	X	-	-
H2	Mix Electric.	5	-	X	-	8.1
	Electr. Renov.	X	X	X	-	8.2
	Reformado	X	X	X	-	8.3
H2-GN	Mix Electric.	6	-	X	-	-
H2-Diésel	Mix Electric.	-	7	-	-	-
Electricidad	Mix Electric.	-	-	-	9.1	-
	Electr. Renov.	-	-	-	9.2	-
E-Fuel (Gasolina)		X	-	X	-	-
E-Fuel (Diésel)		-	10	X	-	-
Combinación considerada						
No considerado (pero posible)						
- (Combinación no posible)						

A continuación, se describen las alternativas consideradas en general, aunque los **cálculos detallados se restringen a las opciones 1, 2, 8** (tres opciones de origen del hidrógeno), **9** (dos opciones de origen de la electricidad) **y 10**.

Sistemas de propulsión alimentados con combustibles líquidos

Motor de combustión interna alimentados con diésel

Este tipo de combinación de sistema propulsión y combustible es el más empleado hoy en día, consistente en un motor de combustión interna alternativo (MCIA) alimentado por diésel. Es posible realizar una hibridación eléctrica en paralelo, tal y como se muestra en la figura 1. La hibridación en paralelo permite reducir el consumo de combustible, aunque sólo tiene en interés cuando los puntos de operación del motor son muy distintos, no siendo habitual en la propulsión de embarcaciones.

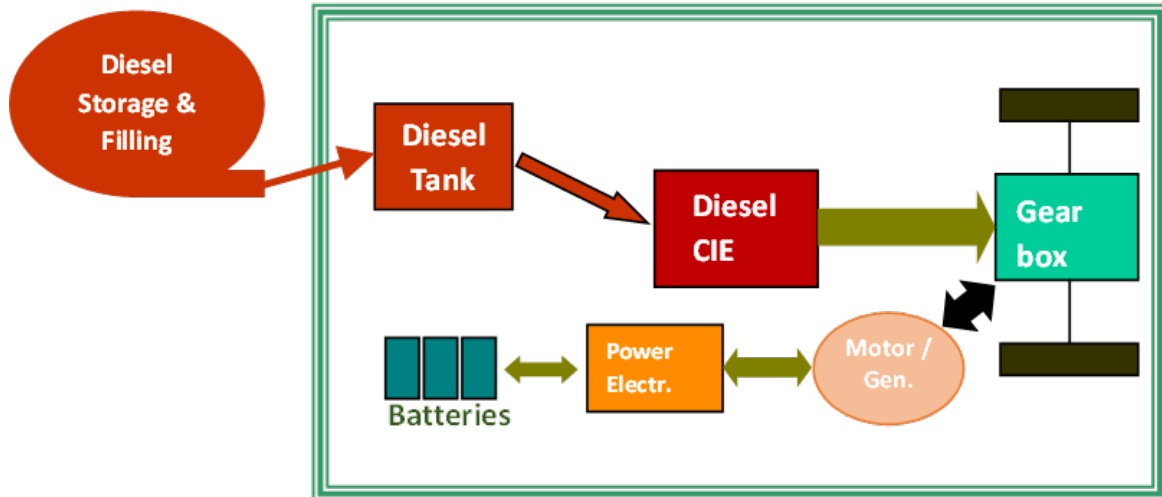


Ilustración 1. MCIA alimentado por diésel.

Motor de combustión interna alternativo alimentado con biodiésel.

Partiendo de una configuración con un motor diésel, en este tipo se emplea una mezcla de dos tipos de combustibles, diésel y biodiésel, cuyo porcentaje de mezcla puede variar entre 100% y 0%. Una referencia es considerar un porcentaje de un 30% de biodiésel. El biodiésel es renovable, por lo que sus emisiones de CO₂ no computan para los gases de efecto invernadero. En este trabajo se va a considerar biodiésel al 100% para analizar las ventajas con este porcentaje máximo.

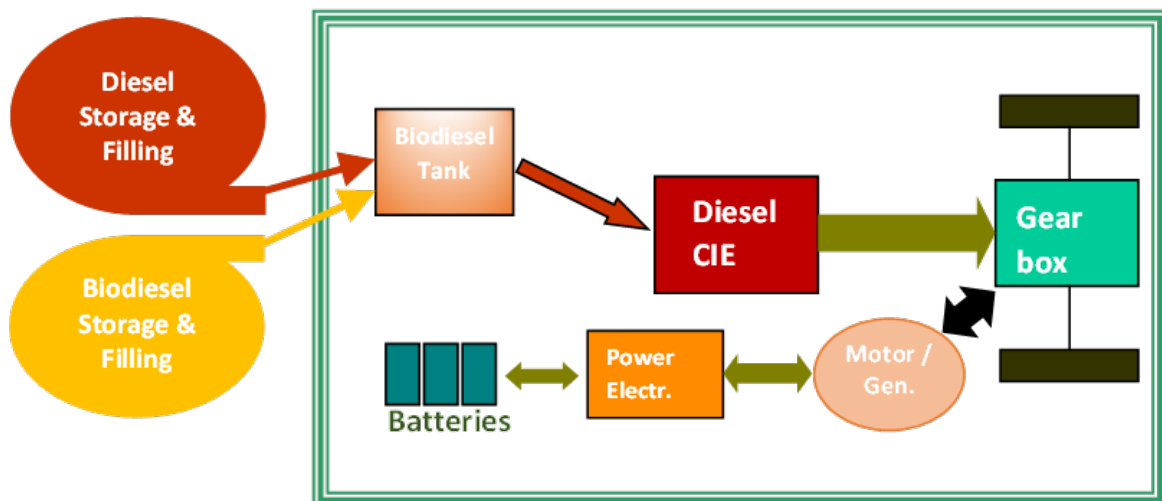


Ilustración 2. MCIA alimentado por diésel y biodiésel.

Motor de combustión interna alternativo con e-fuel

Los e-fuels son combustibles sintéticos, obtenidos a partir de hidrógeno con CO₂ previamente capturado, por lo que la emisión directa de CO₂ se compute. Pueden ser de tipo gasolina o de tipo diésel, aunque en este trabajo sólo se va a considerar el e-diésel. Es compatible con hibridación eléctrica.

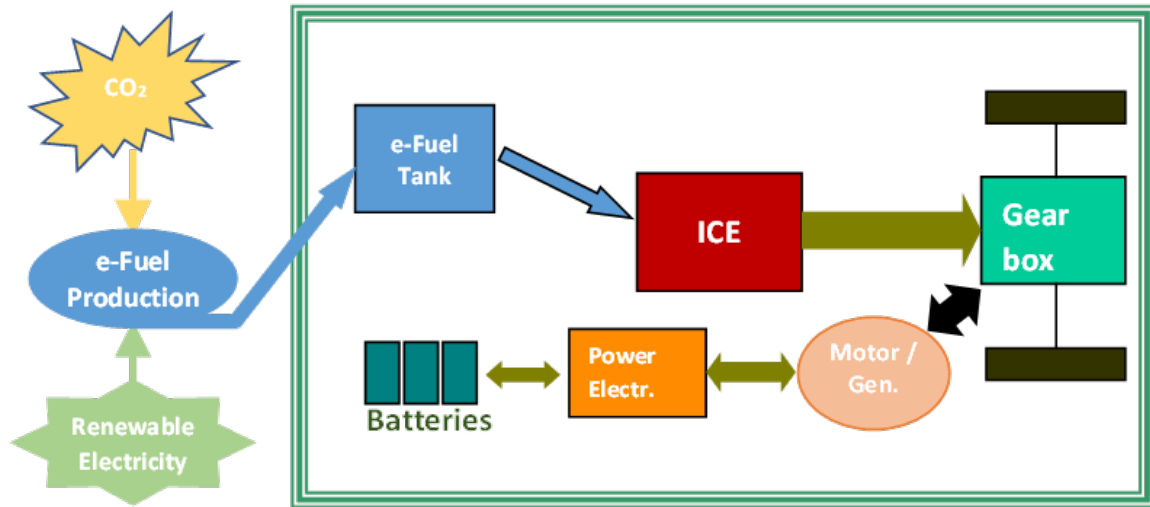


Ilustración 3. Motor de combustión alimentado con e-fuel.

Sistemas de propulsión alimentados con combustibles gaseosos.

Motor de combustión interna alternativo alimentado con gas natural.

En este caso, el motor de combustión es de tipo de encendido provocado (MEP), alimentado con un combustible gaseoso. Esta opción tiene como base el gas natural comprimido, pero también cabe la posibilidad de realizar una mezcla de hidrógeno y gas natural, como se indica más abajo.

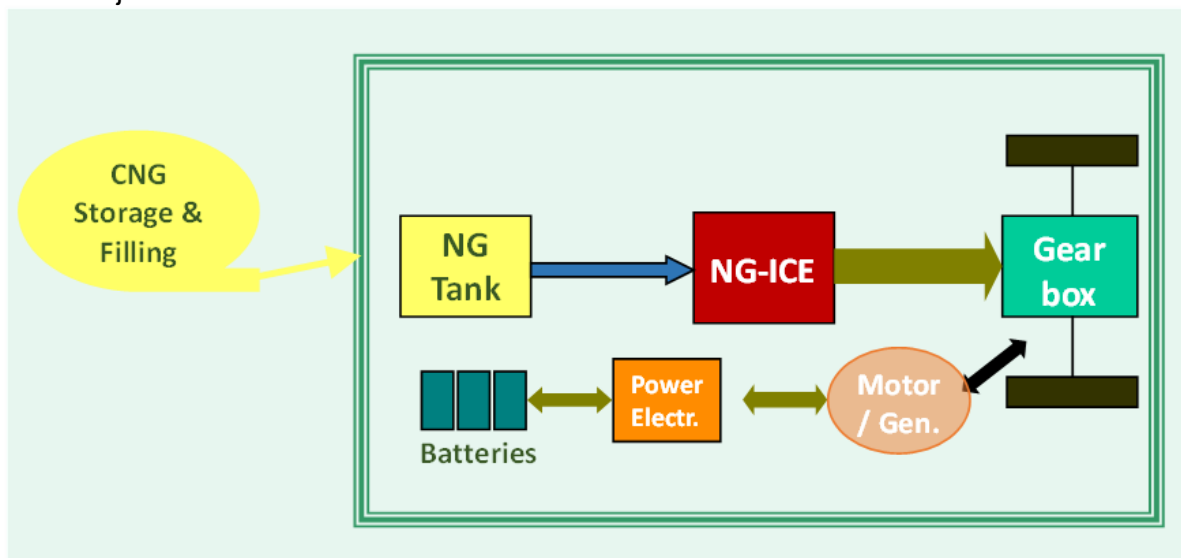


Ilustración 4. Motor de combustión interna alternativo alimentado con gas.

Motor de combustión interna alternativo alimentado con biometano.

El biometano es un combustible renovable que también permite mezclas con gas natural en distintas proporciones y admite hibridación eléctrica.

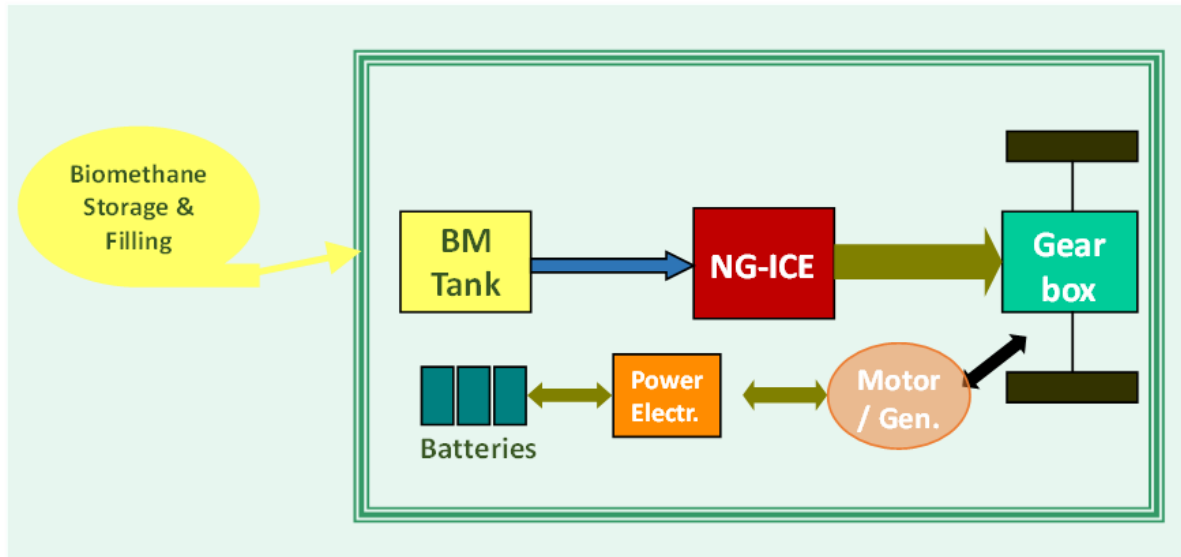


Ilustración 5. Motor de combustión interna alternativo alimentado con biometano.

Sistemas de propulsión alimentados hidrógeno.

Motor de encendido provocado alimentado con hidrógeno puro.

El hidrógeno es un combustible gaseoso, pero dadas sus singularidades, se encuadra en este apartado específico. Este tipo de propulsión con hidrógeno como combustible único requiere de un motor tipo MEP y admite opciones de hibridación. El hidrógeno puede tener diversos orígenes, siendo deseable el hidrógeno de origen renovable, para que su obtención no contribuya a las emisiones de gases de efecto invernadero.

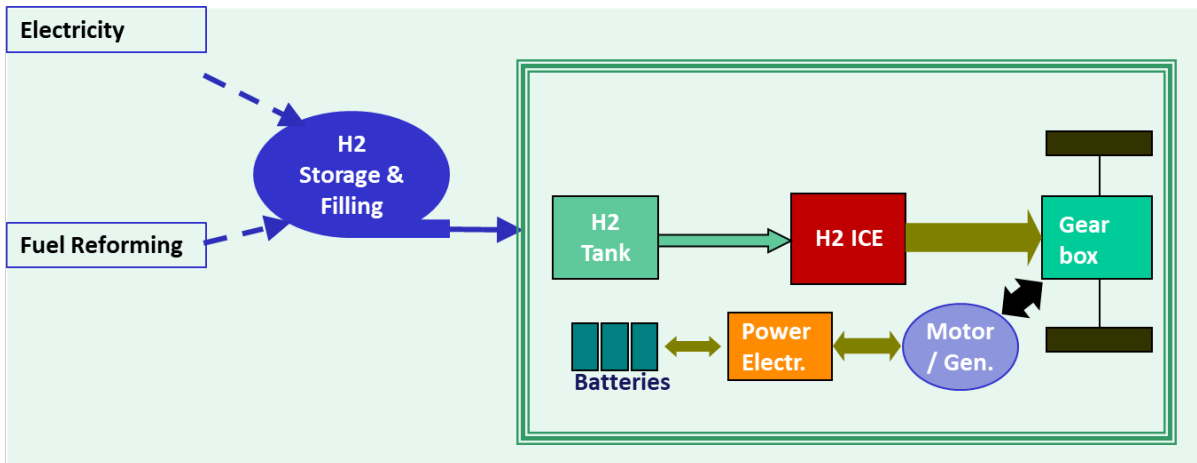


Ilustración 6. Motor de encendido provocado con hidrógeno como combustible principal.

Motor de encendido provocado alimentado con mezclas de hidrógeno-gas natural (H-GN, H-CNG)

En este tipo el combustible que alimenta el motor de tipo MEP es una mezcla de hidrógeno con gas natural con porcentaje entre 60% y 0%, normalmente del 30%. Lo habitual es que se reposte directamente la mezcla de los dos gases. La referencia es hidrógeno renovable, pero podría tener otro origen, y este modelo es compatible con hibridación eléctrica. En caso de que el hidrógeno se renovable, las emisiones de CO₂ se reducen en la misma proporción de la presencia de hidrógeno en la mezcla H-GN.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

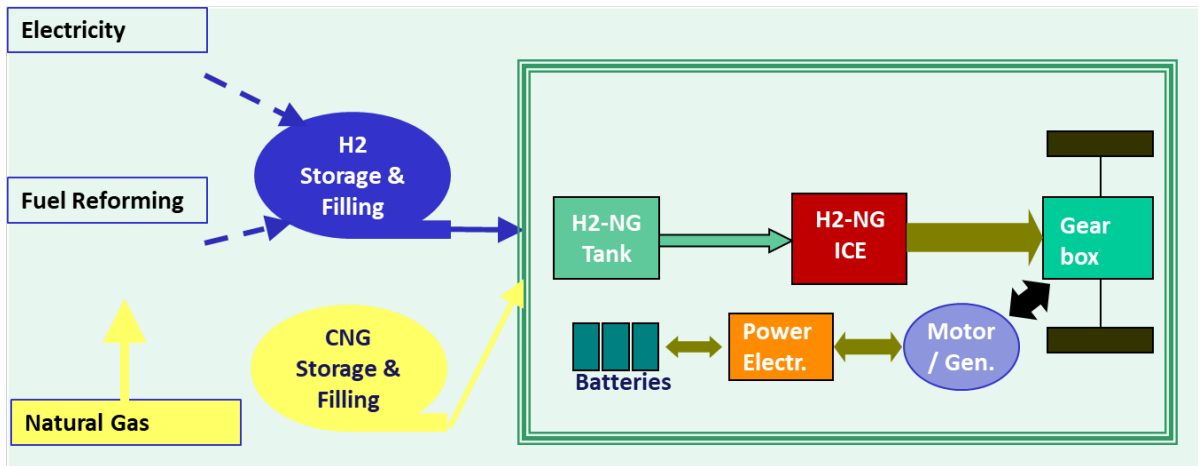


Ilustración 7. Motor de encendido provocado con mezcla de hidrógeno y gas natural.

Motor de encendido por compresión con hidrógeno-diésel dual.

El motor es de tipo diésel, es decir, que el encendido se realiza por compresión, al auto inflamarse el combustible diésel. Adicionalmente se realiza un aporte en modo dual de hidrógeno entre 60% y 0% (típicamente 30%). La referencia es hidrógeno renovable, pero podría tener otro origen. Nuevamente, las emisiones de CO₂ se pueden reducir respecto a las del diésel en la misma proporción del hidrógeno renovable. Es también compatible con hibridación.

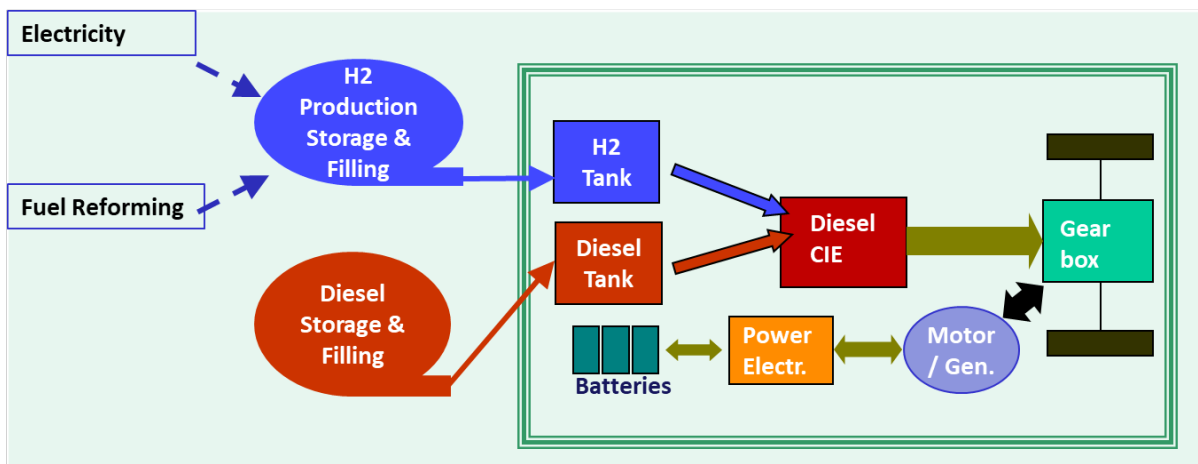


Ilustración 8. Hidrógeno-Diésel dual.

Sistemas de propulsión eléctricos.

Dentro de los sistemas de propulsión eléctricos, es decir, que la energía mecánica en la rueda o en la hélice se obtenga mediante un motor eléctrico, se encuentran tres opciones: Pila de combustible alimentada con hidrógeno, Almacenamiento de la energía en baterías, y Generación de electricidad a bordo mediante un generador accionado por un motor de combustión.

Pila de combustible alimentada con hidrógeno.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

La pila de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía del combustible que la alimenta (normalmente hidrógeno) en electricidad, sin pasar por un proceso térmico. La electricidad generada se usa para a su vez alimentar el motor eléctrico de propulsión. En general existe una batería que actúa como almacenamiento tanto del exceso de electricidad (por ejemplo, en una deceleración) como aparta la energía necesaria cuando el motor demanda más de la que la pila de combustibles produce instantáneamente. Para este modelo se consideran distintos orígenes para la producción del hidrógeno, como, por ejemplo: electricidad renovable, electricidad mix, reformado de gas natural y reformado de gas natural con captura de CO₂ (CCS). Cada uno de estos orígenes supone unas emisiones de CO₂ indirectas, que es preciso tener en cuenta.

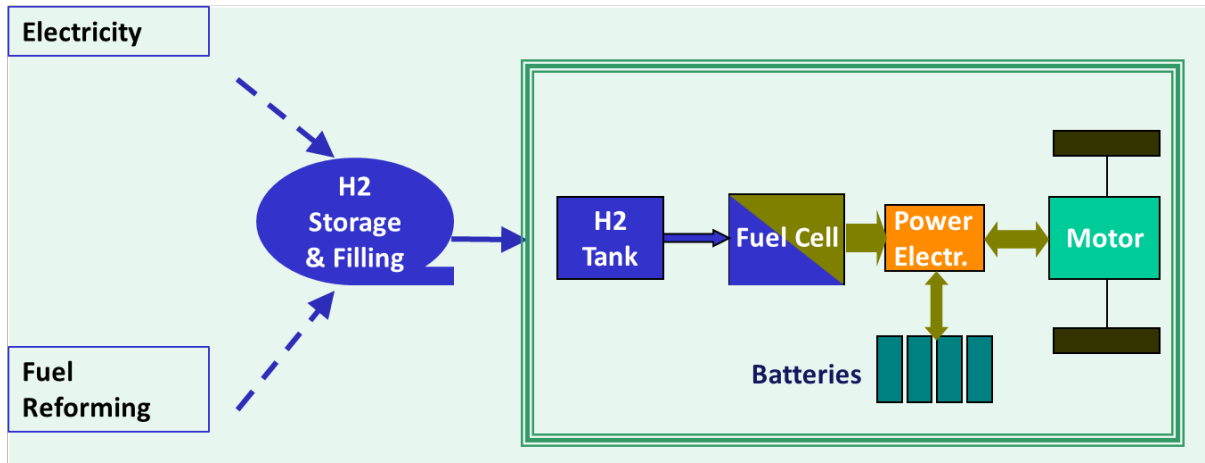


Ilustración 9. Pila de combustible alimentada con hidrógeno.

Propulsión eléctrica a batería.

En este sistema de propulsión la electricidad se ha producido previamente y se almacena de forma electroquímica en las baterías del vehículo o embarcación. A partir de esta energía almacenada se hace funcionar el motor eléctrico de propulsión. La batería permite también almacenar la energía eléctrica que se genera en un proceso de deceleración (muy importante en vehículos con ruedas, pero menos en embarcaciones). La electricidad puede tener diversos orígenes, desde renovable completamente, hasta de origen fósil, pasando por la situación habitual de un mix de generación, caracterizado por una cierta cantidad de CO₂ emitido por cada kWh generado (por ejemplo, 136 g CO₂/kWh en España en 2021). Esta emisión de CO₂ se debe tener en cuenta para una evaluación comparativas de las distintas alternativas.

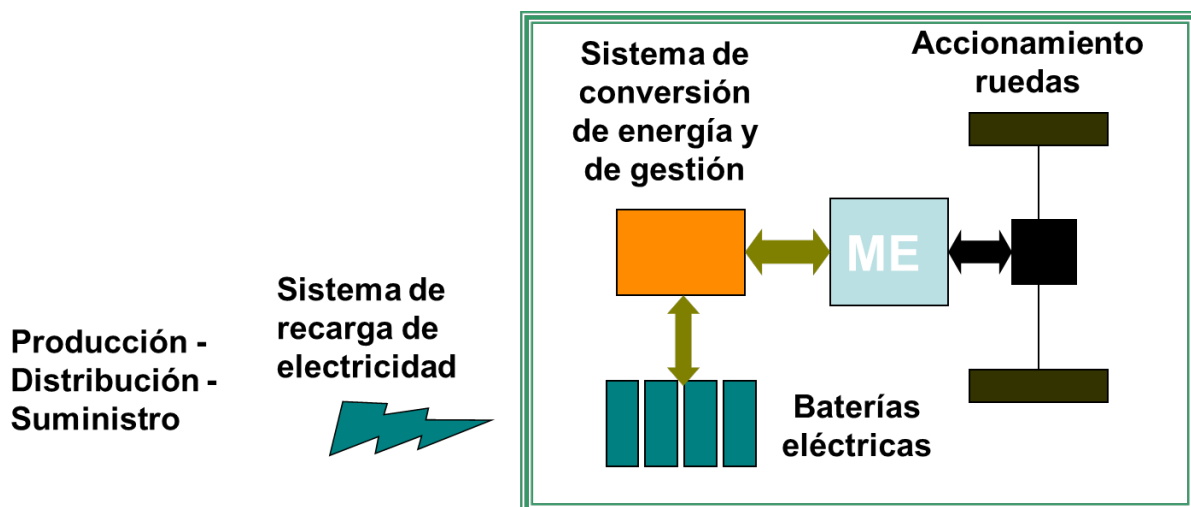


Ilustración 10. Propulsión eléctrica a batería.

Propulsión eléctrica a partir de electricidad producida con un generador accionado por un motor de combustión (híbrido serie)

Este sistema está compuesto por un motor de combustión interna alternativo el cual funciona con gasóleo, generando electricidad a bordo para alimentar un motor eléctrico, acoplado a las ruedas o la hélice de la embarcación. No es un sistema habitual en las embarcaciones, por lo que no se va a considerar en las comparativas posteriores.

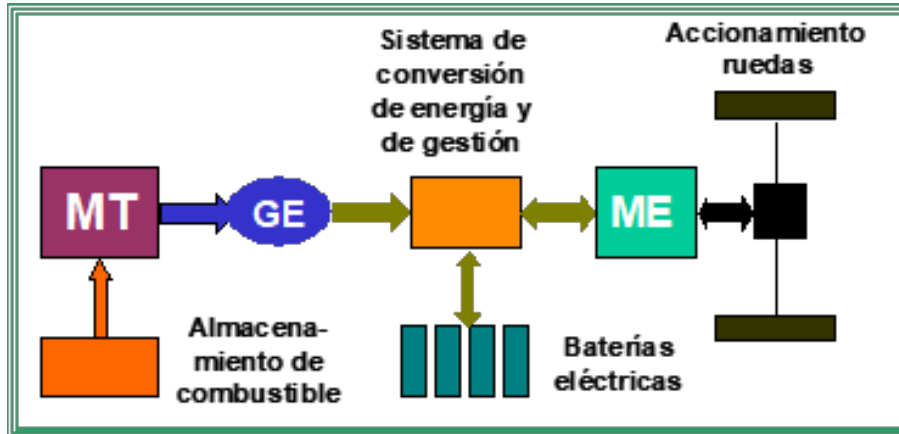


Ilustración 11. Sistema híbrido-serie con motor diésel y propulsión eléctrica

2.2. Consumos de energía y emisiones de CO₂ asociadas a las transformaciones energéticas de los combustibles.

Si se considera un vehículo de carretera o una embarcación, el movimiento del vehículo se realiza a costa de vencer la energía disipada en la resistencia debida a la fricción y a la aerodinámica/hidrodinámica del vehículo.

Partiendo de la energía necesaria en la rueda (**wheel**) o en la estela (**wake**) o alternativamente en la hélice, se puede obtener la energía que el sistema de propulsión debe proporcionar, a través del rendimiento de la transmisión y acoplamiento mecánico motor/rueda-hélice.

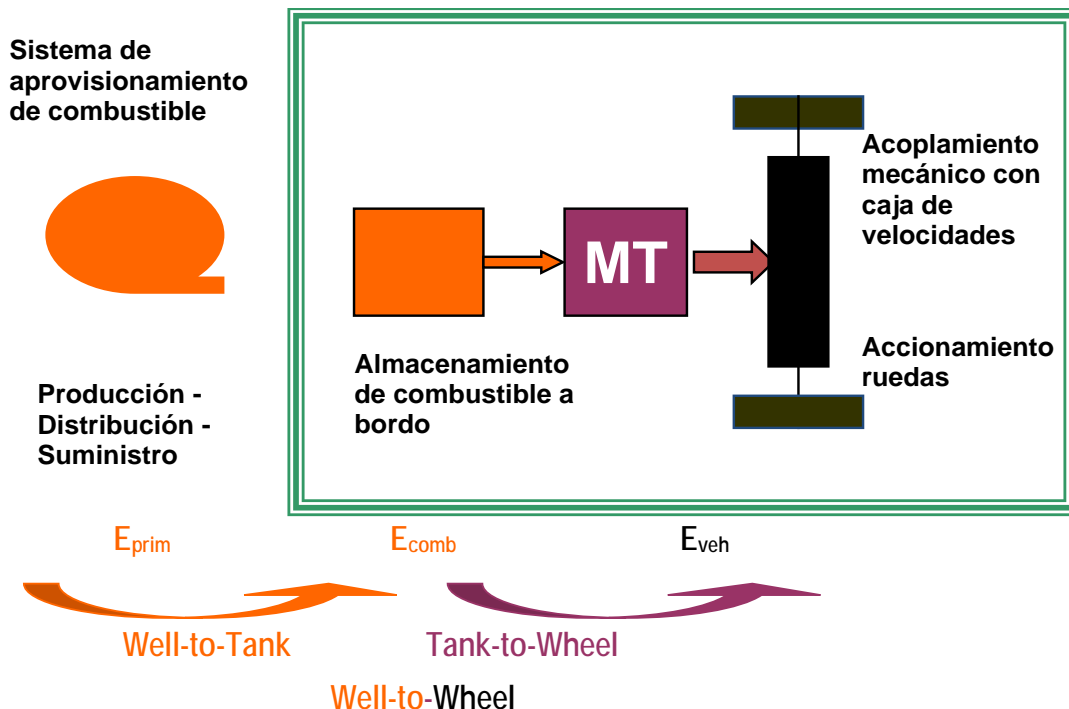


Ilustración 12. Transformaciones energéticas de los combustibles

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

Con el **rendimiento Tank-to-Wake** η_{TtW} del motor que genera la energía mecánica se pasa a calcular la energía necesaria en el tanque de combustible. Hay que indicar que este planteamiento es general, es decir, que en unos casos se refiere a un motor de combustión que consume un combustible como el gasóleo, mientras que en otros puede ser un motor eléctrico alimentado por electricidad. Esta electricidad puede ser la almacenada en la batería, bien la generada por una pila de combustible o incluso un generador eléctrico convencional. Lo importante es considerar que cada transformación implica unas pérdidas, que se pueden caracterizar mediante el rendimiento de la transformación. El rendimiento global de varias transformaciones sucesivas se puede calcular como el producto de los rendimientos.

Con ese planteamiento se puede obtener la energía consumida en los procesos **Tank-To-Wake** (a bordo de la embarcación), así como las emisiones de CO₂ directas (nulas en el caso de la electricidad o el hidrógeno).

Disponer de los combustibles o la electricidad para rellenar o recargar el sistema de almacenamiento a bordo del vehículo requiere unos procesos previos de producción. Estos procesos de producción de los combustibles o la electricidad (procesos Well-To-Tank) se caracterizan por la energía consumida, o alternativamente por el **rendimiento Well-to-Tank** η_{WtT} , así como por las emisiones de CO₂ generadas en los mismos por cada unidad de energía en el tanque. De esta forma, cuando se tienen en cuenta dichos procesos, se obtienen los consumos de energía primaria totales y las emisiones de CO₂ totales (**Well-To-Wake**).

Una forma conveniente de expresar los consumos de energía es en forma de **energía por unidad de longitud** recorrida. Para un determinado vehículo, una embarcación por ejemplo, esta energía por unidad de longitud va a depender de forma muy importante de la velocidad (del cuadrado de la misma, más exactamente) y de la masa (*desplazamiento*) de la embarcación. Otra forma de ver esta energía por unidad de longitud es considerar que equivale a la fuerza que es necesaria aplicar a la rueda o a la hélice para propulsar el vehículo. Esta fuerza es equivalente a la resistencia al avance, debida a las fuerzas de rozamiento, aerodinámicas o hidrodinámicas, de inercia o de ascenso de pendientes (en vehículos de carretera o aéreos). A su vez, el producto de la fuerza de propulsión por la velocidad proporciona la potencia en la rueda o en la estela necesaria para el movimiento del vehículo.

Si se considera conocida la **energía por unidad de longitud en la hélice** $(E/L)_{hel}$, se puede obtener la misma variable pero referida al tanque, considerando el rendimiento η_{TtW} tanque a hélice (T-T-W).

Análogamente, se puede obtener la **energía por unidad de longitud en términos de energía primaria**, considerando el rendimiento η_{WtT} del pozo al tanque (W-T-T). El producto de ambos rendimientos es el rendimiento η_{WtW} del pozo a la hélice o la estela (W-T-W).

Estas relaciones se pueden expresar de la forma siguiente:

$$(E/L)_{prim} = (E/L)_{tank} / \eta_{WtT} = (E/L)_{hel} / \eta_{TtW} / \eta_{WtT} = (E/L)_{hel} / \eta_{WtW} \quad (\text{J/km ó Wh/km})$$

Mientras que las **emisiones de CO₂** asociadas al consumo de combustible en el **tanque** valen:

$$(eCO_2/L)_{TtW} \text{ (g/km)} = eCO_2 \text{ (g/Wh}_{tank}) (E/L)_{tank} \text{ (Wh/km)}$$

Donde $eCO_2 \text{ (g/Wh}_{tank})$ es el **factor de emisión de cada combustible**, pero referido a la energía consumida del mismo. Hay que indicar que este factor de emisión vale cero para el hidrógeno y para la electricidad. Para los combustibles renovables, como el biodiésel y los e-fuels, también vale cero, puesto que aunque se emita CO₂, éste no se contabiliza.

Por su parte, las emisiones de gases de efecto invernadero referidas al proceso global Well-To-Wheel/Wake se deben calcular como suma de las anteriores más las de los procesos Well-To-Tank:

$$(eCO_2/L)_{WtW} \text{ (g/km)} = (eCO_2/L)_{TtW} + (eCO_2/L)_{WtT}$$

donde

$$(eCO_2/L)_{WtT} \text{ (g/km)} = eCO_2\text{-WtT} \text{ (g/Wh}_{tank}) (E/L)_{tank} \text{ (Wh/km)}$$

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

El **factor de emisión e_{CO_2-WtT} asociado a la producción de los combustibles y la electricidad** se debe determinar atendiendo a los distintos procesos utilizados. Se puede citar como ejemplo el documento del JEC Technical Reports. WELL-TO-TANK del año 2020, donde se enumeran distintos valores dependiendo del origen y los procesos de obtención. Hay que indicar que este factor de emisión e_{CO_2-WtT} es mayor que cero para todos los combustibles, incluso los renovables, y también para la electricidad.

Estos **valores totales de energía consumida y emisiones de CO_2 Well-To-Wheel/Wake**, como suma de los procesos Well-To-Tank y Tank-To-Wake, son los que se deben usar para comparar de forma correcta las distintas alternativas de propulsión.

3. EMBARCACIONES DE PRÁCTICOS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RECORRIDOS EN EL PUERTO DE VALENCIA.

3.1. Aspectos generales del servicio de prácticos.

Este apartado se centra en explicar que es un servicio de practica en puerto y los diferentes tipos de recorridos que realiza la lancha de prácticos en función del lugar en el que se encuentre el buque.

Para entender qué es un servicio de practica, hay que indicar qué es un práctico, el cual es un capitán de marina mercante que acumula muchas horas de navegación y es la máxima autoridad dentro del puerto, ya que conoce perfectamente el lugar donde opera, así como los distintos calados que se dan dentro del puerto para saber dónde tienen que ir amarrados los distintos buques que entran y las maniobras que deben realizar para atracar o desatracar.

Por ello, el servicio de practica es el servicio de asesoramiento a capitanes de buques y artefactos flotantes en su entrada, salida y las maniobras que se dan dentro del puerto con el fin de que estas se puedan dar en condiciones de seguridad.

Los recorridos que realizan las lanchas de prácticos vienen determinados por el tipo de maniobra que solicita el buque asesorado, siendo las siguientes:

- **Maniobra de atraque:** en este caso, el buque se encuentra a la salida del puerto con la intención de atracar dentro del puerto, por ello la lancha de prácticos se traslada desde la base hasta la bocana del puerto para llevar al practico hasta el buque, y este sube a bordo mediante una escalera de gato. Posteriormente la lancha se traslada hasta el lugar donde el buque va a ser amarrado en el puerto para así, una vez finalizada la maniobra recoger al práctico y devolverlo a la base.
- **Maniobra de desatraque:** el buque asesorado tiene la intención de salir del puerto hacia su próximo destino, por ello la lancha de prácticos se traslada desde la base hasta el lugar donde el buque se encuentra atracado, y posteriormente el práctico sube a bordo para dirigir la maniobra. Una vez el práctico se encuentra a bordo del buque la lancha se traslada a la salida del puerto donde una vez allí finalizada la maniobra, recoge al práctico que baja hasta la lancha por una escalera de gato y lo devuelve a la base.
- **Maniobra de cambio de amarre:** muchas veces, por cuestiones de logística o de espacio dentro del puerto, muchos buques se ven obligados a cambiar de amarre dentro del puerto. En este tipo de maniobras la lancha parte de la base para dejar al practico en el amarre donde va a ser trasladado el barco, después de que el practico suba a bordo la lancha se traslada hasta el amarre final del buque con el fin de devolver al practico a la base.

3.2. Características generales de las embarcaciones de prácticos en el puerto de Valencia.

En el puerto de Valencia prestan servicio de pilotaje cuatro embarcaciones, emparejadas dos a dos. Las características y requisitos de dichas embarcaciones son las siguientes:

- Eslora de 12 metros
- Manga de 4 metros
- Autonomía mínima de 6 horas.
- Velocidad máxima de unos 28 kn.
- Velocidad media de 20 kn.
- Espacio para dos tripulantes más dos prácticos.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

- Espacio para máquinas, cabina y algunas tienen pañol en proa.
- Cubierta transitable en todo su perímetro.

En la Ilustración 13 se puede ver una fotografía de una de las embarcaciones (Edetania) de servicio de pilotaje en el puerto de Valencia.



Ilustración 13. Imagen de lancha de prácticos Edetania

3.3. Identificación de recorridos típicos en las condiciones de servicio.

Para poder saber los consumos energéticos y las emisiones de CO₂ asociadas a los servicios de pilotaje, es necesario previamente identificar los recorridos típicos asociados a los servicios de pilotaje, en términos de distancia recorrida, tiempo empleado, velocidades (media, máxima), y aceleraciones (medias, máximas).

Todo ello se traduce en unos valores representativos de la potencia en la hélice y en el motor, y partir de esta última, de la energía consumida en el tanque (combustibles líquidos, hidrógeno, electricidad almacenada en la batería). De acuerdo a lo indicado en el Apartado 2.2, a partir de estos valores se pueden obtener los consumos de energía primaria y las emisiones totales de CO₂ en los procesos Well-To-Wake, para posibilitar la comparación de distintas alternativas.

Para identificar los recorridos típicos se han usado diversos métodos, desde los más sencillos, pero con poca resolución, hasta otro más detallado.

3.3.1. Resultados de la web Marine Traffic.

Para identificar recorridos típicos de las lanchas de prácticos en el puerto de Valencia, primeramente, se utilizó la web de “Marine Traffic” o tráfico marítimo, la cual es una web que proporciona información en tiempo inmediato (casi real, y retrospectivo) sobre los movimientos y la ubicación de los barcos que se encuentran navegando o surtos en puertos.

Como ejemplo, se pudieron obtener los recorridos de la lancha de prácticos EDETANIA cuando se encontraba en servicio durante el 21 de marzo de 2022 y dos de mayo de 2022.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

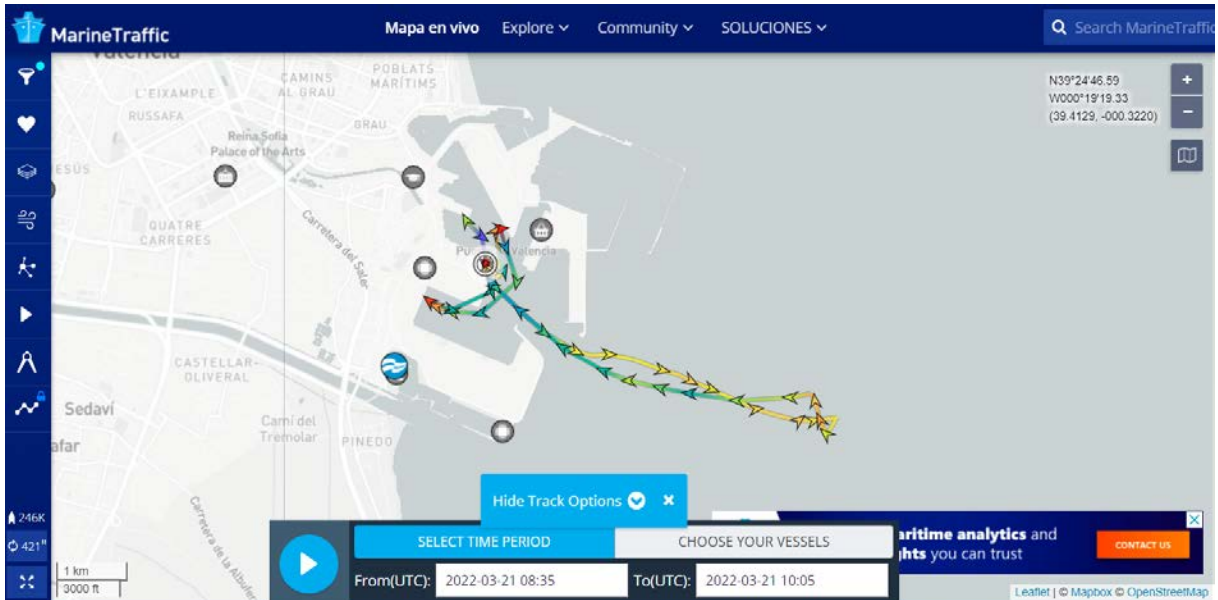


Ilustración 14. Recorridos de la embarcación de prácticos Edetania 21/03/2022

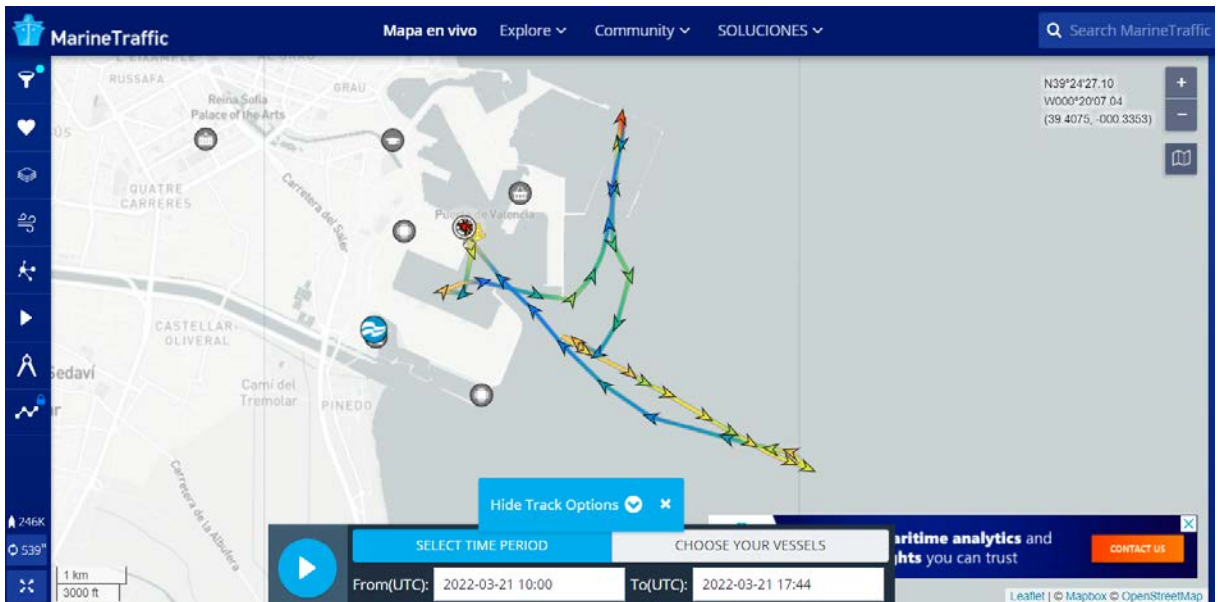


Ilustración 15. Recorridos de la embarcación de prácticos Edetania 21/03/2022

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

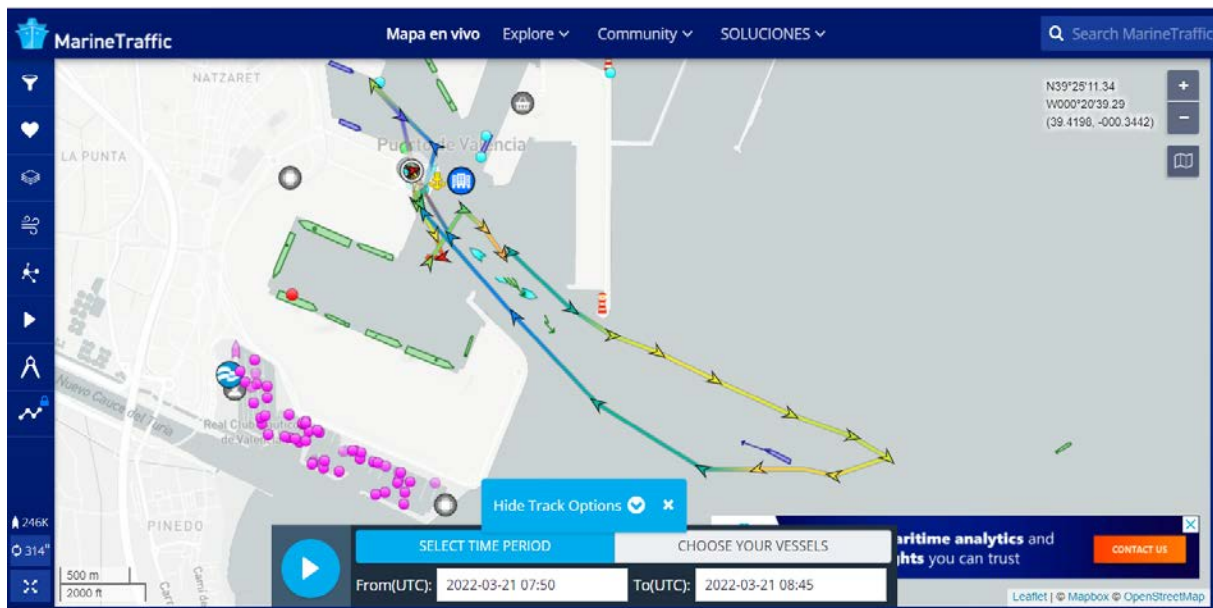


Ilustración 16. Recorridos de la embarcación de prácticos Edetania 21/03/2022

Como se observa en las Ilustraciones 12, 13 y 14, la embarcación realiza unos recorridos parecidos al prestar el servicio de practicaaje, pero no resulta sencillo obtener un recorrido típico, ni se obtienen directamente resultados de velocidades o aceleraciones.

Respecto a las velocidades, la misma página web de Marine Traffic proporciona algunos datos sobre la velocidad y el calado de la embarcación cuando se encuentra en servicio. El dato de calado (draught) en sí mismo no resulta de utilidad, dado que está muy afectado por el error del sistema de posicionamiento ya que la diferencia de alturas de la lancha no es apreciable por el sistema GPS.

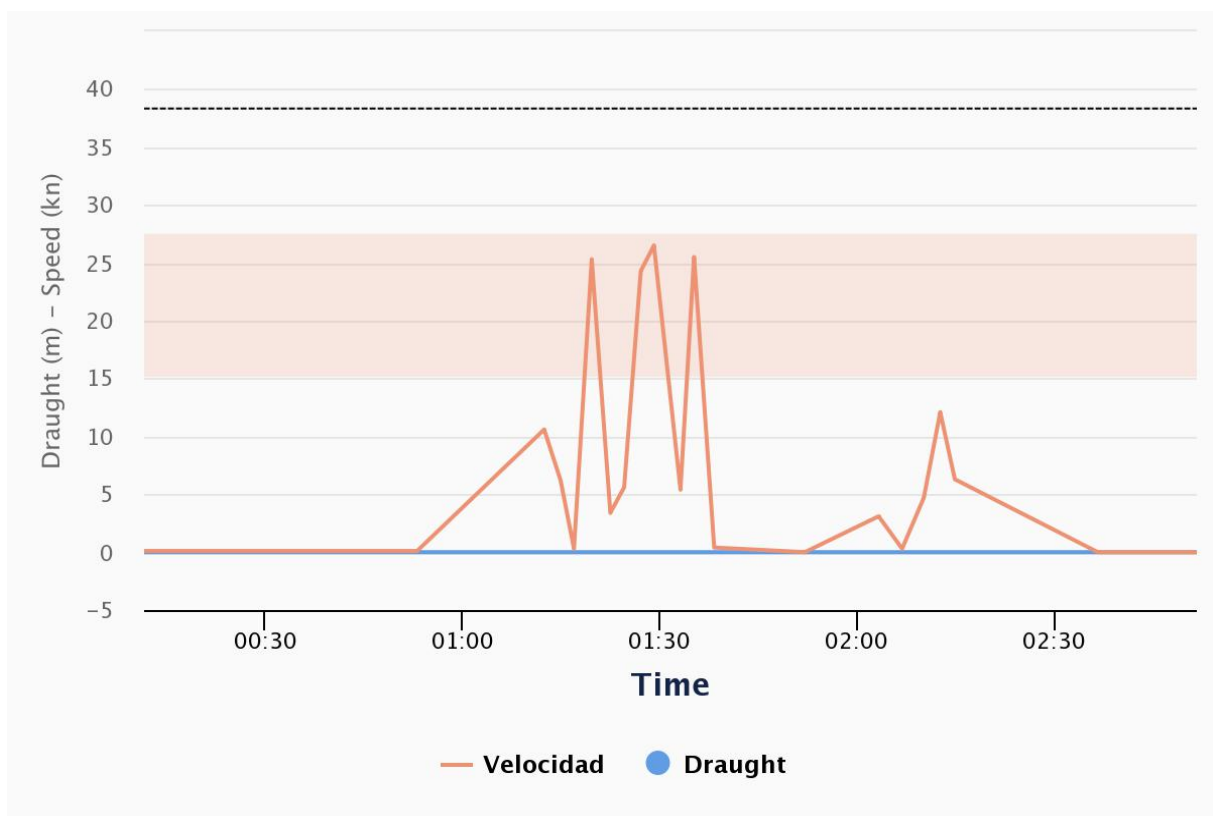


Ilustración 17. Velocidad y calado durante un servicio de practicaaje (01/05/2022).

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

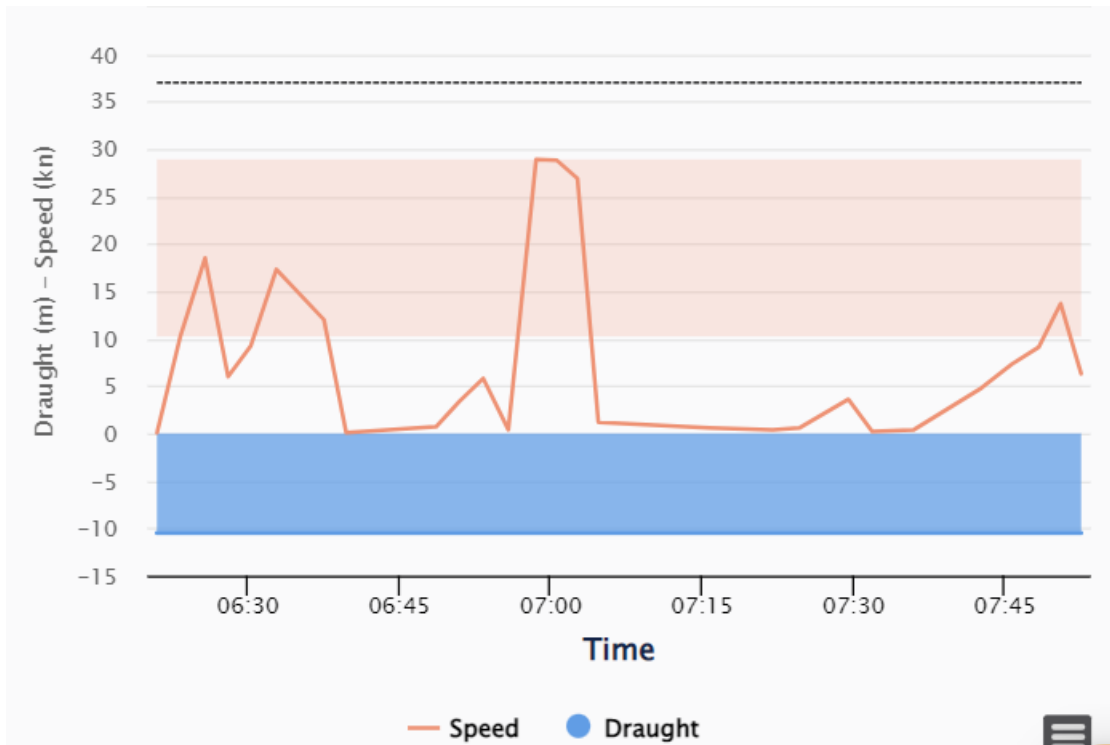


Ilustración 18. Velocidad y calado durante un servicio de practicaje (01/05/2022).

Como se puede observar en las ilustraciones 16 y 17, la embarcación no tiene una velocidad constante durante el servicio, como se puede ver en el gráfico la velocidad media se encuentra entre 10 y 30 que es la marcada por la zona roja en el gráfico.

A continuación, se va a mostrar una imagen en la cual se puede observar la forma de navegar de este tipo de embarcaciones, en una embarcación muy similar a la citada.



Ilustración 19. Lancha de prácticos navegando en el Puerto de Sagunto

En la Ilustración 20 se puede ver una vista de un recorrido de la embarcación Edetania entre las 5h30 y las 8h29 del 2 de mayo de 2022. Por su parte, en la Ilustración 21 se pueden ver los valores de velocidad durante el intervalo de tiempo correspondiente a la imagen anterior.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

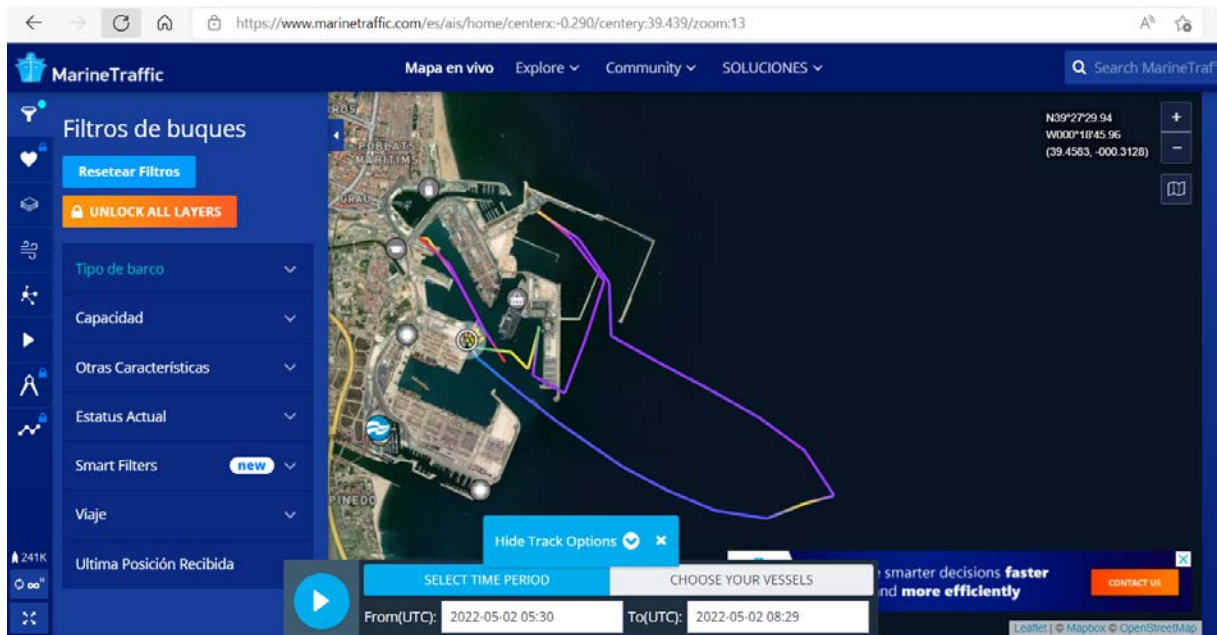


Ilustración 20. Ejemplo de recorridos de la embarcación de prácticos Edetania 02/05/2022

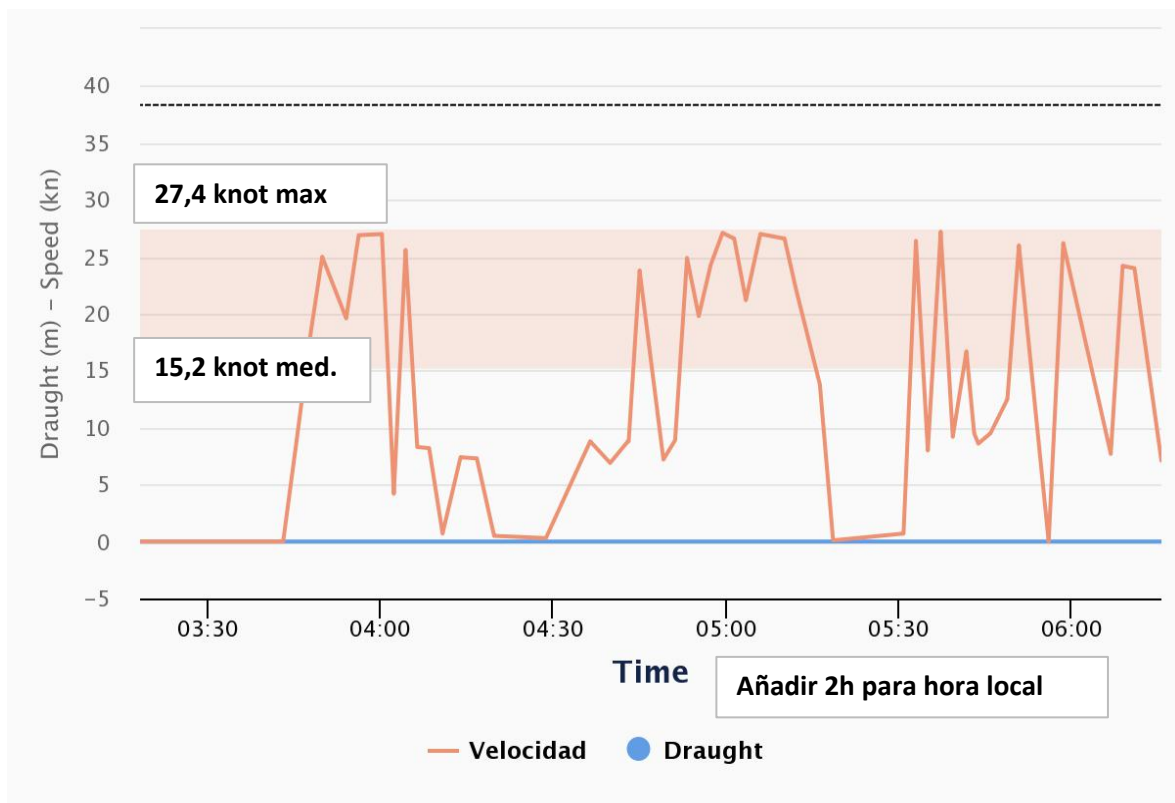


Ilustración 21. Valores de la velocidad correspondientes a recorridos de la embarcación de prácticos Edetania 02/05/2022

Otro ejemplo de cómo se trató de vincular la posición y la velocidad se puede ver en la Ilustración 22 y en la Ilustración 23, en este caso correspondientes a la embarcación de prácticos *Caballero*. En la gráfica de velocidades se puede ver que tanto la velocidad máxima (21 kn) como la velocidad media (15 kn) son menores que en el caso anterior. Además, se ha tratado de delimitar con unas líneas azules verticales los posibles inicios y finalizaciones de cada servicio, considerando el registro escrito de Marine Traffic.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

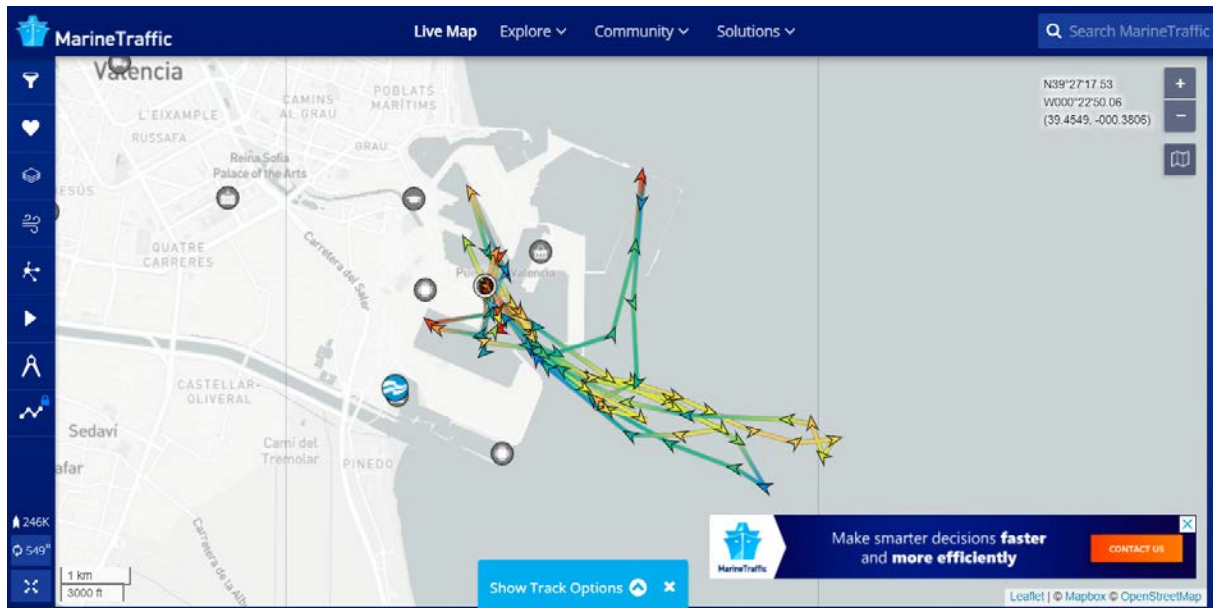


Ilustración 22. Ejemplo de recorridos de la embarcación de prácticos Caballero 21/03/2022

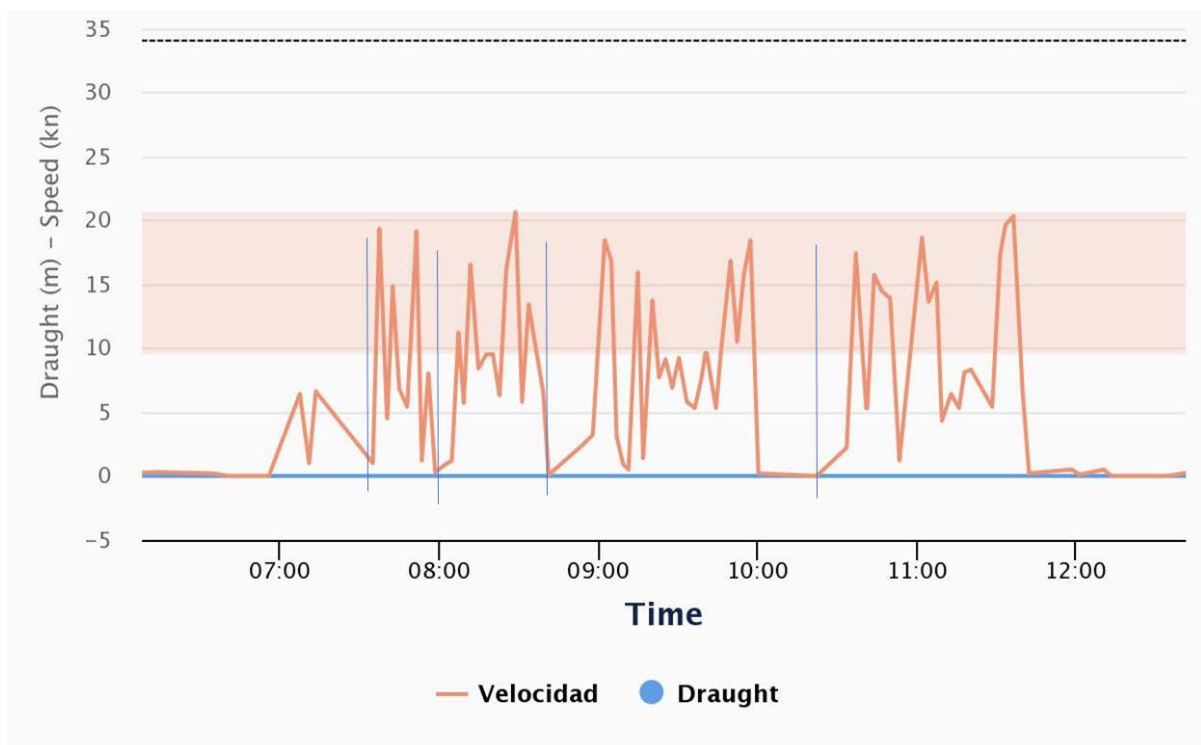


Ilustración 23. Valores de la velocidad correspondientes a recorridos de la embarcación de prácticos Caballero 21/03/2022

Como puede deducirse, no resulta sencillo identificar las velocidades y los recorridos, puesto que con la información disponible en Marine Traffic no se puede realizar de forma automática.

Por todo lo indicado, si bien la velocidad proporcionada por la web Marine Traffic inicialmente presentaba interés, dejó de tenerlo cuando se comprobó que la resolución temporal era pobre, con una separación entre los puntos de varios minutos, y la dificultad de vincular posición y velocidad de la embarcación. Por ello, fue necesario recurrir a otra fuente de información, como se indica en los apartados siguientes.

3.3.2. Resultados correspondientes al seguimiento en tiempo real de las embarcaciones.

Dado que los resultados proporcionados por Marine Traffic no son satisfactorios para el fin pretendido, se solicitó a la Asociación de Prácticos del Puerto de Valencia la información más detallada sobre los recorridos de las lanchas.

Dicha asociación suministró una serie de archivos Excel en formato csv que contenían la información de la posición de la lancha Edetania, con resoluciones temporales muy elevadas, inferiores a un segundo de tiempo cuando la lancha está en movimiento. De hecho, la enorme cantidad de información entregada equivale a un archivo de más de 100 Mb, muy difícil de manejar con las herramientas habituales de Excel.

En el apartado 3.3 se detalla las diversas operaciones que hubo que realizar para transformar los datos en un formato utilizable, así como depurar datos redundantes o contradictorios. En apartados posteriores se describen los distintos métodos para obtener de la forma más fiable posible los recorridos, las velocidades y las aceleraciones, todo con el objetivo de obtener valores representativos para realizar los cálculos de energía y emisiones.

De forma preliminar, se pueden representar las posiciones de la lancha Edetania dentro del puerto de Valencia, y en las proximidades del mismo, cuando realiza los servicios de pilotaje.

Los resultados correspondientes al mes de abril de 2022 son los siguientes.

En Ilustración 24 se pueden ver las posiciones alcanzadas por la embarcación Edetania a lo largo del día 1 de abril de 2022.

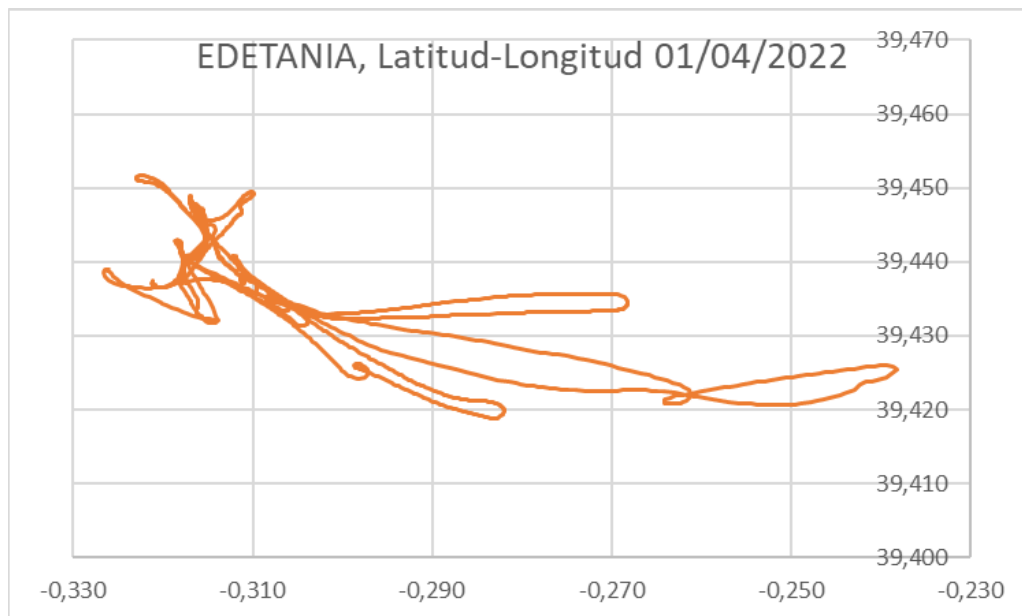


Ilustración 24. Ilustración de los recorridos realizados por Edetania (1 abril 2022).

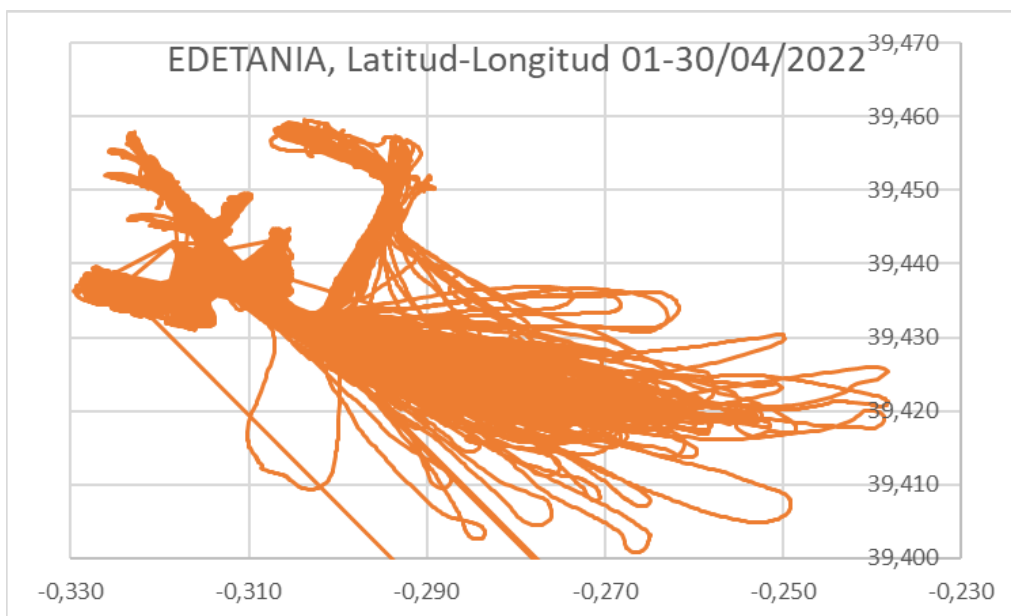


Ilustración 25. Ilustración de los recorridos realizados por Edetania durante un mes (abril 2022).

Repitiendo el proceso para todo el mes de abril de 2022, se puede ver en la Ilustración 25 todas las posiciones que la embarcación Edetania ha alcanzado en dicho mes.

Esta figura ya da una idea de una cierta repetición de los recorridos, pero no es inmediato referirlos a la posición y de la base de amarre ni a los muelles del Puerto de Valencia. Para conseguir esto último, se puso como fondo de gráfico una captura de Google Maps, de forma que las distintas posiciones y los recorridos se puedan ver de forma más clara, tal como aparece en la Ilustración 26. Se puso un cuidado especial para que las escalas del gráfico y del mapa de Google coincidan, usando la posición conocida de tres puntos geográficos: Faro de Valencia, extremo del muelle Príncipe Felipe y extremo del muelle de amarre de prácticos.

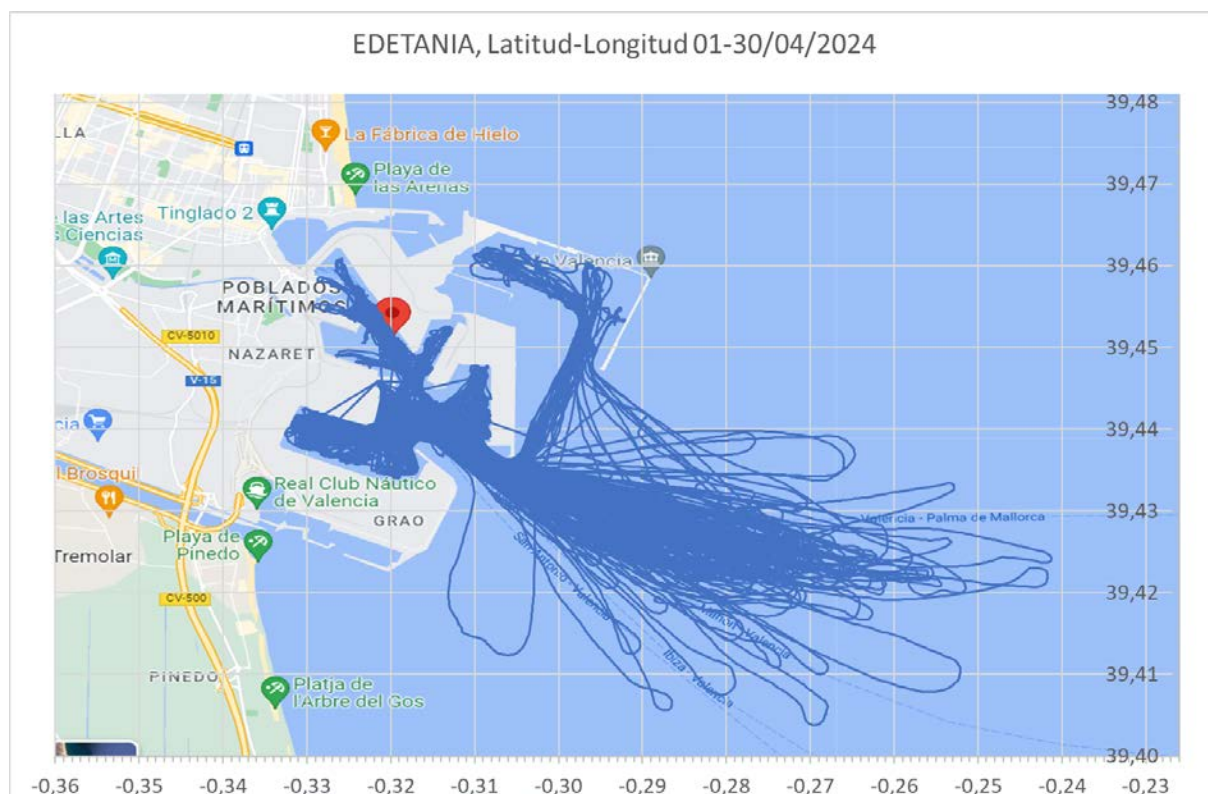


Ilustración 26. Posicionamiento de los recorridos realizados por Edetania sobre un mapa del puerto de Valencia durante el mes de abril de 2022.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

A partir de esta información de los recorridos a lo largo de dicho mes de abril de 2022, se pueden obtener las siguientes tendencias:

- La máxima distancia a la base de las lanchas es del orden de un grado de longitud de paralelo, que a la latitud del puerto de Valencia equivale a unas 4 millas náuticas (7,4 km).
- Una duración típica del servicio de pilotaje, incluyendo el desplazamiento a la posición del barco y el acompañamiento del mismo, incluyendo el amarre o el desamarre, es de una hora.
- Las velocidades máximas que se alcanzan son del orden de 28 nudos.
- El número de servicios por turno de trabajo (8h por día) es típicamente de cinco.

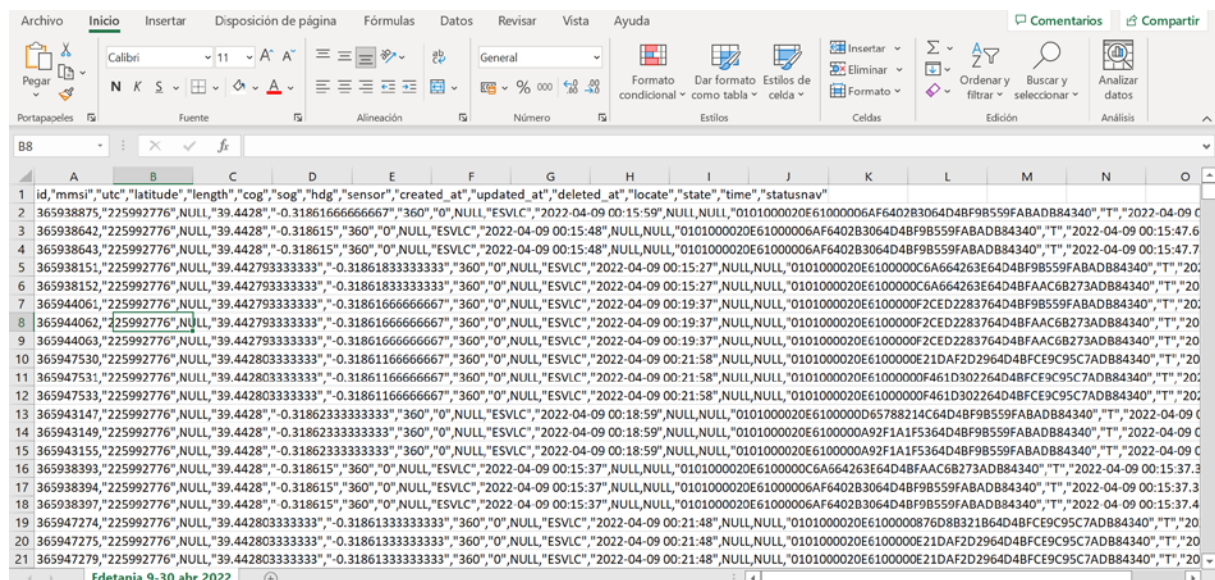
Con esta información de tipo semicuantitativo, se pasó a tratar de forma más cuantitativa los datos de posición suministrados, a fin de obtener distancias recorridas por servicio, velocidades y aceleraciones, como se indica en apartados siguientes.

3.4. Tratamiento de los archivos de datos de posición (definidos por latitud y longitud, con tiempos asociados)

El sistema de sensores GPS que tenía la lancha proporciona la posición de la misma en términos de latitud y la longitud. Esta información se transmite cada aproximadamente 10 segundos, que son los valores registrados en la base de los prácticos.

A partir de la información de la posición, mediante distintas fórmulas que se explican en apartados posteriores, ha sido posible obtener la distancia recorrida, la velocidad y aceleración que experimentaba la lancha durante el servicio.

El fichero que facilitado por los prácticos de Valencia era un fichero .csv tal como el siguiente:



id	mmsi	utc	latitude	length	cog	sog	hdg	sensor	created_at	updated_at	deleted_at	locate	state	time	statusnav
1	365938875	"225992776"	NULL	"39.4428"	"-0.31861666666667"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:15:59"	NULL	NULL	"0101000020E61000006AF6402B3064D4BF9B559FABAD84340"	"T"	"2022-04-09 00:15:59"
2	365938864	"225992776"	NULL	"39.4428"	"-0.318615"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:15:48"	NULL	NULL	"0101000020E61000006AF6402B3064D4BF9B559FABAD84340"	"T"	"2022-04-09 00:15:47.6"
3	365938643	"225992776"	NULL	"39.4428"	"-0.318615"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:15:48"	NULL	NULL	"0101000020E61000006AF6402B3064D4BF9B559FABAD84340"	"T"	"2022-04-09 00:15:47.7"
4	365938151	"225992776"	NULL	"39.442793333333"	"-0.31861833333333"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:15:27"	NULL	NULL	"0101000020E61000006A664263E64D4BF9B559FABAD84340"	"T"	"2022-04-09 00:15:27"
5	365938152	"225992776"	NULL	"39.442793333333"	"-0.31861833333333"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:15:27"	NULL	NULL	"0101000020E61000006A664263E64D4BF9B559FABAD84340"	"T"	"2022-04-09 00:15:27"
6	365944061	"225992776"	NULL	"39.442793333333"	"-0.31861666666667"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:19:37"	NULL	NULL	"0101000020E6100000F2CED2283764D4BF9B559FABAD84340"	"T"	"2022-04-09 00:19:37"
7	365944062	"225992776"	NULL	"39.442793333333"	"-0.31861666666667"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:19:37"	NULL	NULL	"0101000020E6100000F2CED2283764D4BF9B559FABAD84340"	"T"	"2022-04-09 00:19:37"
8	365944063	"225992776"	NULL	"39.442793333333"	"-0.31861666666667"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:19:37"	NULL	NULL	"0101000020E6100000F2CED2283764D4BF9B559FABAD84340"	"T"	"2022-04-09 00:19:37"
9	365947530	"225992776"	NULL	"39.442803333333"	"-0.31861666666667"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:21:58"	NULL	NULL	"0101000020E6100000E21DAF2D2964D4BFCE9C95C7AD84340"	"T"	"2022-04-09 00:21:58"
10	365947531	"225992776"	NULL	"39.442803333333"	"-0.31861666666667"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:21:58"	NULL	NULL	"0101000020E6100000E21DAF2D2964D4BFCE9C95C7AD84340"	"T"	"2022-04-09 00:21:58"
11	365947532	"225992776"	NULL	"39.442803333333"	"-0.31861666666667"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:21:58"	NULL	NULL	"0101000020E6100000E21DAF2D2964D4BFCE9C95C7AD84340"	"T"	"2022-04-09 00:21:58"
12	365947533	"225992776"	NULL	"39.442803333333"	"-0.31861666666667"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:21:58"	NULL	NULL	"0101000020E6100000E21DAF2D2964D4BFCE9C95C7AD84340"	"T"	"2022-04-09 00:21:58"
13	365943147	"225992776"	NULL	"39.4428"	"-0.31862333333333"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:18:59"	NULL	NULL	"0101000020E6100000D65788214C64D4BF9B559FABAD84340"	"T"	"2022-04-09 00:18:59"
14	365943149	"225992776"	NULL	"39.4428"	"-0.31862333333333"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:18:59"	NULL	NULL	"0101000020E6100000A92F1A1F5364D4BF9B559FABAD84340"	"T"	"2022-04-09 00:18:59"
15	365943155	"225992776"	NULL	"39.4428"	"-0.31862333333333"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:18:59"	NULL	NULL	"0101000020E6100000A92F1A1F5364D4BF9B559FABAD84340"	"T"	"2022-04-09 00:18:59"
16	365938393	"225992776"	NULL	"39.4428"	"-0.318615"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:15:37"	NULL	NULL	"0101000020E6100000C6A664263E64D4BF9B559FABAD84340"	"T"	"2022-04-09 00:15:37.3"
17	365938394	"225992776"	NULL	"39.4428"	"-0.318615"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:15:37"	NULL	NULL	"0101000020E6100000C6A664263E64D4BF9B559FABAD84340"	"T"	"2022-04-09 00:15:37.3"
18	365938397	"225992776"	NULL	"39.4428"	"-0.318615"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:15:37"	NULL	NULL	"0101000020E6100000C6A664263E64D4BF9B559FABAD84340"	"T"	"2022-04-09 00:15:37.4"
19	365947274	"225992776"	NULL	"39.442803333333"	"-0.31861333333333"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:21:48"	NULL	NULL	"0101000020E6100000876D8B321B64D4BFCE9C95C7AD84340"	"T"	"2022-04-09 00:21:48"
20	365947275	"225992776"	NULL	"39.442803333333"	"-0.31861333333333"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:21:48"	NULL	NULL	"0101000020E6100000E21DAF2D2964D4BFCE9C95C7AD84340"	"T"	"2022-04-09 00:21:48"
21	365947279	"225992776"	NULL	"39.442803333333"	"-0.31861333333333"	"360"	"0"	NULL	"ESVLC"	"2022-04-09 00:21:48"	NULL	NULL	"0101000020E6100000E21DAF2D2964D4BFCE9C95C7AD84340"	"T"	"2022-04-09 00:21:48"

Ilustración 27. Fichero de registros de posiciones, tiempos y otra información.csv

Para poder trabajar con este fichero .csv y poder extraer la información necesaria, hubo que separarlo en columnas, mediante el siguiente proceso:

- Seleccionar toda la columna A e ir a Datos y pulsar la opción de "texto en columnas".

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

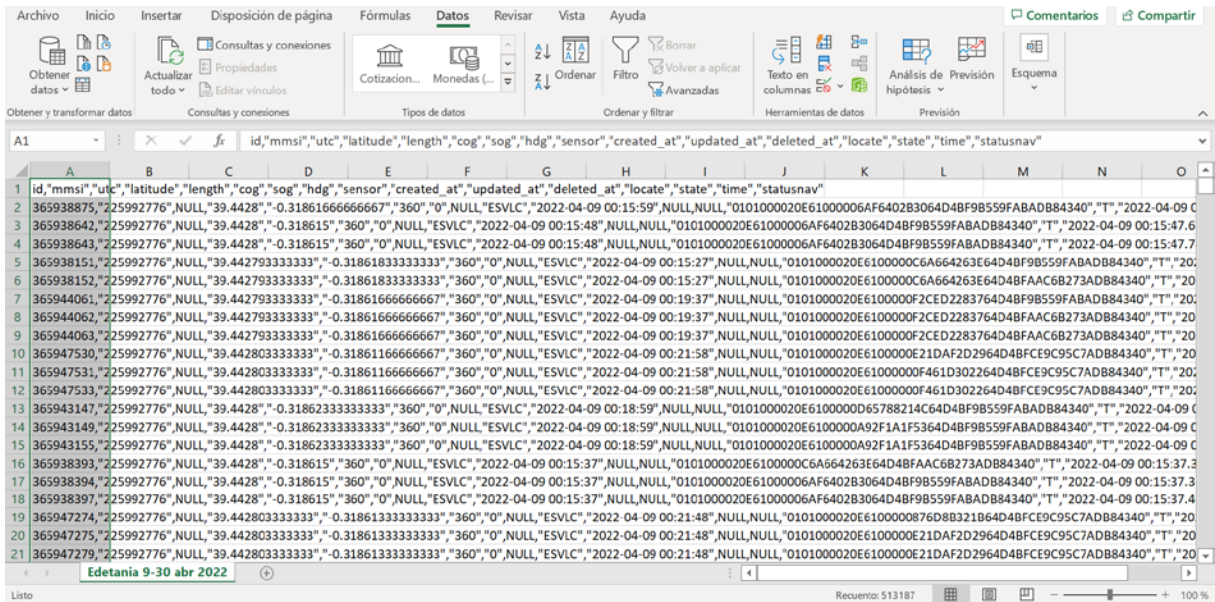


Ilustración 28. Paso uno para la separación de datos en columnas.

- Posteriormente, seleccionar en "texto en columnas" el tipo de separador que debía adoptar, para lo cual se seleccionó comillas dobles (") y la coma (,) y espacio.

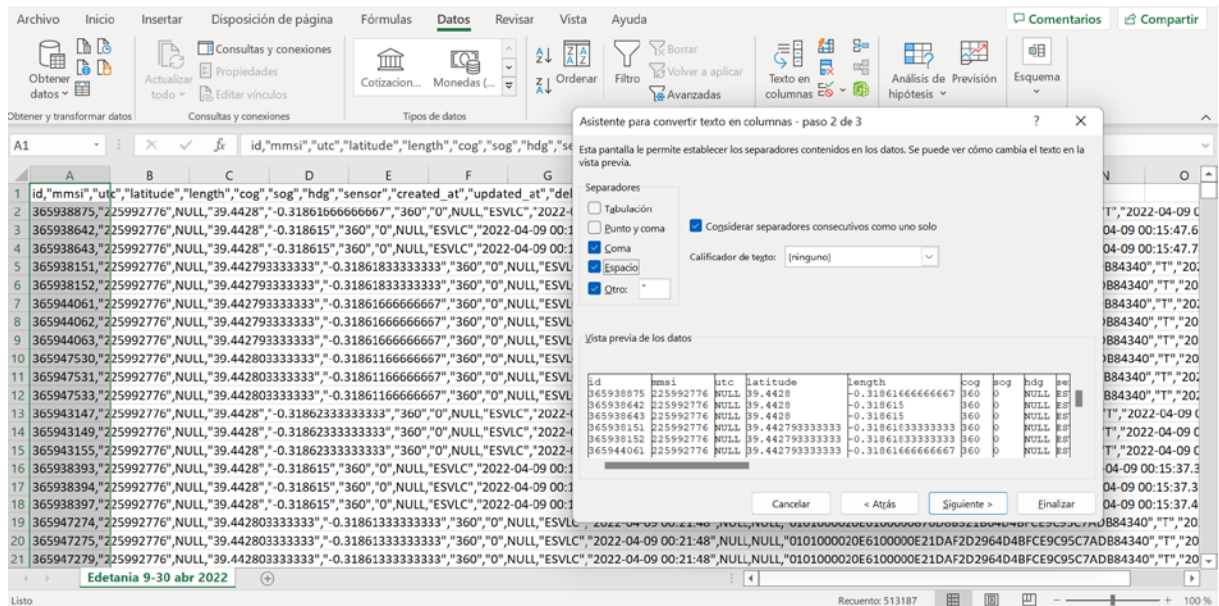


Ilustración 29. Paso dos para la separación de los datos en columnas.

- Y por último se le dio a Siguiente y Finalizar y el fichero quedó ya en forma de columnas separadas, cada una de ellas identificada por un título:

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a data table. The columns are: id, mmsi, utc, latitude, length, cog, sog, hdg, sensor, created_at, updated_at, deleted_at, locate, state, and time. The data rows show vessel tracking information for April 2022, including coordinates, speed, heading, and timestamps.

Ilustración 30. Resultado final de la separación del texto en columnas.

Como se ve, cada fila corresponde a un instante de tiempo, por lo que al considerar toda la información de un mes (abril 2022 en este caso), se llega a más de quinientas mil filas. Además, el tamaño del archivo Excel supera 100 Mb, dificultando su manejo, al dar errores de memoria.

Para cada punto (fila del archivo) se incluye la latitud y la longitud de la posición, la fecha, la hora, con una precisión de milésimas de segundo, un mensaje sobre lo que hacía la embarcación en ese momento (ejemplo: “Under way using engine”), y otros códigos no relevantes.

Purga de diferencia de tiempos.

Una cosa importante es que la separación temporal entre filas del archivo no es constante, sino que depende de la actividad de la embarcación. Así, si esta está parada, la separación temporal puede ser superior a 10 segundos, o incluso 20 segundos o varios minutos (ver Tabla 2), mientras que, si está navegando, la separación temporal es del orden de 2 a 8 segundos (Tabla 3). Esta resolución temporal parecía adecuada para poder calcular la velocidad de forma simple considerando la distancia entre dos posiciones consecutivas y dividiéndola por la diferencia entre los tiempos correspondientes, tal como aparece en la Tabla 3.

Tabla 2. Secuencia de tiempos y posiciones cuando la embarcación está parada.

id	latitude	length	deleted_at	Hora	statusnav	Distancia recorrida (m)	Diferencia tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Velocidad (knt)
349088800	39,44280	-0,318612	NULL	01/04/22 0:00:10,618	Under way using engine				0,00
349088801	39,44280	-0,318612	NULL	01/04/22 0:00:10,621	Under way using engine	0,000000	0,003	0,00	0,00
349088806	39,44280	-0,318612	NULL	01/04/22 0:00:10,706	Under way using engine	0,000000	0,085	0,00	0,00
349089007	39,44281	-0,318612	NULL	01/04/22 0:00:19,558	Under way using engine	0,379741	8,852	0,04	0,08
349089008	39,44281	-0,318612	NULL	01/04/22 0:00:19,560	Under way using engine	0,000000	0,002	0,00	0,00
349089009	39,44281	-0,318612	NULL	01/04/22 0:00:19,632	Under way using engine	0,000000	0,072	0,00	0,00
349089257	39,44281	-0,318610	NULL	01/04/22 0:00:30,256	Under way using engine	0,134259	10,624	0,01	0,02
349089259	39,44281	-0,318610	NULL	01/04/22 0:00:30,258	Under way using engine	0,000000	0,002	0,00	0,00
349089260	39,44281	-0,318610	NULL	01/04/22 0:00:30,333	Under way using engine	0,000000	0,075	0,00	0,00
349089450	39,44281	-0,318615	NULL	01/04/22 0:00:39,923	Under way using engine	0,367683	9,590	0,04	0,07
349089451	39,44281	-0,318615	NULL	01/04/22 0:00:39,925	Under way using engine	0,000000	0,002	0,00	0,00
349089454	39,44281	-0,318615	NULL	01/04/22 0:00:40,007	Under way using engine	0,000000	0,082	0,00	0,00
349089646	39,44281	-0,318618	NULL	01/04/22 0:00:50,513	Under way using engine	0,232543	10,506	0,02	0,04
349089647	39,44281	-0,318618	NULL	01/04/22 0:00:50,514	Under way using engine	0,000000	0,001	0,00	0,00
349089648	39,44281	-0,318618	NULL	01/04/22 0:00:50,585	Under way using engine	0,000000	0,071	0,00	0,00

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

Tabla 3. Secuencia de tiempos y posiciones cuando la embarcación está navegando con una velocidad entre 15 y 18 nudos.

394510405	39,44019	-0,314087	NULL	22/04/22 4:48:11,273	Under way using engine	62,514011	6,790	9,21	17,90
394510406	39,44019	-0,314087	NULL	22/04/22 4:48:11,285	Under way using engine	0,000000	0,012	0,00	0,00
394510410	39,44019	-0,314087	NULL	22/04/22 4:48:11,363	Under way using engine	0,000000	0,078	0,00	0,00
394510453	39,44017	-0,313847	NULL	22/04/22 4:48:13,540	Under way using engine	17,750108	2,177	8,15	15,85
394510454	39,44017	-0,313847	NULL	22/04/22 4:48:13,541	Under way using engine	0,000000	0,001	0,00	0,00
394510455	39,44017	-0,313847	NULL	22/04/22 4:48:13,621	Under way using engine	0,000000	0,080	0,00	0,00
394510593	39,44014	-0,313485	NULL	22/04/22 4:48:16,500	Under way using engine	26,719185	2,879	9,28	18,04
394510594	39,44014	-0,313485	NULL	22/04/22 4:48:16,502	Under way using engine	0,000000	0,002	0,00	0,00
394510595	39,44014	-0,313485	NULL	22/04/22 4:48:16,576	Under way using engine	0,000000	0,074	0,00	0,00
394510754	39,44009	-0,312763	NULL	22/04/22 4:48:22,188	Under way using engine	53,054309	5,612	9,45	18,38
394510755	39,44009	-0,312763	NULL	22/04/22 4:48:22,189	Under way using engine	0,000000	0,001	0,00	0,00
394510759	39,44009	-0,312763	NULL	22/04/22 4:48:22,275	Under way using engine	0,000000	0,086	0,00	0,00

Sin embargo, el cálculo de la velocidad resultó mucho más difícil de lo inicialmente previsto por varias razones:

- La información de la posición de la embarcación se transmite tres veces, con una separación temporal muy pequeña (una primera repetición una milésima después de la señal principal, seguida de una segunda repetición separada unas 80-100 milésimas después). Esto, que podría parecer ventajoso, se traduce en que la misma posición (a veces afectada por el ruido indicado en el punto siguiente) se alcanza en tiempos muy poco separados, dando lugar a errores de velocidad, incrementados al calcular aceleraciones. Además, una de las expresiones empleadas para calcular la distancia recorrida entre puntos proporcionaba un error del estilo de “división por cero” cuando las posiciones de los dos puntos coincidían o incluso si no diferían más de un cierto valor infinitesimal.
- Las posiciones transmitidas, incluso cuando la embarcación tiene una velocidad de desplazamiento apreciable y clara, en ocasiones tienen un ruido que equivale a que la posición retroceda, aun en medio de una secuencia de posiciones con una determinada tendencia. Como ejemplo, se puede indicar que en un recorrido de Oeste a Este, en algún punto puede transmitirse una información de posición que sea (erróneamente) equivalente a suponer que en ese punto la embarcación se mueve de Este a Oeste, para retomar la tendencia uniforme en los puntos siguientes. Si se calculan las velocidades de forma directa con esos puntos, el resultado es que la velocidad cambio de módulo o incluso de signo bruscamente, y las aceleraciones asociadas son todavía más erróneas.
- La información redundante para cada posición, siendo en principio interesante, implica que el archivo de datos Excel tiene el triple de filas de las necesarias, incrementando su tamaño de forma considerable.

Por esas razones, durante el tratamiento de los datos del Excel, hubo que realizar una purga de datos con respecto a la diferencia de tiempos, eliminando los puntos para los que diferencia de tiempos respecto al anterior era inferior a un segundo. Como se ha indicado, esto falseaba los cálculos tanto de las velocidades como de las aceleraciones.

Cabe destacar que este proceso no se hizo de forma automática sino manualmente con el Excel de la forma siguiente:

1. Se añadió una columna a la derecha de la diferencia de tiempos donde puse un condicional para discriminar los valores que son inferior a un segundo, de modo que cuando la diferencia de tiempo fuese inferior a un segundo, dejase en blanco la celda. Además, se insertó una columna a la izquierda de la de ID con una secuencia de números.
2. Luego se seleccionaron las celdas que estaban vacías de esa misma columna y se insertó una columna a la izquierda de la de ID con una secuencia de números.
3. Luego se eliminaron las filas que habían salido en blanco en dicho condicional.
4. Por último, se ordenaron de menor a mayor el Excel por la columna de al lado de ID, donde estaba la secuencia numérica que posteriormente se eliminó.
5. Y al final el Excel se quedó ordenado como estaba antes, pero sin la diferencia de tiempos inferior a un segundo.

3.5. Métodos para el cálculo de la distancia recorrida en cada intervalo de tiempo.

Una vez depurado el archivo de posición latitud-longitud para cada tiempo, se pasó a calcular la distancia recorrida entre cada dos puntos, lo que se ha hecho por tres diferentes métodos, los cuales se explican a continuación:

1. Cálculo de la distancia recorrida por la expresión del **teorema del coseno** en geometría esférica.
2. Cálculo de la distancia recorrida por la expresión del **semiseno**.
3. Cálculo de la distancia recorrida suponiendo **geometría plana**.

La expresión del **teorema del coseno** es la primera que se empleó, pero dio una serie de problemas como:

- Error en Excel del tipo #NUM! cuando las coordenadas de dos puntos seguidos eran las mismas. Este error es más atribuible al excesivo tamaño del archivo Excel, que a que la expresión dé error, ya que se probó en un archivo correspondiente a las posiciones de sólo un día, sin que aparecieran problemas.
- Como consecuencia se arrastraba un error que se iba acumulando sucesivamente.

La segunda expresión para el cálculo de las distancias es en realidad una alternativa al teorema del coseno expresada con otras funciones trigonométricas (**semiseno**), con la ventaja de que no dio errores numéricos cuando las posiciones son coincidentes.

Finalmente, debido a que las distancias recorridas son pequeñas, la hipótesis para calcular la distancia recorrida por **geometría plana local es razonable** y proporcional resultados prácticamente coincidentes. Si las distancias recorridas entre dos puntos fueran mayores, no se podría haber utilizado este método. Cabe recordar también que el archivo Excel con los datos de posición ya depurados tenía cerca de doscientas mil filas y ocupaba una memoria de casi 180 MB. El método de la geometría plana lo hace más manejable a la hora de realizar cálculos con él y no da valores erróneos.

3.5.1. Cálculo de la distancia recorrida por la expresión del teorema del coseno en geometría esférica.

La distancia recorrida (km) se calcula por el teorema del coseno en geometría esférica, aplicando la siguiente expresión:

$$Drec = Rt \cdot \text{Arcos} \left(\cos \left(\frac{\pi}{2} - Lat1 \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} - Lat2 \right) + \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} - Lat1 \right) \cdot \text{sen} \left(\frac{\pi}{2} - Lat2 \right) \cdot \cos (Lon1 - Lon2) \right)$$

Ecuación 1.

Los valores angulares de las latitudes y longitudes se tienen que introducir en radianes, por tanto, las abreviaturas significan lo siguiente:

- Lat1: latitud del punto 1.
- Lat2: latitud del punto 2.
- Lon1: longitud del punto 1.
- Lon2: longitud del punto 2.
- Rt: radio terrestre (Rt=6.371km)
- Drec: distancia entre los puntos 1 y 2.

3.5.2. Cálculo de la distancia recorrida por la expresión del semiseno.

Esta expresión es en realidad equivalente a la anterior, pero expresada en función del denominado semiseno, que es el seno al cuadrado del ángulo mitad. Al expresar la distancia usando dicho semiseno no se producían errores cuando las coordenadas de los dos puntos eran muy parecidas o incluso coincidentes (distancia cero entre los mismos).

La distancia recorrida (km) se calcula siguiendo los siguientes pasos:

1. $a = \sin^2 \left(\frac{\Delta \text{lat}}{2} \right) + \cos (\text{Lat}1) \cdot \cos (\text{Lat}2) \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta \text{long}}{2} \right)$
2. $c = 2 \cdot \arctan \left(\frac{\sqrt{a}}{\sqrt{1-a}} \right)$
3. $Drec = Rt \cdot c$

Ecuación 2.

Donde las abreviaturas significan lo siguiente:

- Lat1: latitud del punto 1.
- Lat2: latitud del punto 2.
- Lon1: longitud del punto 1.
- Lon2: longitud del punto 2.
- Drec: distancia entre los puntos 1 y 2.
- Δlat : diferencia entre la latitud del punto 1 y la latitud del punto 2.
- Δlong : diferencia entre la longitud del punto 1 y la longitud del punto 2.
- Rt: radio terrestre (Rt=6.371 km)

3.5.3. Cálculo de la distancia recorrida suponiendo geometría plana.

La fórmula empleada para el cálculo de la distancia (km) en este apartado es la siguiente

$$Drec = Rt \cdot \sqrt{(\text{Lat}1 - \text{Lat}2)^2 + \left\{ (\text{Lon}1 - \text{Lon}2) \cdot \cos \left(\frac{(\text{Lat}1 + \text{Lat}2)}{2} \right) \right\}^2}$$

Ecuación 3.

Donde las abreviaturas significan lo siguiente:

- Rt: Radio terrestre (Rt=6.371 km).
- Lat1: Latitud del punto 1.
- Lat2: Latitud del punto 2.
- Lon1: Longitud del punto 1.
- Lon2: Longitud del punto 2.

Hay que indicar que en esta expresión, la distancia se calcula a partir de la diferencia de latitudes, y de la diferencia de longitudes de los dos puntos, pero esta última se corrige con la latitud media de los mismos, ya que la conversión de longitud de meridiano a distancia depende de la latitud.

3.5.4. Resultados de los recorridos medios diarios.

En la figura siguiente se han representado a modo de ejemplo los recorridos acumulados de la lancha EDETANIA en los primeros cinco días del mes de abril de 2022

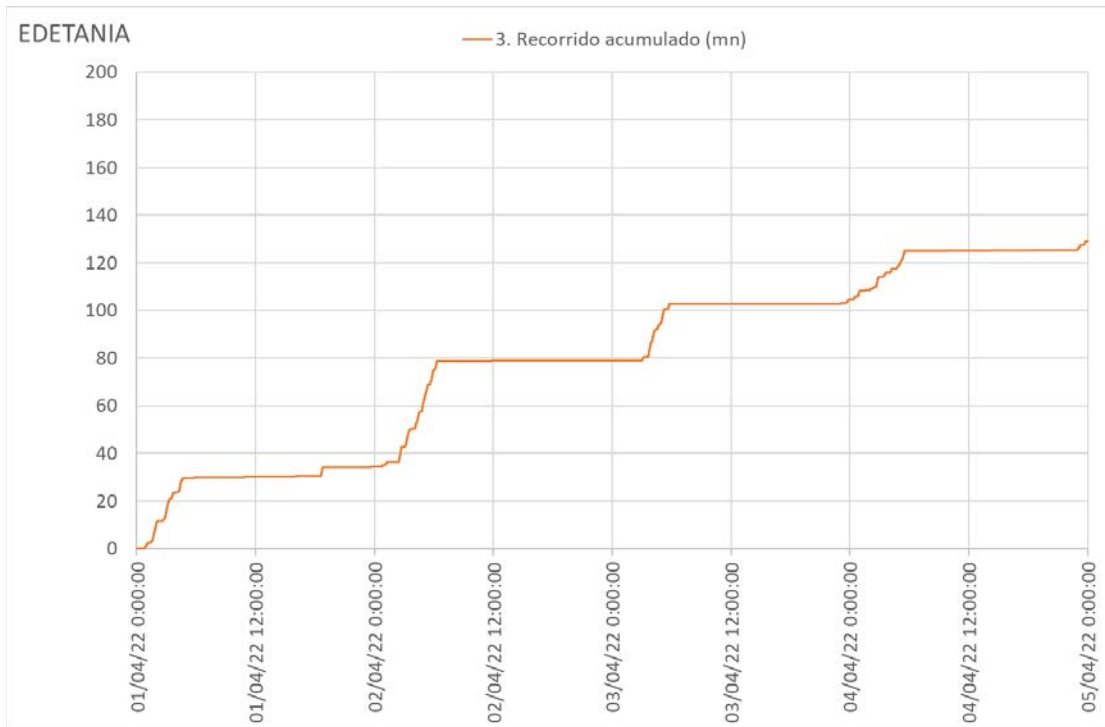


Ilustración 31. Recorrido medio acumulado por Edetania desde el día 1 al 5 de abril de 2022.

Como se observa, la embarcación recorre entre 30 y 40 millas náuticas por día.

Análogamente, al considerar todo el mes de abril de 2022, se obtiene el recorrido acumulado en millas náuticas siguiente:

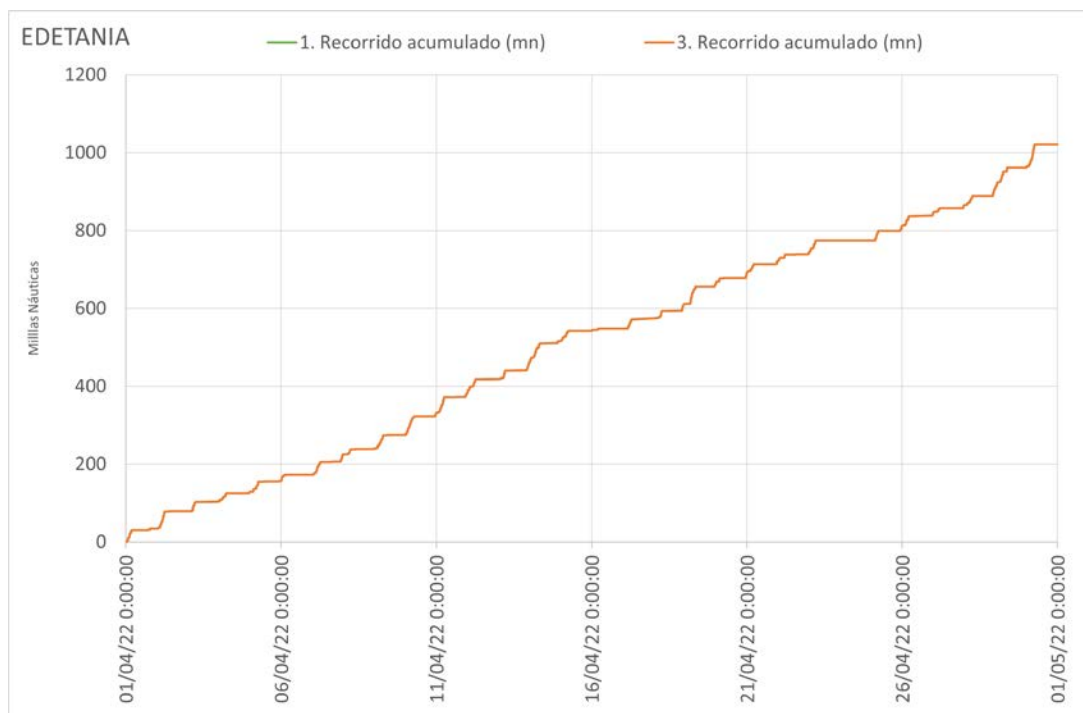


Ilustración 32. Recorrido acumulado por Edetania durante el mes de abril de 2022.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

Al dividir las 1050 millas recorridas en el mes de abril entre 30 días, sale aproximadamente 35 millas náuticas recorridas por día, lo que corrobora el resultado anteriormente indicado, en el cual se afirma que la lancha recorre entre 30 y 40 millas por día.

3.6. Métodos para el cálculo de las velocidades.

La velocidad entre dos puntos consecutivos definidos por sus tiempos y posiciones respectivas en un principio se puede calcular a partir de la distancia recorrida y la diferencia de tiempos entre los dos puntos:

$$Velocidad = \frac{Distancia\ recorrida}{\Delta tiempo}$$

Ecuación 4

Las velocidades se calculan en m/s, ya que la distancia recorrida se expresa en metros y la diferencia de tiempos en segundos. Posteriormente se aplica un cambio de unidades para expresarlo en **nudos** (knots, knt, en inglés), sabiendo que:

$$1 \frac{m}{s} = 1,9438 \text{ knt}$$

Para aplicar la expresión de la velocidad entre cada dos puntos, la distancia recorrida se calculó inicialmente a partir de los tres posibles valores de la distancia recorrida entre ellos, calculados con las opciones: **1. Teorema del coseno**, **2. Expresión del semiseneno**, y **3. Geometría plana**.

Como aclaración importante, hay que decir que los tres métodos para calcular la diferencia de las posiciones entre dos puntos cualesquiera proporcionan la distancia recorrida como valor escalar, sin tener en cuenta la distancia como vector. En consecuencia, la velocidad calculada es también un valor escalar, no vectorial.

A continuación, en la Ilustración 33 se pueden observar los resultados de las velocidades obtenidas con los tres métodos indicados, aplicados a una parte del archivo de posiciones, previamente depurados los datos.

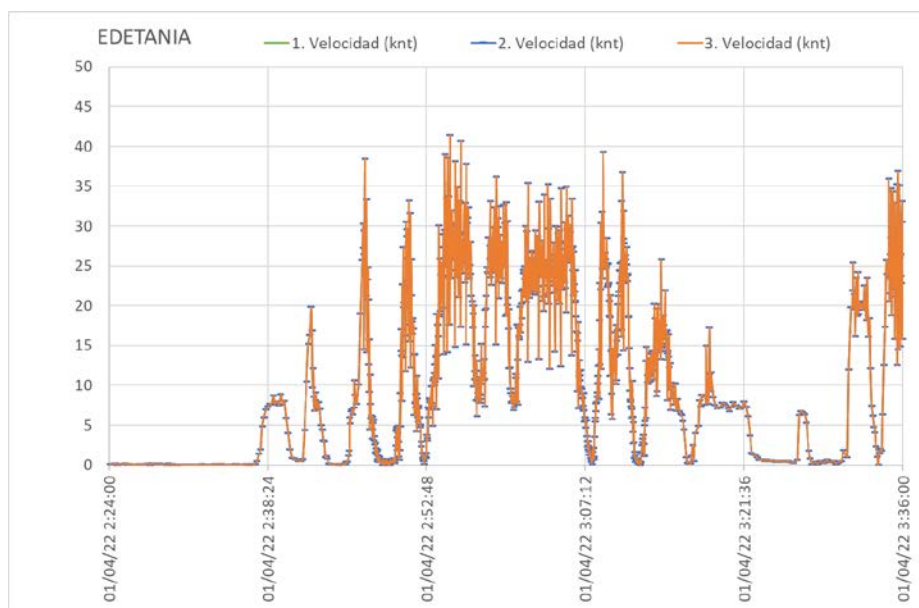


Ilustración 33. Cálculo de velocidades de la embarcación Edetania entre las 2:30 am y 3:40 am del 1 de abril de 2022.

Como se puede ver, las velocidades calculadas a partir de las tres formas de calcular los recorridos entre puntos son totalmente equivalentes. Por ello, se decidió considerar para lo

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

que sigue sólo **los recorridos calculados con el método de la geometría plana** (numerado como 3). Como ejemplo, la Ilustración 34 muestra un rango de tiempos más largo (entre las 0h y las 6h del 26 de abril de 2022) y la posterior Ilustración 35 muestra un intervalo de tiempo más pequeño.

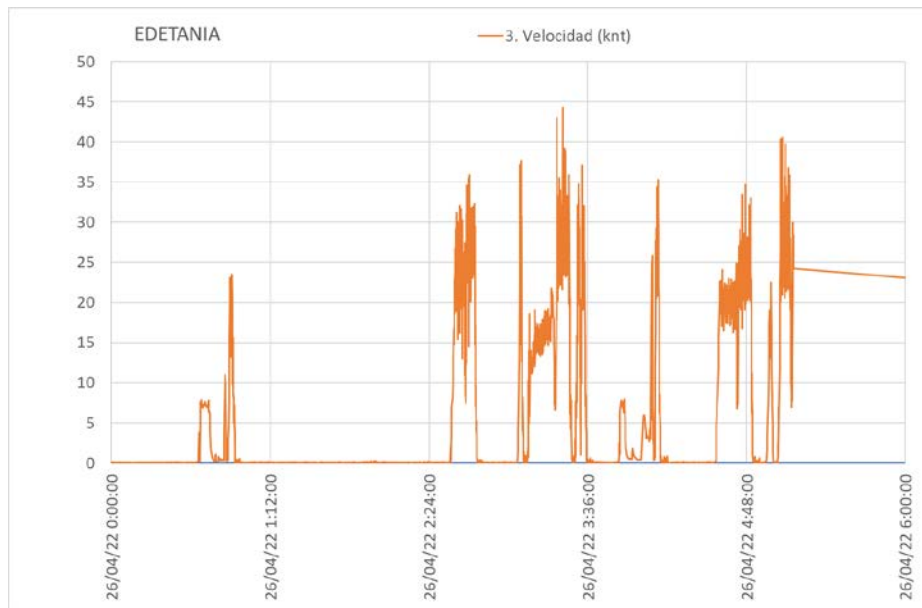


Ilustración 34. Cálculo de velocidades para las posiciones entre las 0:00 am y 6:00 am del 01/04/2022

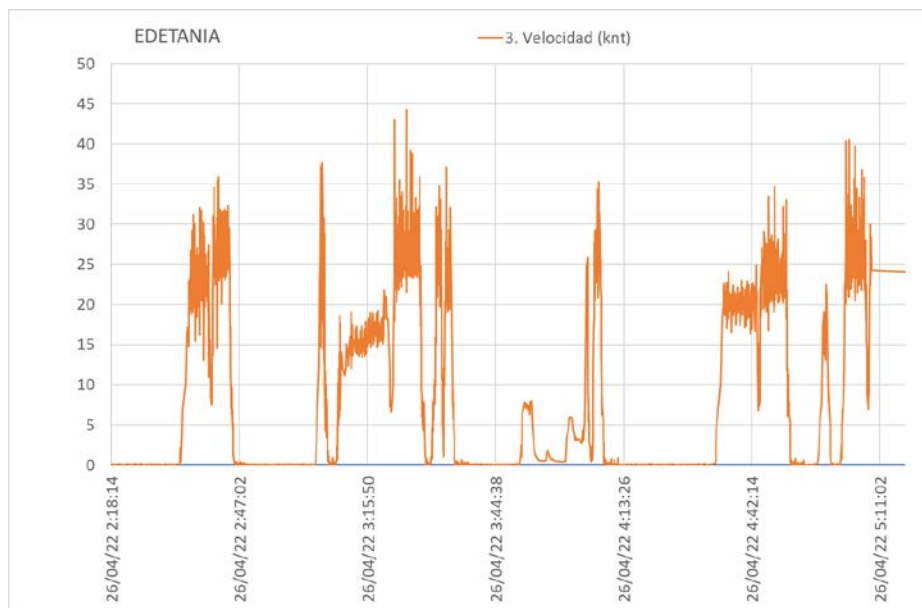


Ilustración 35. Cálculo de velocidades para las posiciones entre las 2:20 am y 5:15 am del 01/04/2022

Sin embargo, al observar los resultados de los cálculos de la velocidad con las posiciones y los tiempos de dos puntos consecutivos, se constata que algunos valores de las velocidades son muy altos, por encima de 30 nudos, los que supera ampliamente el valor que por construcción puede tener la embarcación (28 a 30 nudos). Esto, además de ser incorrecto, supondría que las aceleraciones, obtenidas como derivadas temporales de dichos valores, fueran también incorrectas por exceso.

Por ello, se decidió probar expresiones alternativas para calcular la velocidad, suavizando el valor obtenido, con el fin de que las velocidades adoptaran valores más razonables.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

Es importante indicar que, en lo que viene a continuación, las distintas alternativas para calcular la velocidad se aplican considerando que las **distancias entre los puntos consecutivos** de interés se calculan **siempre usando la expresión de la geometría plana**, descartando los otros dos métodos por no aportar ninguna ventaja sobre el más simple.

Se emplearon los siguientes métodos a fin de suavizar los valores del cálculo de la velocidad, usando más de un intervalo entre dos puntos para ello. En primer lugar, tres puntos, definidos por sus posiciones P_1 , P_2 y P_3 , dando lugar a dos intervalos de distancia y de tiempo. En segundo lugar, cuatro puntos, definidos por P_1 , P_2 , P_3 y P_4 , con tres intervalos de distancia y de tiempo.

- Velocidad calculada directamente para un intervalo (dos puntos consecutivos).

$$V_{1-2} = \frac{P_2 - P_1}{T_2 - T_1}$$

Ecuación 5.

- Velocidad calculada como media entre las velocidades de dos intervalos (tres puntos).

$$\bar{V}_{1-3} = \frac{1}{2} (V_{1-2} + V_{2-3}) = \frac{1}{2} \left[\frac{P_2 - P_1}{T_2 - T_1} + \frac{P_3 - P_2}{T_3 - T_2} \right]$$

Ecuación 6.

- Velocidad calculada como media entre las velocidades de tres intervalos (cuatro puntos).

$$\bar{V}_{1-4} = \frac{1}{3} (V_{1-2} + V_{2-3} + V_{3-4}) = \frac{1}{3} \left[\frac{P_2 - P_1}{T_2 - T_1} + \frac{P_3 - P_2}{T_3 - T_2} + \frac{P_4 - P_3}{T_4 - T_3} \right]$$

Ecuación 7.

Para poder observar la diferencia entre los tres métodos del cálculo de la velocidad, se muestran estas gráficas de comparación dos a dos: 1 y 3 (Ilustración 36), 2 y 3 (Ilustración 37) y 1 y 3 (Ilustración 38):

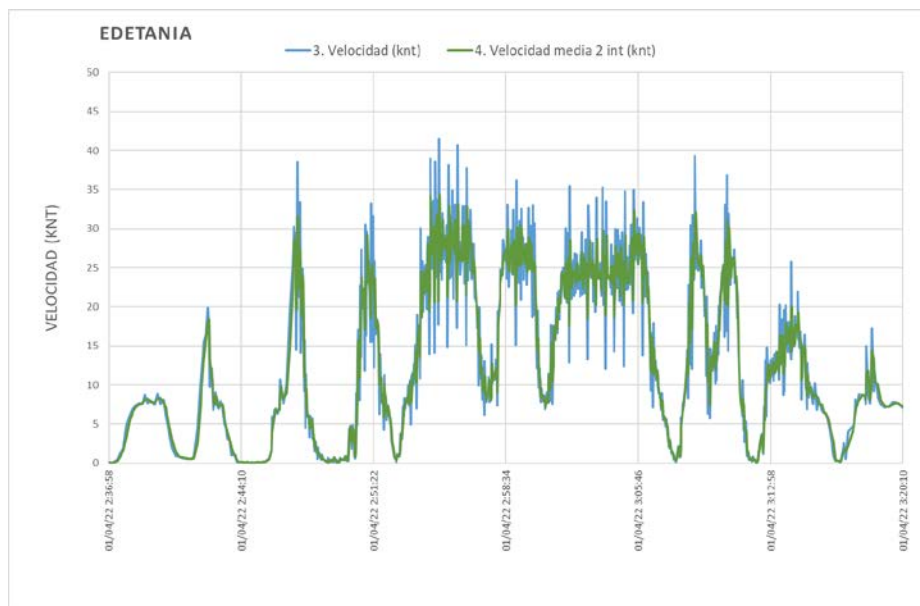


Ilustración 36. Comparación entre los métodos de cálculo de la velocidad con uno y dos intervalos.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

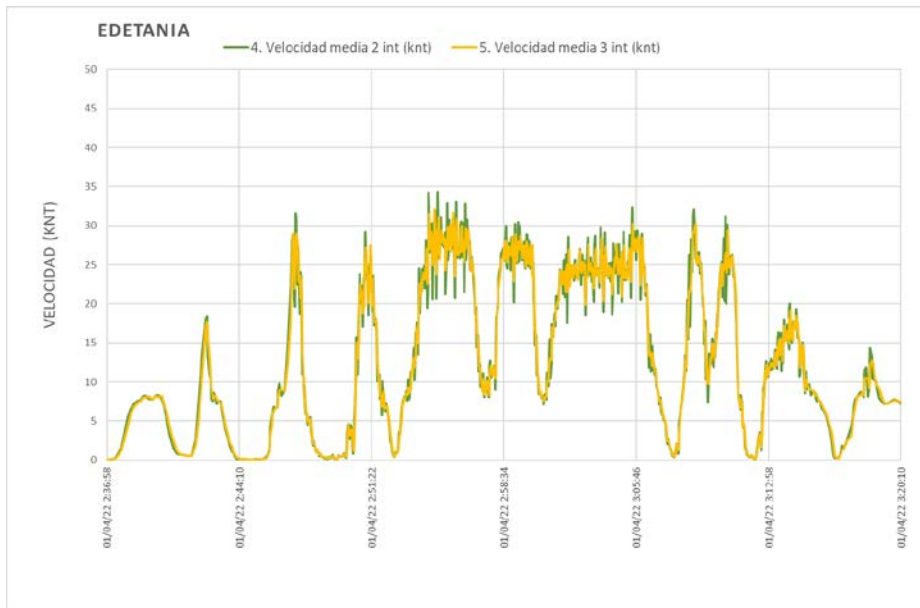


Ilustración 37. Comparación entre los métodos de cálculo de la velocidad con dos y tres intervalos.

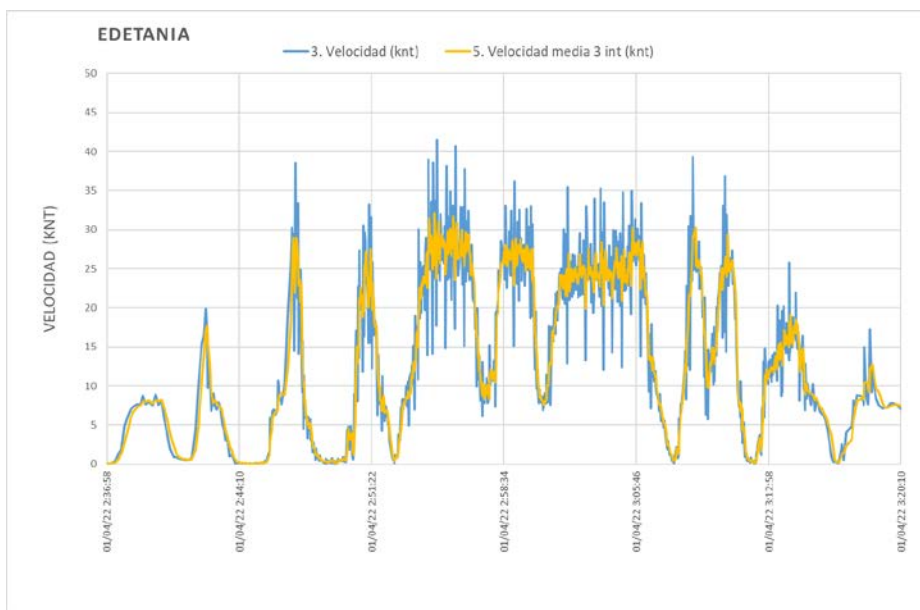


Ilustración 38. Comparación entre los métodos de cálculo de la velocidad con uno y tres intervalos.

Como se puede apreciar, los picos de velocidad con el **método dos** (dos intervalos, tres puntos) y sobre todo con **el método tres** (tres intervalos, cuatro puntos) se reducen sustancialmente para llegar a valores que, si bien superan puntualmente el máximo de 30 nudos, se consideran aceptables.

3.7. Métodos para el cálculo de las aceleraciones.

Una vez se tienen los valores de la velocidad filtrada por el método tres como se ha dicho anteriormente, se pasa a calcular las aceleraciones.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

Las aceleraciones se calculan a partir de la diferencia de velocidades en un intervalo de distancia caracterizado por un intervalo de tiempos, dando un resultado directo en $\frac{m}{s^2}$, debido a que la velocidad se expresó en $\frac{m}{s}$, y se dividió por la diferencia de tiempos en segundos.

$$Aceleracion = \frac{Velocidad}{\Delta t}$$

Ecuación 8.

Alternativamente, para tener una estimación más intuitiva de las aceleraciones calculadas, éstas se pueden expresar como el aumento (o disminución) de la velocidad de la embarcación en nudos cada segundo:

$$[Aceleración] = \frac{[knt]}{[s]}$$

Ecuación 9.

De forma simbólica, independientemente de las unidades de cálculo, la aceleración entre dos puntos i y j, cada uno con su correspondiente velocidad y tiempo, se puede expresar como:

$$a_{i-j} = \frac{V_j - V_i}{T_j - T_i}$$

Ecuación 10.

Como se ha visto en el apartado anterior, se han considerado tres alternativas para calcular la velocidad de la embarcación. Estas tres alternativas conducen a valores ligeramente distintos de las aceleraciones.

Considerando la **primera opción para el cálculo de las velocidades**, es decir, directamente a partir de la diferencia de posiciones dividida por la diferencia de tiempos (Ecuación 5), a continuación, se muestra una gráfica de las aceleraciones durante un servicio calculada a partir de los valores de la velocidad.

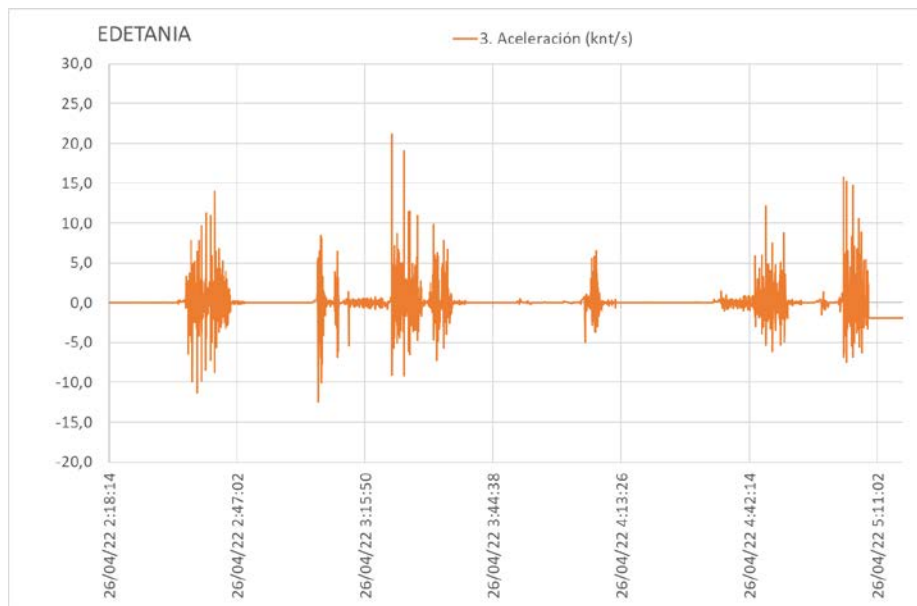


Ilustración 39. Valores de aceleraciones de la embarcación durante el día 26/04/2022.

Como puede observarse, al calcular las aceleraciones aplicando la Ecuación 10. con los valores de la velocidad calculados con la Ecuación 5, los valores de la aceleración resultan anormalmente altos (ejemplo, aceleración de 20 nudos por segundo).

Usando la **segunda opción para el cálculo de la velocidad** (Ecuación 6.), es decir, considerando el promedio de dos intervalos de posición, se obtienen valores de la aceleración menos extremos. La diferencia con respecto al método de la velocidad directa puede verse

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

en la Ilustración 40. Resulta evidente que, al promediar la velocidad con dos intervalos, los valores de las aceleraciones máximas (y mínimas, por los valores negativos) son más reducidos y a priori más razonables.

Usando la **tercera opción para el cálculo de la velocidad** (Ecuación 7.), es decir, considerando el promedio de tres intervalos de posición, los valores máximos de la aceleración se reducen aún más.

En las gráficas correspondientes a la Ilustración 40, Ilustración 41 e Ilustración 42, se pueden ver las diferencias entre los resultados de las aceleraciones calculados a partir de las velocidades obtenidas con los tres métodos elegidos.

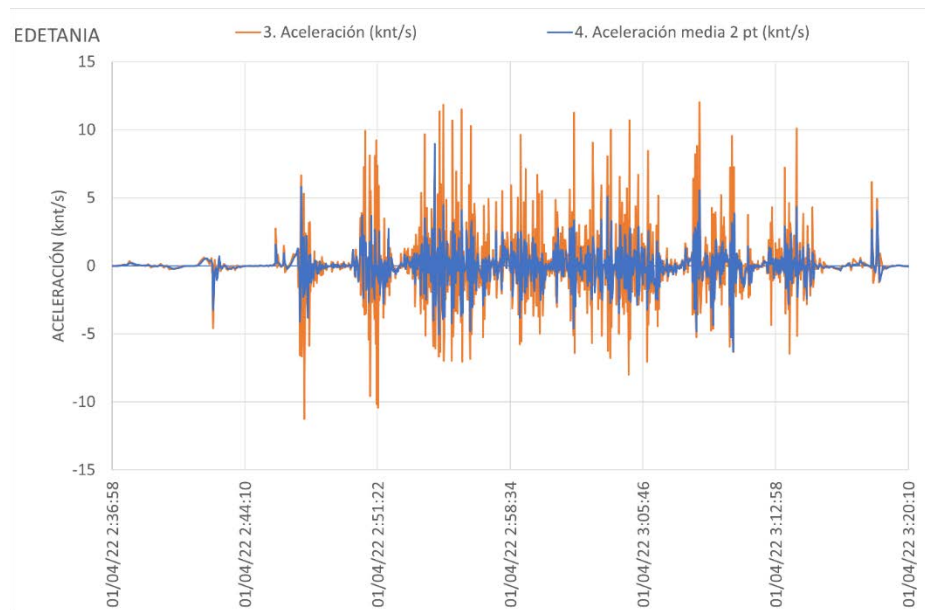


Ilustración 40. Comparativa entre los valores de las aceleraciones calculados a partir de las velocidades directas y las velocidades medias de dos intervalos.

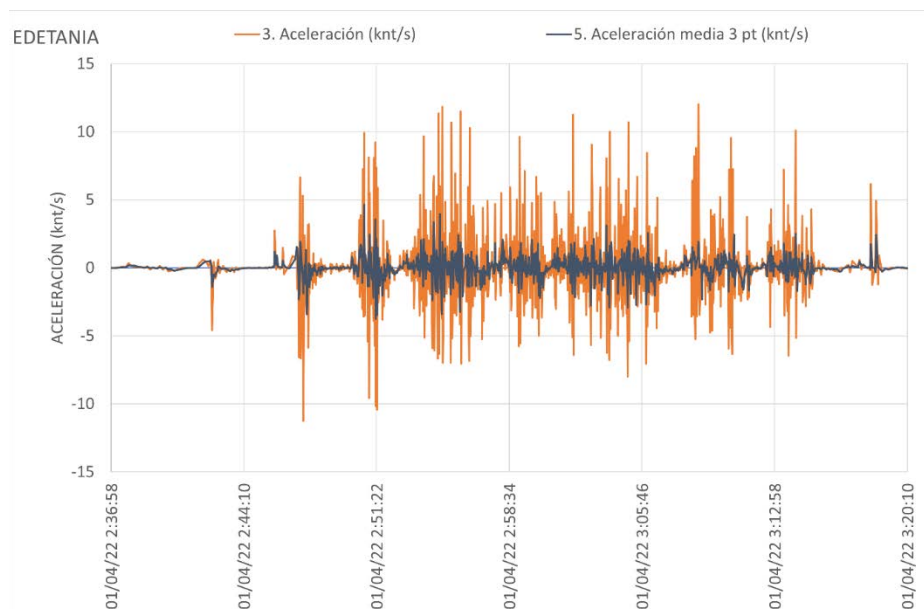


Ilustración 41. Comparativa entre los valores de las aceleraciones calculados a partir de las velocidades directas y las velocidades medias de tres intervalos.

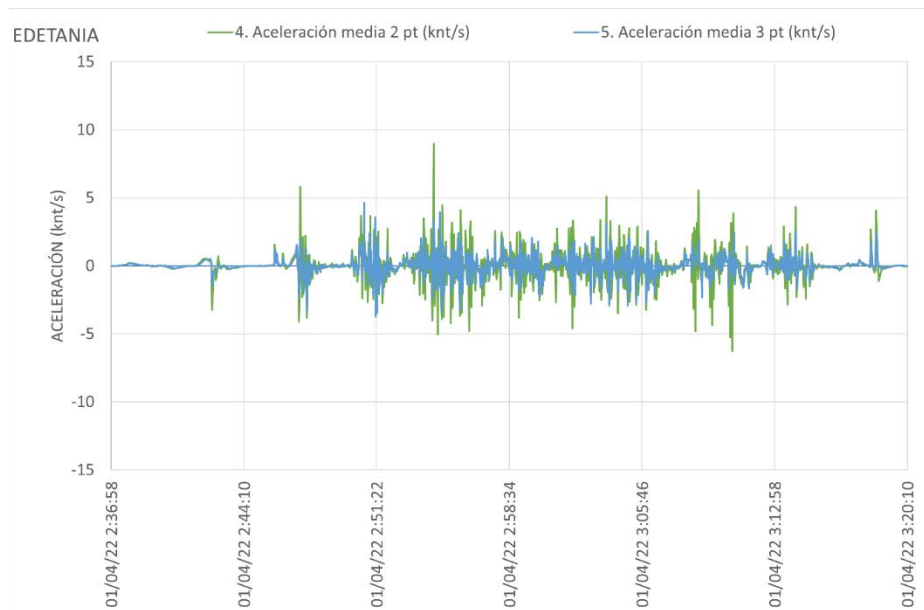


Ilustración 42. Comparativa entre los valores de las aceleraciones calculados a partir de las velocidades medias de dos intervalos y de tres intervalos.

A la vista de estos resultados, se considera que el método tres es con el que se obtienen los valores más razonables de las aceleraciones, y por tanto es el que se ha escogido para el cálculo de la velocidad (promedio de tres intervalos).

3.8. Resumen de los métodos de cálculo de la distancia recorrida, la velocidad y la aceleración de la embarcación.

Partiendo del archivo de posiciones (latitud-longitud) de la embarcación y los respectivos tiempos, tras el estudio realizado para obtener los valores correctos con distintos métodos, estos se resumen a continuación:

Respecto de las **distancias recorridas entre cada dos posiciones**, después de eliminar los puntos de información redundante (dos líneas de datos de cada tres), la distancia recorrida se calcula a partir de la expresión de distancia considerando geometría plana. Esto equivale a decir que la distancia norte-sur depende de la diferencia de latitudes y que la distancia este-oeste depende de la diferencia de longitudes, corregida con el coseno de la latitud media, tal como establece la Ecuación 3.

En cuanto a las **velocidades**, se consideran en lo que sigue las **velocidades calculadas con el método tres**, considerando la media de tres intervalos de puntos de posición de la embarcación (Ecuación 7). Hay que hacer la precisión de que hay tres casos particulares en la secuencia de posiciones de la embarcación:

- Punto 1, no se puede calcular la velocidad.

Punto 2, se calcula la velocidad con la expresión más simple $(V_{1-2} = \frac{P_2-P_1}{T_2-T_1})$

- Ecuación 5)
- Punto 3, se calcula la velocidad con la media de dos intervalos (Ecuación 6)
- Punto 4 y sucesivos, se calcula la velocidad con la media de tres intervalos (Ecuación 7)

En cuanto a las **aceleraciones**, se calculan con la misma expresión general, es decir como la diferencia de velocidades de dos puntos dividida por la diferencia de los respectivos tiempos, de acuerdo con la [Ecuación 10](#). Las velocidades empleadas en general son las calculadas como media de tres intervalos de tiempo, con los tres casos particulares en la secuencia de posiciones de la embarcación siguientes:

- Punto 1, no se puede calcular la velocidad y en consecuencia tampoco la aceleración.
- Punto 2, se puede calcular la velocidad, pero no la aceleración (se requiere al menos otro punto)
- Punto 3, se calcula la velocidad con la media de dos intervalos y se puede calcular la aceleración, que se imputa al punto 3.
- Punto 4 y sucesivos, se calcula la velocidad con la media de tres intervalos y se puede calcular la aceleración, que se imputa al punto 4.

3.9. Características cuantitativas típicas de un servicio de pilotaje.

A continuación, se explicarán las características cinemáticas y mecánicas calculadas a partir de los datos suministrados por los prácticos de Valencia durante el día 1 de abril de 2022, entre las 2:36 am y 3:20 am, los cuales corresponden a un servicio típico de practicaaje.

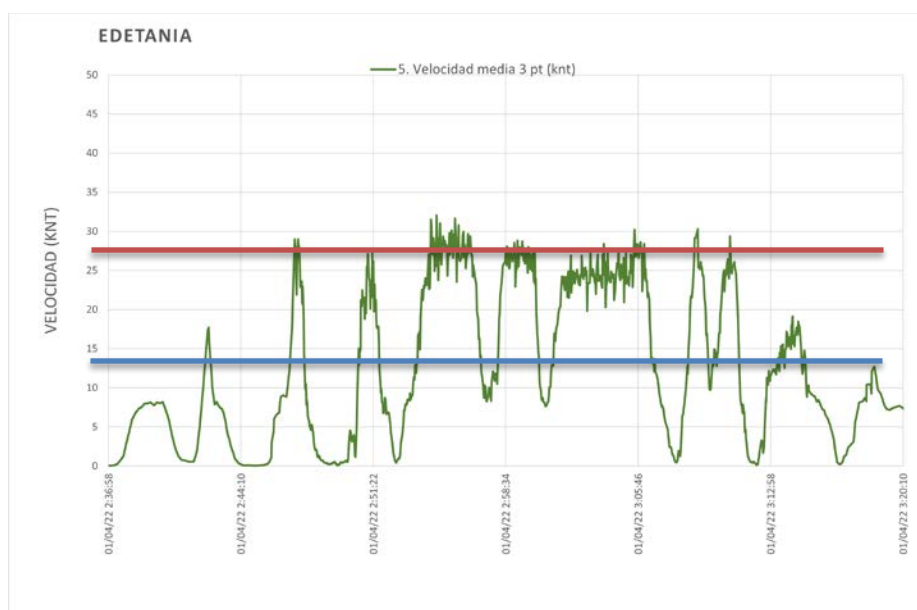


Ilustración 43. Velocidades de la embarcación durante un servicio de pilotaje entre las 2:36 am y 3:20 am del día 1 de abril de 2022.

La línea azul muestra la velocidad promedio obtenida durante este servicio de practicaaje (14,7 nudos), mientras que la línea roja muestra la velocidad máxima que de forma continuada puede mantener la embarcación (28 knt) si bien puntualmente puede llegar a 30 knt.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

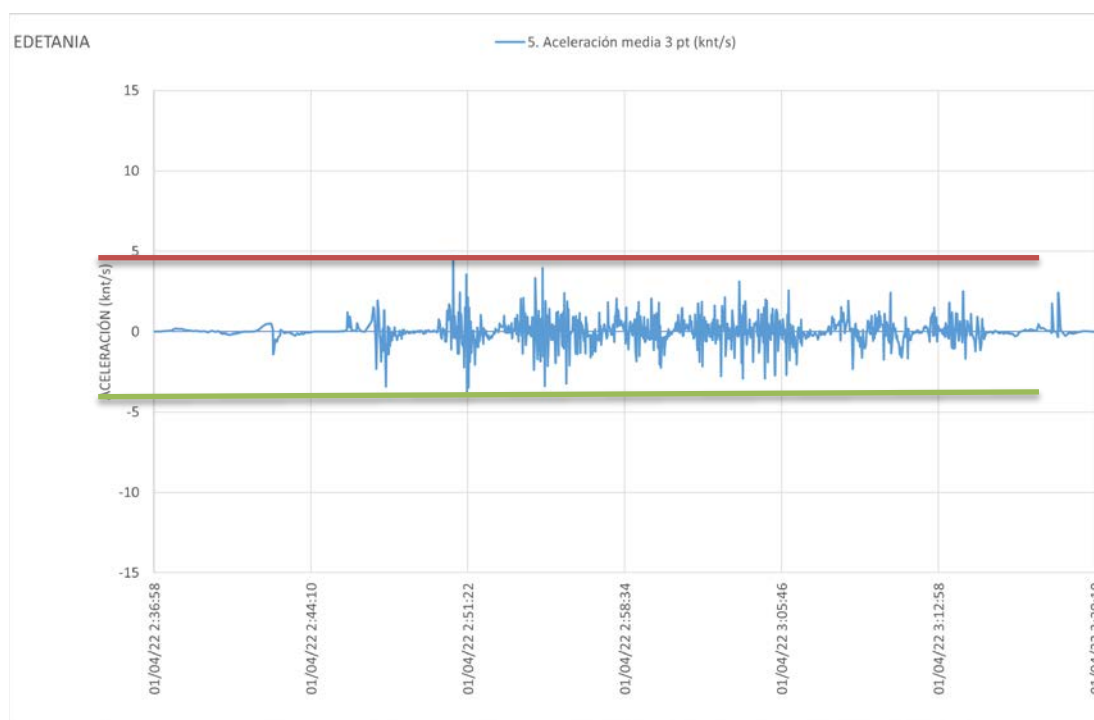


Ilustración 44. Aceleraciones calculadas durante las 2:36 am y 3:20 am durante el día 1 de abril de 2022

Las líneas roja y verde muestran las aceleraciones máximas y mínimas obtenidas durante este servicio de pilotaje.

Se han calculado la velocidad media, máxima y mínima, así como de la aceleración. También se ha determinado que la duración de este servicio ha sido de 44 minutos en navegación, valor dentro del estimado de una hora para cada servicio.

Tabla 4. Velocidades y aceleraciones medias, máximas y mínimas

	Máxima	Mínima	Media
Velocidad (knt)	28,0	0	14,7
Aceleración(knt/s)	4,63	-3,64	0,01

4. VARIABLES NECESARIAS PARA LA EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DE PROPULSIÓN PARA LAS LANCHAS DE PRÁCTICOS.

En este capítulo se van a mostrar las variables a tener en cuenta en la valoración de las distintas alternativas de propulsión que influyen directamente en las prestaciones de la embarcación y en la selección de unas alternativas u otras, como por ejemplo la estimación de la potencia de propulsión, consumos de energía primaria, las masas y volúmenes específicos, emisiones y costes.

4.1. Estimación de la potencia para impulsar la embarcación.

Por lo que respecta a las curvas de potencia, no se disponía de datos sobre la potencia que entregaba el motor a una determinada velocidad, por ello para poder estimarla se ha hecho uso de las siguientes alternativas, basadas en diversas expresiones y normas.

- **Fórmula de Mau (Alvariño).**

Esta fórmula, originalmente de Mau, se cita en el libro de (Alvariño, 1997) y se utiliza para estimar la potencia en la hélice de una embarcación en función de la velocidad y el peso muerto total, pudiendo aplicarse a barcos de hasta 15.000 toneladas de peso muerto (TPM). En este valor de peso muerto se incluye el peso de la embarcación, así como de la carga, combustible, agua, víveres, lubricantes, efectos de consumo y tripulación.

Con esta fórmula se consigue una aproximación de la potencia necesaria, tanto a plena potencia (máxima velocidad y peso muerto), como para condiciones intermedias.

La fórmula original propuesta por Mau se ha modificado para dar la potencia en kW de la siguiente forma:

$$PB(kW) = 0.00839 \cdot V^3 \cdot WPM^{0,55}$$

Ecuación 11.

Donde cada variable significa lo siguiente:

- PB: potencia necesaria en la hélice suministrada por el motor de propulsión en kilovatios (kW).
- V: velocidad en nudos.
- WPM: desplazamiento en toneladas del agua del buque.

Con respecto al desplazamiento de agua del buque, por el principio de Arquímedes, sabemos que *“Un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del fluido desalojado”*, lo que quiere decir que un barco flota cuando la masa del buque es igual a la masa de agua desplazada.

Para la embarcación de prácticos estudiada, aplicando la fórmula de Mau y sabiendo que la lancha se desplaza a velocidades máximas entre 28 y 30 nudos y que el peso total es de 5 toneladas con el motor diésel se ha calculado la potencia. Adicionalmente, se ha supuesto que las masas son 5, 5,5 y 6 toneladas debido a los incrementos de masa de las distintas alternativas de propulsión, tanto por el sistema de generación eléctrica (la pila de combustible) como sobre todo por el peso del almacenamiento de hidrógeno y las baterías.

A continuación, se muestra una tabla en la cual se puede observar los valores de la potencia requeridos, debidos a las variaciones de velocidad y del desplazamiento (peso muerto total).

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

Tabla 5. Estimación de potencia en la hélice para la embarcación de referencia con motor diésel (5 t), y con valores del desplazamiento de 5,5 t y 6 t, para distintas velocidades.

V (knt)	Desplazamiento (t)	Potencia (kW)	Incremento de potencia respecto a 28 nudos y 5 toneladas	
			(kW)	(%)
20	5	162,7		
25	5	317,7		
28	5	446,3	0,0	
30	5	549,0	102,6	23,0%
20	5,5	171,4		
25	5,5	334,8		
28	5,5	470,4	24,0	5,4%
30	5,5	578,5		
20	6	179,8		
25	6	351,2		
28	6	493,4	47,1	10,5%
30	6	606,9	160,5	36,0%

Se ha establecido unas condiciones de referencia correspondientes a la embarcación propulsada por un motor diésel, con una velocidad de referencia de 28 knt y un desplazamiento de la embarcación de 5 toneladas, que proporciona una potencia de referencia de 446,3 kW.

Como se puede observar en la tabla, cuando el desplazamiento de agua se mantiene en 5 toneladas, pero la velocidad aumenta de 28 knt a 30 knt, esto supone un aumento de potencia de 102,6 kW, que es un 23% más de la potencia de referencia.

Por otro lado, cuando el peso de la embarcación aumenta 500 kg, pero se mantiene la velocidad en 28knt, se requiere un incremento de 24 kW. De la misma forma, si se aumenta a 6 toneladas, se necesita un aumento de potencia de 47,1 kW para la misma velocidad, lo que supone en valor absoluto un 10,5% más.

Por último, para un desplazamiento de 6 toneladas y una velocidad de 30 knt, se puede ver que se demanda un incremento de 160,5 kW, lo que supone un aumento de 36% sobre la potencia de referencia.

- **Norma ISO 8178** (DieselNet. Emission Test Cycles ISO 8178 , 2023):

La Norma ISO 8178 es una norma internacional para la medición de emisiones de escape de una serie de aplicaciones de motores no de carretera. Se utiliza para la certificación de emisiones y/o pruebas de aprobación de tipo en muchos países, incluidos Estados Unidos, la Unión Europea y Japón. La norma tiene en cuenta cuatro puntos característicos de funcionamiento, definidos por cuatro valores de porcentajes de la potencia nominal, asociados a cuatro valores de la velocidad máxima. Adicionalmente, a cada punto característico le corresponde un porcentaje de peso para evaluar el consumo medio.

Tabla 6. Weighting Factors of B-Type ISO 8178 Test Cycles, E3

Marine application propeller law						
Type E3, Mode #	1	2	3	4		
Power, %	100	75	50	25		
Speed, %	100	91	80	63		
Weighting factor	0.2	0.5	0.15	0.15		

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

Este tipo de norma se basa en la Ley de la Hélice o “Propeller Law” como se explica a continuación.

- **Ley de la Hélice (Propeller Law).**

Según esta ley, la curva de potencia requerida para propulsar una embarcación es equivalente a un polinomio de tercer grado perfecto dependiente de la velocidad. Tanto la potencia como la velocidad se pueden adimensionalizar con sus valores máximos, de forma que:

$$y = \frac{P}{P_{max}} \quad x = \frac{V}{V_{max}}$$

$$y = 1,3361x^3 - 0,5334x^2 + 0,2031x$$

Ecuación 12.

Por lo tanto, la curva de potencia adimensional en función de la velocidad adimensional es:

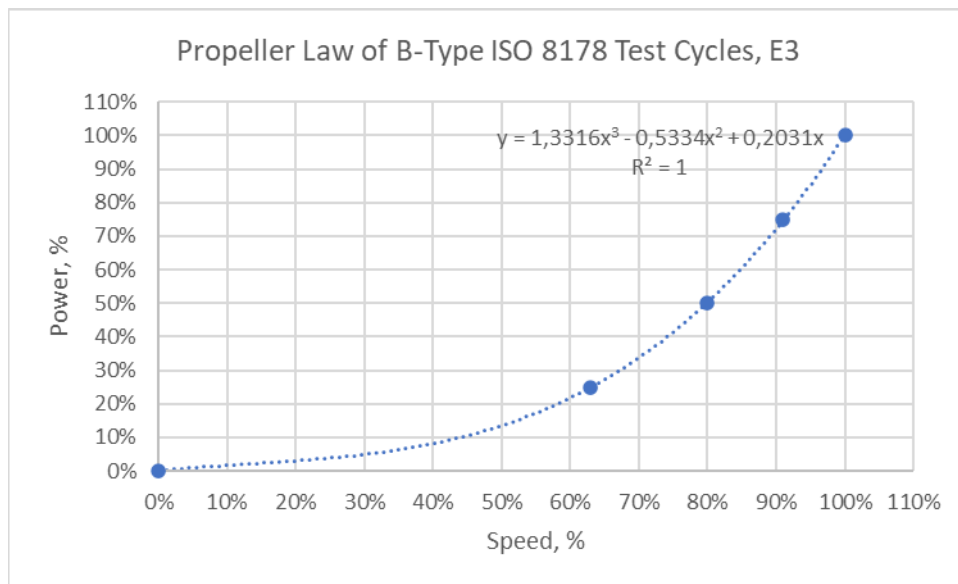


Ilustración 45. Representación gráfica de la Ley de la Hélice como polinomio de tercer grado.

Por otro lado, la **energía en la hélice por unidad de longitud recorrida** en Wh/km se puede calcular a partir de la potencia necesaria en la hélice y la velocidad a la que viaja la embarcación:

$$\text{Energía hélice} \left(\frac{Wh}{km} \right) = \frac{\text{Potencia hélice}}{\text{Velocidad}} = \frac{\text{Potencia hélice (kW)} \times 1000}{\text{Velocidad (knt)} \times 1,852}$$

Ecuación 13.

A partir de esta definición, se puede ver que la energía en la hélice por unidad de longitud es un polinomio de segundo grado, que en términos adimensionales se puede expresar como:

$$\left(\frac{E}{L} \right) / \left(\frac{E}{L} \right)_{max} = \frac{y}{x} = 1,3361x^2 - 0,5334x + 0,2031$$

Ecuación 14.

Una vez explicado esto, se pasa a exponer los resultados calculados para obtener la curva de potencia estimada en la hélice y la energía en la misma, como se puede ver en la Tabla 7 y en la Ilustración 46. Para el cálculo de la potencia y la energía por unidad de longitud se han sustituido en la Ecuación 12 y en la Ecuación 14, que tienen forma adimensional,

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

considerando los valores de la velocidad divididos por su velocidad máxima la cual es de 30 knt.

Tabla 7. Resultados del cálculo de la curva de potencia y energía por unida de longitud en hélice.

Velocidad (knt)	Potencia en hélice (kW)	Energía en hélice/L (Wh/km)
0,0	0,0	2.006,8
1	3,4	1.845,8
2	6,3	1.714,1
3	9,0	1.611,8
4	11,4	1.538,8
5	13,8	1.495,1
6	16,5	1.480,8
7	19,4	1.495,8
8	22,8	1.540,1
9	26,9	1.613,8
10	31,8	1.716,9
11	37,7	1.849,2
12	44,7	2.010,9
13	53,0	2.201,9
14	62,8	2.422,3
15	74,2	2.672,0
16	87,4	2.951,1
17	102,6	3.259,5
18	119,9	3.597,2
19	139,5	3.964,2
20	161,5	4.360,6
21	186,2	4.786,4
22	213,6	5.241,4
23	243,9	5.725,9
24	277,3	6.239,6
25	314,0	6.782,7
26	354,2	7.355,1
27	397,9	7.956,9
28	445,3	8.588,0
29	496,7	9.248,4
30	552,2	9.938,2

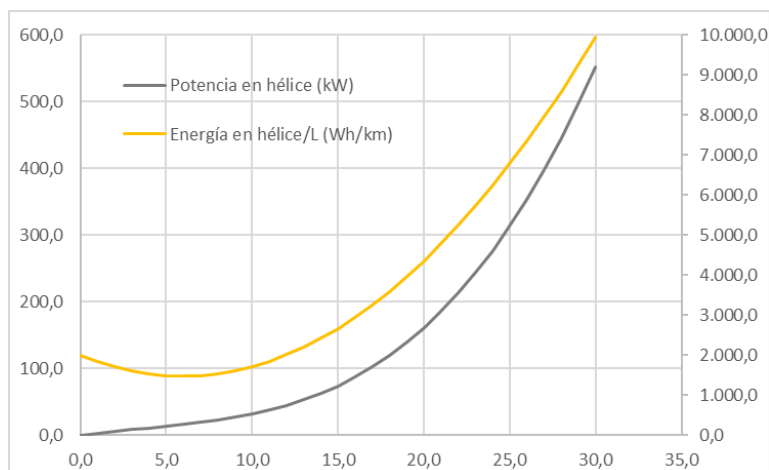


Ilustración 46. Curvas estimadas de potencia y energía por unida de longitud en la hélice en función de la velocidad de la embarcación.

4.2. Consumos de energía y emisiones de CO₂ W-T-T.

Según la [JEC, 2020] la energía de transformación W-T-T (Well To Tank) es la energía que hace falta para producir el combustible, incluyendo todos los procesos previos hasta el repostado en el tanque o la recarga de la batería. Este consumo de energía se suele expresar como la energía necesaria para producir una unidad de energía repostada (por ejemplo un vatio-hora) dentro del tanque de combustible o de la batería.

Seguidamente se muestran los valores para los distintos combustibles de interés en este trabajo, considerando en algún caso varias formas de obtener dichos combustibles o energía a repostar, en particular para el hidrógeno y la electricidad.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

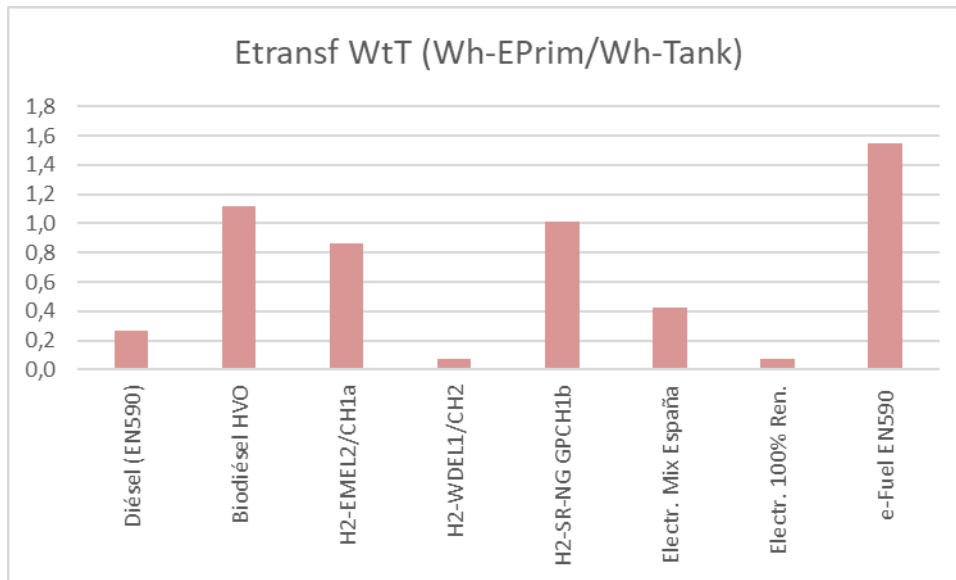


Ilustración 47. Energía de la transformación W-T-T de cada combustible/electricidad.

Como se observa, la energía de transformación más alta la tiene el e-fuel. Ello es debido a que se genera con fuentes de energía renovables para que dicho combustible sea neutro en emisiones de carbono, posteriormente le sigue el biodiésel HVO y el hidrógeno obtenido por reformado de gas natural (SR-NG).

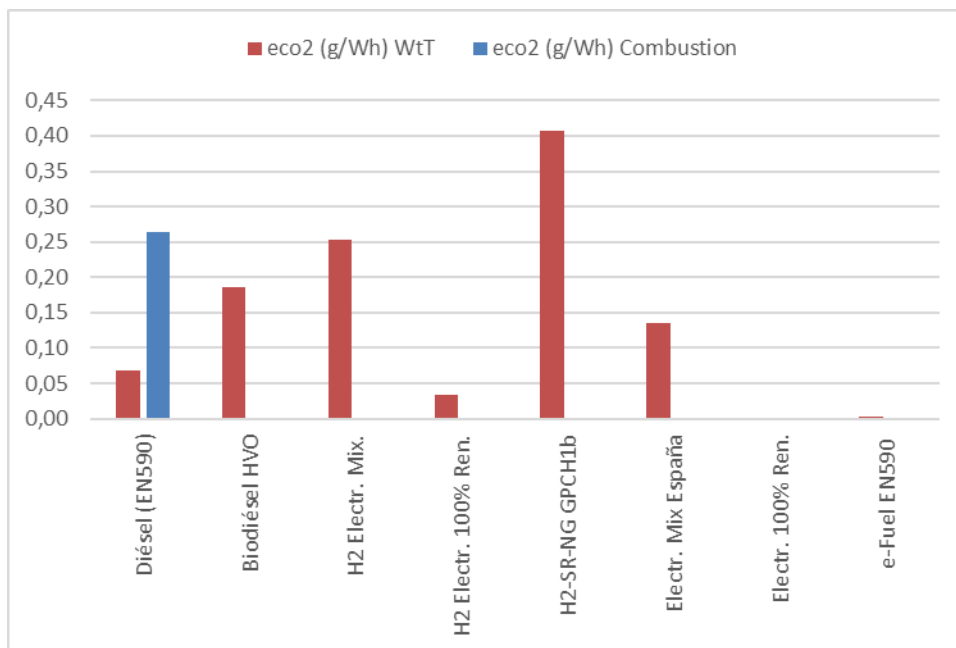


Ilustración 48. Emisiones de CO₂ en la producción (W-T-T) y combustión (T-T-W).

Al considerar las emisiones de CO₂, el diésel es el único combustible que tiene emisiones en la utilización asociadas a su combustión. El biodiésel y el e-fuel también tienen, pero al proceder de fuentes de energía renovables no computan.

Por lo que respecta a las emisiones de CO₂ en la producción (WTT), el combustible que más emisiones genera es el hidrógeno, tanto obtenido por reformado de gas natural como por electrólisis con electricidad obtenida con distintas fuentes de energía (Mix). Sin embargo, si la electricidad fuera renovable, las emisiones asociadas a la producción de hidrógeno serían muy pequeñas (0,034 g/Wh).

4.3. Potencias y energías específicas de los sistemas de propulsión

A continuación, a modo de introducción se van a mostrar las potencias y energías específicas de los distintos sistemas de propulsión, tanto por unidad de volumen como de masa.

Tabla 8. Valores de potencia específica de los sistemas de propulsión. Valores obtenidos de diversas referencias: (Ballard Power Systems, 2022), (BORGWARNER, 2016), (Cummings, 2022), (EODev, 2021) (EODev, 2022), (Quantum, 2021) (Yanmar, 2022).

Valores de potencia específica	W/kg	W/L
Motor de combustión interna diésel	250,0	150,0
Motor eléctrico	3.000	15.000
Pila de combustible automoción	2.000	3.100
Pila de combustible Nuvera 60 kW	315,8	200,0
Pila de combustible embarcaciones	250,0	120,0

El sistema que más energía específica genera por unidad de masa y de volumen es el motor eléctrico, dado que este tipo de motores carecen de sistemas de refrigeración lo que hace que no tengan pérdidas de carga por accionamiento de sistemas de auxiliares.

Por otro lado, el motor diésel es el sistema que menos energía genera por unidad de masa y de volumen y la pila de combustible diseñada para embarcaciones a causa de su gran tamaño y peso.

4.4. Masas y volúmenes específicos de los sistemas de almacenamiento

En esta sección veremos algunos datos de masas y volúmenes específicos de los sistemas de almacenamiento, considerado como un sistema formado por el combustible y el depósito de almacenamiento.

Tabla 9. Parámetros específicos de masas y volúmenes. (Ballard Power Systems, 2022), (BORGWARNER, 2016), (Cummings, 2022), (EODev, 2021) (EODev, 2022), (Quantum, 2021), (Yanmar, 2022).

Sistema Almac. = Combustible + Contenedor Tipo de almacenamiento	Unidad característica	Densidad propia m_{comb}/V_{comb} (kg/L)	Densidad aparente m_{comb}/V_{sist} (kgcomb /Lsist)	Energía específica Combustible (kWh/kg)	Energía específica Sistema E/m_{sist} (kWh /kgsist)	Fracción masa f_m ($m_{comb}/(m_{comb}+m_{contenedor})$)	Masa del sistema m_{sist}/E (kg _{sist} /kWh)	Fracción volumen f_v ($V_{comb}/(V_{comb}+V_{contenedor})$)	Volumen del sistema V_{sist}/E (L _{sist} /kWh)
Gasóleo	L	0,832	0,749	11,98	11,02	92,0%	0,091	90,0%	0,111
Biodiésel	L	0,890	0,801	10,33	9,51	92,0%	0,105	90,0%	0,121
H2 35 MPa	kg	22,87	0,017	33,33	1,67	5,0%	0,600	NA	1,800
H2 70 MPa	kg	38,22	0,022	33,33	1,90	5,7%	0,526	NA	1,350
Batería electr. Emb	kWh	NA	0,920	NA	0,094	NA	10,68	NA	11,61
e-Fuel diésel	L	0,780	0,702	12,22	11,24	92,0%	0,089	90,0%	0,117

Las baterías eléctricas como sistema de almacenamiento son los que mayor masa y volumen por unidad de energía (kWh) requieren, ya que en el caso de la masa se requiere aproximadamente 11 kilos por kilovatio-hora y en el caso del volumen 12 litros por kilovatio-hora, valores muy elevados en comparación con las otras alternativas.

Por otro lado, en el caso del hidrógeno según a la presión en el que vaya en el depósito tiene valores distintos de masa y volúmenes, siendo más favorable el depósito de 70 MPa porque tiene mejor relación de masa y volumen por unidad de energía, a pesar de que es de mayor coste.

Por último, los combustibles líquidos como el diésel, el biodiesel y el e-fuel tienen valores de masa y volumen por unidad de energía bastante parecidos, en torno a 0,1 kg/kWh en masa y 0,1 L/kWh en volumen.

4.5. Emisiones de CO₂ para los componentes y la embarcación

Aquí se muestran las emisiones de dióxido de carbono generadas en la fabricación de la embarcación las cuales son las partes comunes a todas las alternativas, como por ejemplo el casco y la estructura de la embarcación. Dada la ausencia de datos específicos para embarcaciones, se han escalado con la masa los resultados correspondientes a un autobús urbano, de los que sí se disponía de resultados obtenidos con GREET.

Tabla 10. Emisiones de referencia de la embarcación para todas las alternativas.

Masas y emisiones vehículo completo	Autobús urbano	Lancha prácticos
Masa de embarcación Diesel de referen	11.000 kg	5.000 kg
Emisiones CO2 fabricación por vehículo	93.500 kg/bus	42.500 kg/lancha

En la siguiente tabla se presentan las emisiones de los componentes de cada alternativa de los sistemas de propulsión.

Tabla 11. Emisiones de la fabricación de los componentes del sistema de propulsión (EU_Battery-PoweredElectricVehicles_TRAN_2018, s.f.).

Emisiones CO2 Fabricación Componentes Sistema Propulsión	
Motor de combustión interna diésel	7,3 kgCO ₂ /kW
Batería	150,0 kgCO ₂ /kWh
Motor eléctrico	10,0 kgCO ₂ /kW
Pila de combustible	8,0 kgCO ₂ /kW
Almacenamiento H2 a presión	425 kgCO ₂ /kg H2

Por tanto, para las distintas alternativas, suponiendo que se requiere un motor que tenga 400kW para tener aproximadamente 360kW en la hélice y poder navegar a una velocidad media de 25 knt, se tienen las siguientes emisiones:

- En el caso del motor diésel, emisiones (lancha + motor):

$$\text{Emisiones totales}(kg \text{ de } CO_2) = 42500 + 7,3 \cdot 400 = 45.420 \text{ kg}CO_2$$

- En la pila de hidrógeno, suponiendo una masa de almacenamiento de 50 kg de hidrógeno y una pila de 400 kW las emisiones de CO₂ serán las siguientes:

$$\text{Emisiones totales } (kg \text{ de } CO_2) = 42500 + 425 \cdot 50 + 8 \cdot 400 = 66.950 \text{ kg de } CO_2$$

- Para el motor eléctrico, con una batería de 400 kWh y un motor eléctrico de 400 kW:

$$\text{Emisiones totales } (kg \text{ de } CO_2) = 42500 + 150 \cdot 400 + 10 \cdot 400 = 106.500 \text{ kg de } CO_2$$

4.6. Costes específicos de los elementos de los sistemas de propulsión

Posteriormente en las siguientes tablas se van a mostrar los costes específicos por kilovatio generado por el motor.

Tabla 12. Valores de los costes por unidad de potencia de los motores.

Costes de adquisición	Sistemas marinizados
Motor combustión interna Diesel	200 €/kW
Motor combustión interna MEP	200 €/kW
Motor eléctrico	200 €/kW

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

Ante la carencia de datos fiables, se ha supuesto los mismos costes específicos para los tres tipos de motores.

Por lo que respecta al almacenamiento de hidrógeno, motores eléctricos y sistemas de control y pilas de combustible, la tabla 13 recoge los valores de los costes respectivos.

Tabla 13. Costes específicos de pila, almacenamiento de hidrógeno y baterías. (Ballard Power Systems, 2022), (BORGWARNER, 2016), (Cummins, 2022), (EODev, 2021) (EODev, 2022), (Quantum, 2021).

Costes de adquisición	Sistemas marinizados
Pila de Combustible	2.600 €/kW
Almacenamiento hidrógeno@35 Mpa	800 €/kg
Almacenamiento hidrógeno@70 Mpa	1.000 €/kg
Baterías	700 €/kWh
Sistema control	100 €/kW

Como se puede observar los costes de adquisición más altos son el de la pila de combustible y el depósito para almacenar el hidrógeno a 70 MPa de presión. El coste del depósito es distinto para 70 MPa que, para 35 MPa, ello se debe a que los materiales con los que se realiza el depósito son distintos.

El coste de una embarcación diésel se podría estimar en 280.000€, por tanto, el **sobrecoste estimado de las dos opciones de propulsión alternativa** será:

- Para una **pila de 300 kW, almacenamiento de H₂ de 50 kg H₂ a 70 MPa:**

$$\text{Coste (€)} = 300kW \cdot \frac{2600€}{kW} + \frac{1000€}{kW} \cdot 50kg \text{ de H}_2 = 830.000€$$

- Para un **motor eléctrico de 400kW y una batería eléctrica de 400kWh:**

$$\text{Coste (€)} = 400kW \cdot \frac{200€}{kW} + 400kW \cdot \frac{700€}{kWh} = 360.000€$$

Estos valores se han utilizado en los cálculos para tener en cuenta el coste de amortización de las embarcaciones a lo largo de su vida útil.

Adicionalmente, se han considerado los costes de mantenimiento de cada alternativa de propulsión, a los que se les ha añadido el coste de reposición de algunos elementos singulares como son las baterías o la pila de combustible, como se incluyen en la Tabla 14.

Tabla 14. Datos empleados para el cálculo del coste de amortización

Coste adquisición vehículo (k€, IVA excl)	280	280	1000	1000	1000	700	700	280
Vida útil (años)	6	6	6	6	6	6	6	6
Recorrido anual (km/d)	15.890	15.890	15.890	15.890	15.890	15.890	15.890	15.890
Valor residual vehículo (k€, IVA excl) % de coste adquisición	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Coste amortización €/km	2,94	2,94	10,49	10,49	10,49	7,34	7,34	2,94
Coste mantenimiento + reposición €/km	0,64	0,64	1,15	1,15	1,15	1,01	1,01	0,76

Finalmente, los costes de los combustibles y la electricidad considerados se indican en la Tabla 16, tanto para los precios de adquisición como los costes por unidad de energía (€/kWh).

Tabla 15. Costes de los combustibles y la electricidad.

	Diésel	Biodiésel	Pila Comb. Electr. Mix	Pila Comb. 100% Ren.	Pila Comb. SR NG	Eléctrico Mix España	Eléctrico 100% Ren.	e-Fuel Diesel
Costes combustible (producto energético y propulsión)	Gasóleo	Biodiésel	H2 mix	H2 100% ren	H2 SR NG	Electricidad	Electr. Renov	Gasóleo
Coste combustible €/L, €/kg, €/kWh sin IVA	1,40	1,40	10,00	10,00	10,00	0,120	0,200	3,000
Coste combustible €/kWh en tanque	0,097	0,121	0,30	0,30	0,30	0,120	0,200	0,090

5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS ALTERNATIVAS DE PROPULSIÓN.

En este capítulo se comparan los resultados de las ocho alternativas de la propulsión consideradas para la embarcación, así como los diferentes tipos de energías que se consumen en cada una, los rendimientos, las emisiones, las masas y volúmenes, y por último los costes de cada alternativa.

5.1. Energías consumidas por unidad de longitud en cada alternativa de propulsión.

Energía en la hélice de cada alternativa.

Según la alternativa de propulsión escogida, la energía en la hélice por unidad de longitud (Wh/km) será distinta para unos sistemas u otros. Ello es debido a que en la Ecuación 11 la potencia es proporcional al desplazamiento elevado a 0,55. Por tanto, cuanto más masa tenga la embarcación, mayor potencia se demandará en la hélice por unidad de longitud.

La **referencia para los cálculos es la embarcación con sistema de propulsión diésel**, para la cual se estima que la energía por unidad de longitud necesaria en la hélice es 4817 Wh/km. Este consumo se da (de acuerdo con la Tabla 7. Resultados del cálculo de la curva de potencia y energía por unida de longitud en hélice. Tabla 7) para una velocidad de 21 nudos y corresponde a unos 187 kW en la hélice. Estos valores de referencia se han tomado por ser intermedios entre los indicados en la Tabla 4, correspondientes a la velocidad media (14,7 nudos) y la velocidad máxima (28 nudos).

Partiendo de esta referencia para la propulsión diésel y corrigiendo la energía en la hélice con el desplazamiento elevado a 0,55 (mayor en las opciones con pila de combustible y baterías eléctricas), se obtienen los valores de la Ilustración 49:

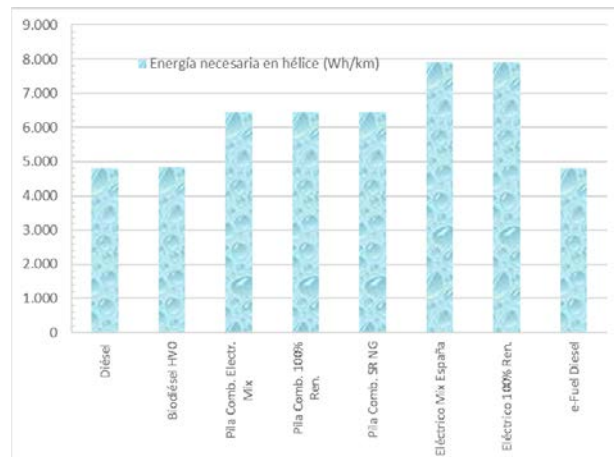


Ilustración 49. Energía necesaria en la hélice (Wh/km) (Alvariño, 1997).

Como se puede observar el sistema que más energía en la hélice demanda es el motor eléctrico debido al peso de las baterías, seguido de la pila de combustible que en este caso es debido al peso del depósito del combustible y de la pila. La propulsión con motor diésel presenta valores muy similares para las tres alternativas de combustible: gasóleo, biodiésel y e-fuel.

Rendimiento del tanque a la hélice/estela (T-T-W).

En este apartado, se muestra un gráfico con rendimientos equivalentes de cada sistema propulsivo Tank To Wake (T-T-W).

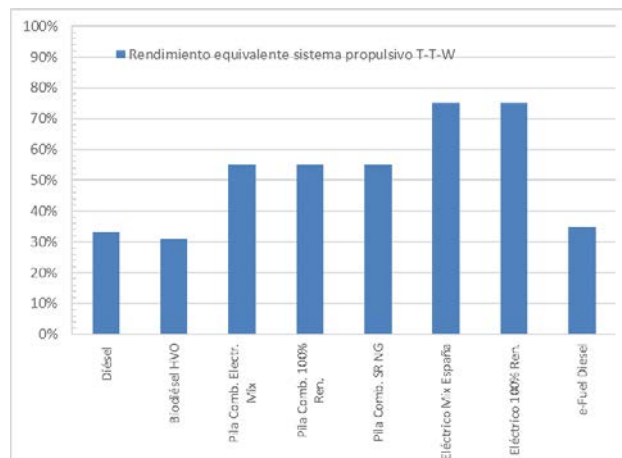


Ilustración 50. Rendimientos equivalentes del sistema propulsivo T-T-W.

Como se puede observar, los rendimientos equivalentes del sistema propulsivo T-T-W más bajos corresponden a los sistemas que emplean un motor térmico, como es el caso del diésel, biodiésel HVO y e-fuel. Ello es debido a que el rendimiento del motor térmico es del 35% y de la reductora de 95%, lo que hace que el producto de ambos esté alrededor del 30%.

Los rendimientos máximos se obtienen en las alternativas eléctricas, ello es debido a que un motor eléctrico tiene rendimientos muy altos en torno al 70%-80% como se puede observar en el gráfico. Ello se explica porque los rendimientos del motor eléctrico, convertidor de potencia y descarga de la batería son 94%, 96% y 95% respectivamente, lo que hace que el rendimiento del sistema propulsivo este en torno al 75%.

En la pila de combustible, el rendimiento de generación de la pila de combustible es 60% y el rendimiento del convertidor de potencia es del 95,7%, lo que hace que tenga un rendimiento global del 57,6%.

Energía consumida en el tanque

A continuación, se comparan los valores de energía en la hélice y la energía consumida en el tanque en el caso de los combustibles o en la batería en el caso de la electricidad. Cabe recordad que la relación entre ambos es el rendimiento equivalente visto en el apartado anterior.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

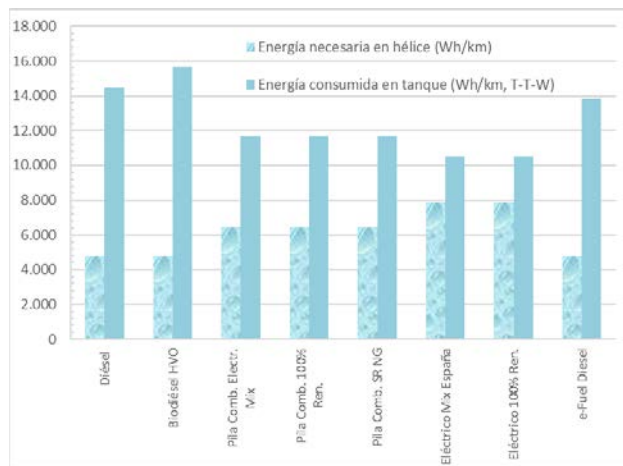


Ilustración 51. Energía consumida en tanque y energía necesaria en la hélice.

Como se puede observar donde más energía se requiere en el tanque es en el biodiésel, diésel y el e-fuel diésel, porque su rendimiento equivalente es el más bajo de todos los considerados.

Por otro lado, los sistemas que más energía en la hélice demandan son las alternativas con baterías eléctricas, seguidas de las de hidrógeno en pilas de combustible, debido al peso del sistema de almacenamiento (baterías, tanques a presión). Sin embargo la propulsión eléctrica a batería es la alternativa que menos energía en tanque necesita debido al alto rendimiento global de la propulsión tal y como se observa en la Ilustración 50.

Energía necesaria para producir el combustible.

A continuación, se muestra la energía necesaria para producir los combustibles de las distintas alternativas en términos de energía por unidad de longitud (Wh-Eprim/km). Hay que tener en cuenta que estos resultados son la combinación de los valores de la energía para producir cada combustible (Wh-Eprim/Wh-tanque) que se mostraron en el **apartado 4.2**, y los valores de la energía necesaria en tanque para cada alternativa de propulsión (Wh-tanque/km).

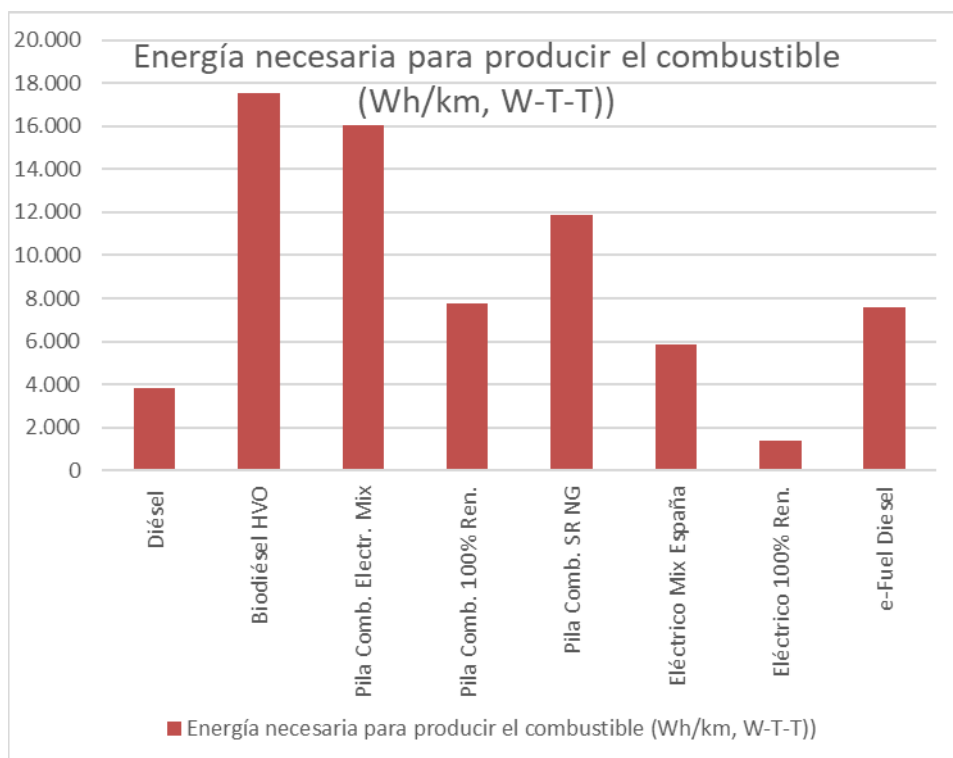


Ilustración 52. Energía necesaria para producir el combustible (Wh/km, W-T-T).

Donde más energía se requiere es en el biodiesel, ya que según se ha visto en el apartado 4.2 se necesita consumir 1,1 Wh de energía primaria para obtener 1 Wh en el tanque. Sin embargo, la que menos energía necesita es la eléctrica 100% renovable ya que es la que tiene la energía de transformación más baja tal y como se muestra en la Ilustración 47.

Energía primaria WTW

A continuación, vamos a mostrar un gráfico en el que se muestra la energía primaria consumida por las distintas alternativas, la cual como se podrá observar es la suma de la energía necesaria en el tanque y la energía necesaria para producir el combustible.

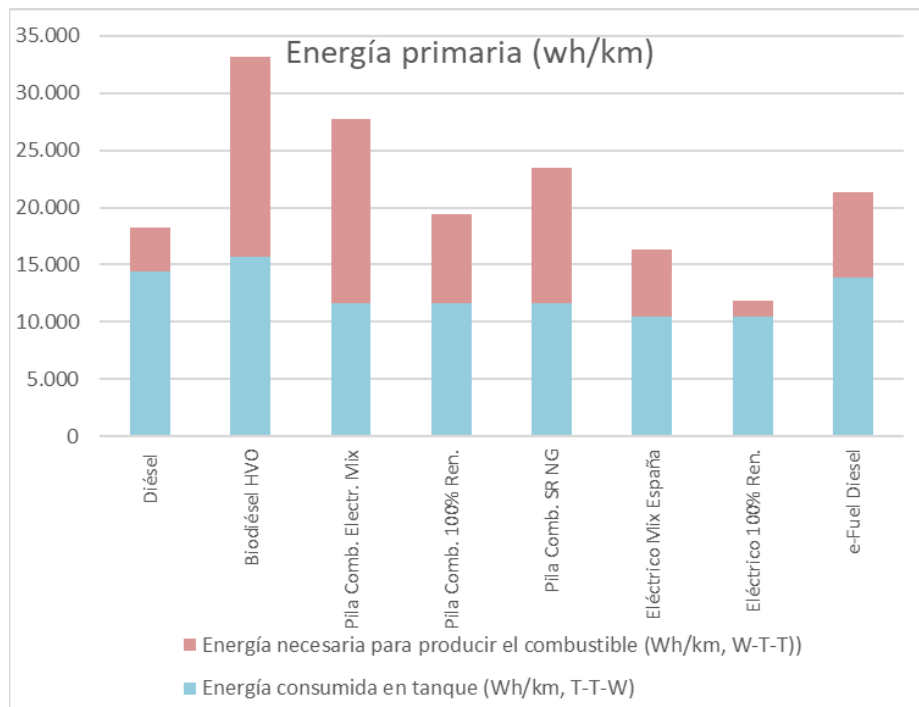


Ilustración 53. Energía primaria consumida por cada alternativa de propulsión.

Como se observa, en las alternativas donde mayor consumo de energía primaria se genera es en el biodiésel HVO, Pila de combustible eléctrico mix y pila de combustible SR NG ordenados de mayor a menor respectivamente. Ambos tienen en común que la energía para producir el combustible es mayor que la energía consumida en el tanque, ello es debido a que los procesos de obtención del combustible requieren grandes demandas de energía.

5.2. Emisiones de CO₂ de cada alternativa.

Emisiones operativas de CO₂ en utilización (Tank to Wake)

A continuación, se muestra un gráfico en el cual se puede observar las emisiones de CO₂ emitidas cuando la propulsión se encuentra activa.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

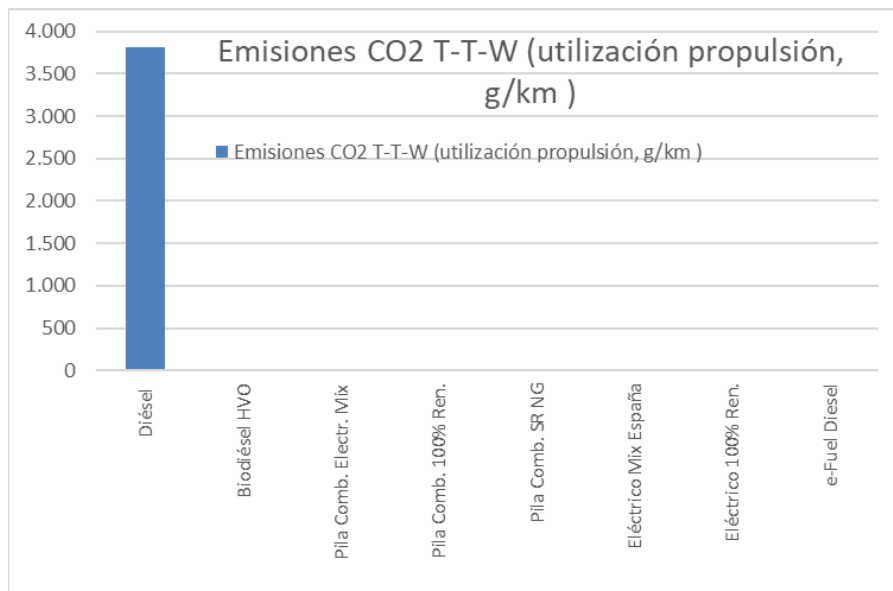


Ilustración 54. Emisiones de CO₂ generadas en la utilización del combustible (g/km, T-T-W).

Como se puede observar, el diésel es el único combustible que tiene emisiones directas cuando se está utilizando la propulsión, emitiendo alrededor de 3.750 gramos de CO₂ por kilómetro. Se recuerda que en el caso de las fuentes de energía renovables como es el caso del biodiésel VHO y e-fuel diésel tienen emisiones de CO₂, pero no computan porque son de origen renovable.

Emisiones de CO₂ producción más utilización (Well-To-Wake).

En el siguiente gráfico vamos a poder observar las emisiones operativas de las distintas alternativas, las cuales son la suma de la producción del combustible con las emisiones producidas durante el servicio.

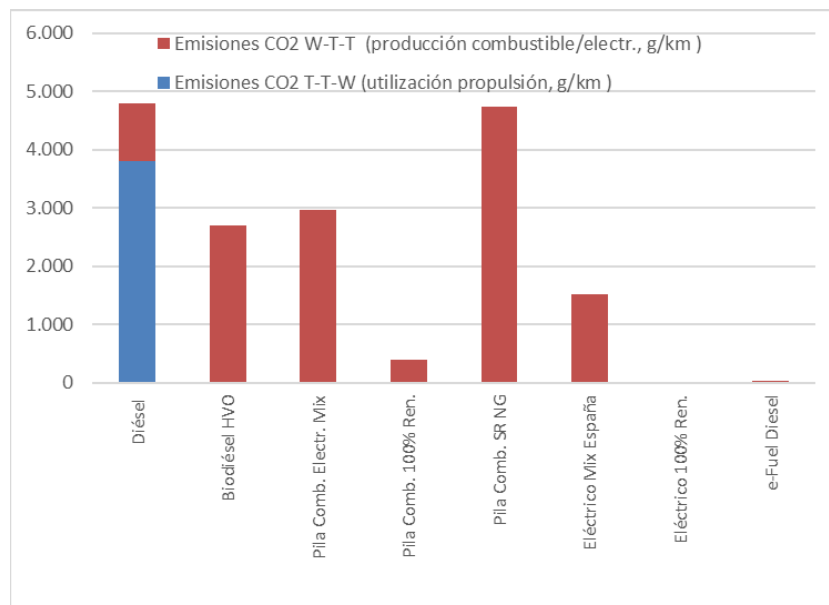


Ilustración 55. Emisiones de CO₂ W-T-T y T-T-W (Tinaut) (JEC, s.f.).

Como se puede ver, las alternativas que más emisiones W-T-W tienen son la Pila de combustible SR NG y el diésel.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

Las emisiones generadas en la generación del combustible mostradas en color rojo, la pila de combustible es la alternativa que más emisiones genera, concretamente la pila de combustible SR NG en la cual el origen del hidrogeno proviene de un proceso generado mediante gas natural, como se ha mencionado anteriormente.

Emisiones totales de CO₂ incluyendo la construcción de las embarcaciones para cada alternativa.

En la fabricación de las embarcaciones también se generan emisiones de CO₂, debido a la quema de combustibles fósiles.

El recorrido anual que realiza el buque es de 15.890 km y la vida útil de la embarcación es de seis años, por tanto, recorrerá un total de 95.340 km, por tanto, la repercusión de las emisiones de fabricación por kilómetro de cada alternativa es la siguiente:

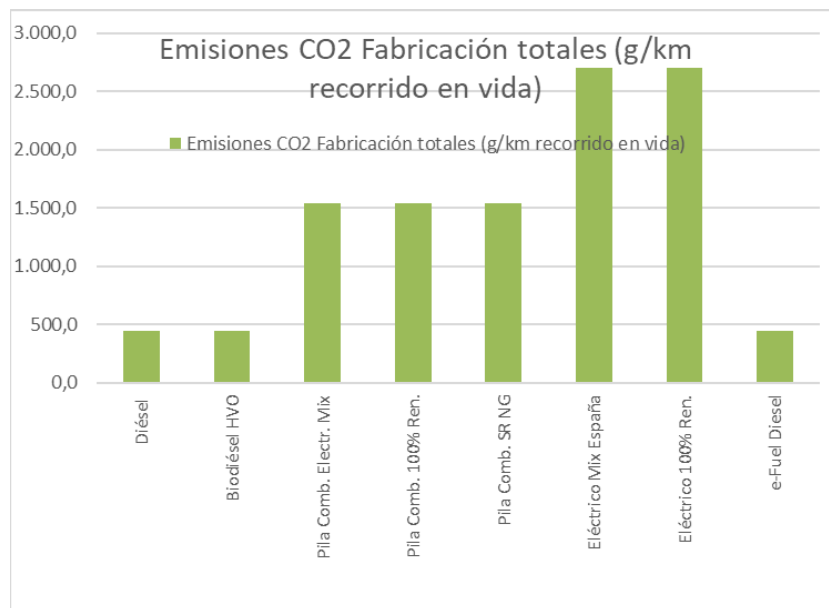


Ilustración 56. Emisiones de CO₂ generadas en la fabricación (Ballard Power Systems, 2022) (webinar, 2022).

Como se observa, las alternativas que más emiten son las eléctricas y la pila de combustible. Ello es debido a la fabricación de las baterías para almacenar la energía en la alternativa eléctrica, y en el caso de la pila de combustible, de la fabricación de la pila y del depósito de almacenamiento del hidrógeno.

Por tanto, la suma total de las emisiones de la fabricación, producción del combustible y de la utilización del combustible es la siguiente para seis años y un cambio de batería y/o pila de combustible:

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

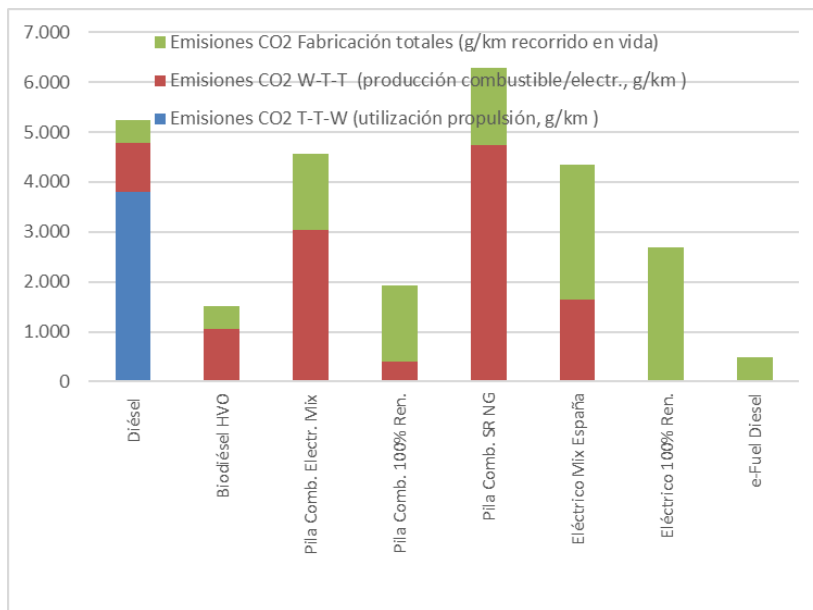


Ilustración 57. Emisiones totales en 6 años y un cambio de batería y/o pila de combustible en g/km.

Como se puede observar en esta estrategia, la alternativa que más emisiones de CO₂ emite es la pila de combustible SR NG.

Sin embargo, las alternativas que más emisiones en su fabricación tienen siguen siendo las alternativas con motor eléctrico, ya que al tener menos años de vida útil la amortización de emisiones es mayor.

Seguidamente se contemplan distintos escenarios, en los cuales se realizan cambios en la vida útil de la embarcación y sustitución de baterías y/o pila de combustible:

- **12 años de vida útil y dos cambios de baterías.**

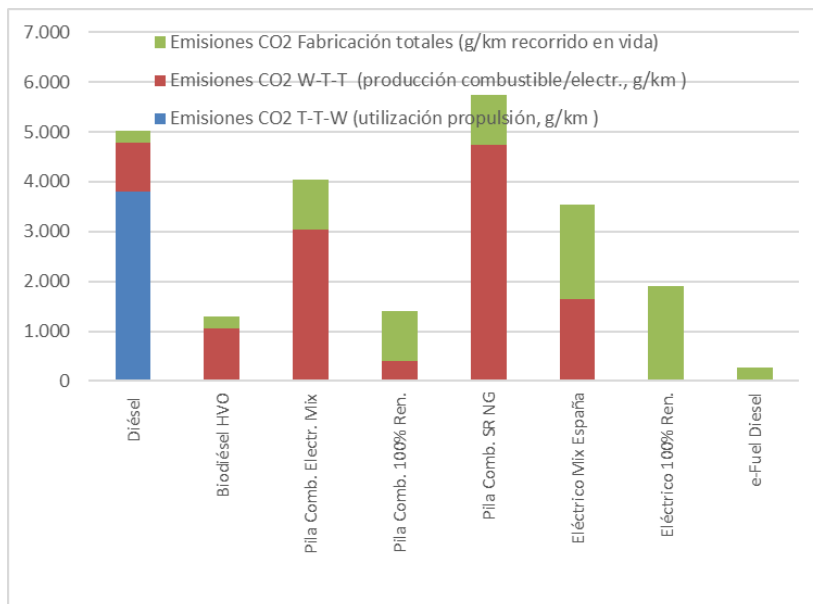


Ilustración 58. Emisiones totales en 12 años y 2 cambios en g/km.

Como se puede observar, la alternativa que más emisiones de CO₂ totales tiene sigue siendo la pila de combustible SR NG, sin embargo, le sigue la pila de combustible eléctrico mix.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

Al tener 12 años de vida útil, las emisiones de CO₂ de las alternativas eléctricas se reducen ya que, al realizar más kilómetros, la amortización de las emisiones se reparte entre los kilómetros realizados en los 12 años.

- **12 años de vida útil y 3 cambios de baterías.**

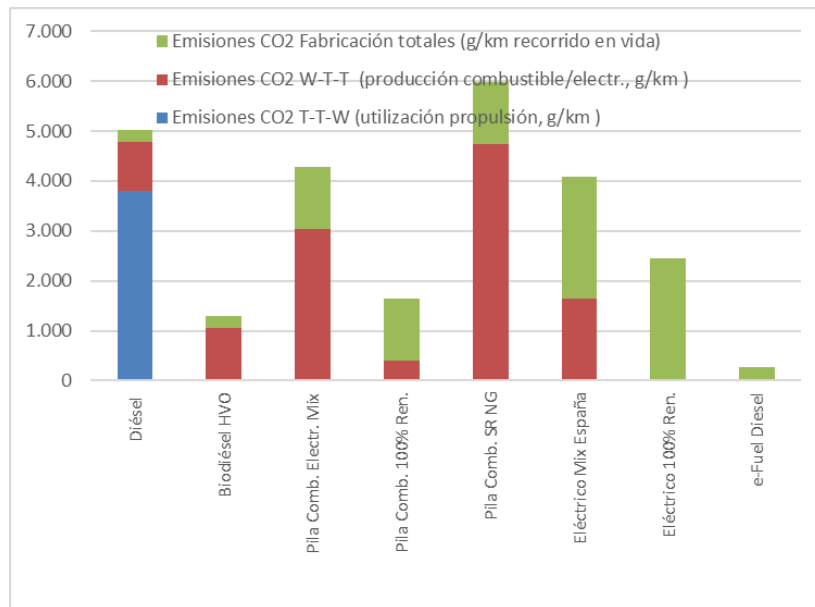


Ilustración 59. Emisiones totales 12 años y tres cambios en g/km.

En este caso tal y como se observa, las alternativas que más emisiones generan continúan siendo las pilas de combustible, de origen mixto y de gas natural.

Por otro lado, en las alternativas con motor eléctrico vemos que las emisiones suben hasta 4000g/km en la alternativa de origen mixto y 2500g/km en la alternativa de origen renovable, ello es debido a los 3 cambios de baterías que se realizan.

5.3. Masas y volúmenes de cada alternativa de propulsión y almacenamiento

Las masas y volúmenes de cada alternativa de propulsión, considerando también el almacenamiento requerido (combustible líquido, hidrógeno a presión, baterías), se presentan a continuación. Para los almacenamientos se consideran por separado la parte correspondiente a los depósitos de combustible líquido (diésel, biodiésel, e-fuel) y gaseoso (hidrógeno a presión) y la parte correspondiente a las baterías (presente también en el caso de la alternativa con pila de combustible). Los resultados son los siguientes:

Tabla 16. Masas y volúmenes de cada alternativa de propulsión y almacenamiento.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

	Diésel	Biodiésel HVO 100% Renov.	Pila Comb. Electr. Mix	Pila Comb. 100% Ren.	Pila Comb. SR NG	Eléctrico Mix España	Eléctrico 100% Ren.	e-Fuel Diesel
Masa sistema almacenamiento combustible (cont.+comb.) (kg)	80	92,9	375	375	375			76,8
Volumen sistema almacenamiento combustible (L)	98,5	106,6	1.284	1.284	1.284			98,5
Masa sistema almacenamiento eléctrico (kg)			3.205	3.205	3.205	7478,6	7478,6	
Volumen sistema almacenamiento eléctrico (L)			3.484	3.484	3.484	8.129	8.129	
Masa total almacenamiento (kg)	80	93	3.580	3.580	3.580	7.479	7.479	77
Volumen total almacenamiento (L)	98	107	4.767	4.767	4.767	8.129	8.129	98

Como se puede observar la alternativa que más masa de almacenamiento requiere es la eléctrica a batería, con valores que rondan las siete toneladas y media. En la alternativa basada en la pila de combustible, la masa total de almacenamiento es del orden de la mitad de la masa de la alternativa eléctrica, si bien se distribuye entre unos 400 kg de almacenamiento de hidrógeno a presión (para unos 22 kg de hidrógeno a repostar por día) y unos 3200 kg de baterías eléctricas. Las alternativas basadas en los combustibles líquidos para un motor tipo diésel requieren masas de almacenamiento para la misma autonomía inferiores a 100 kg.

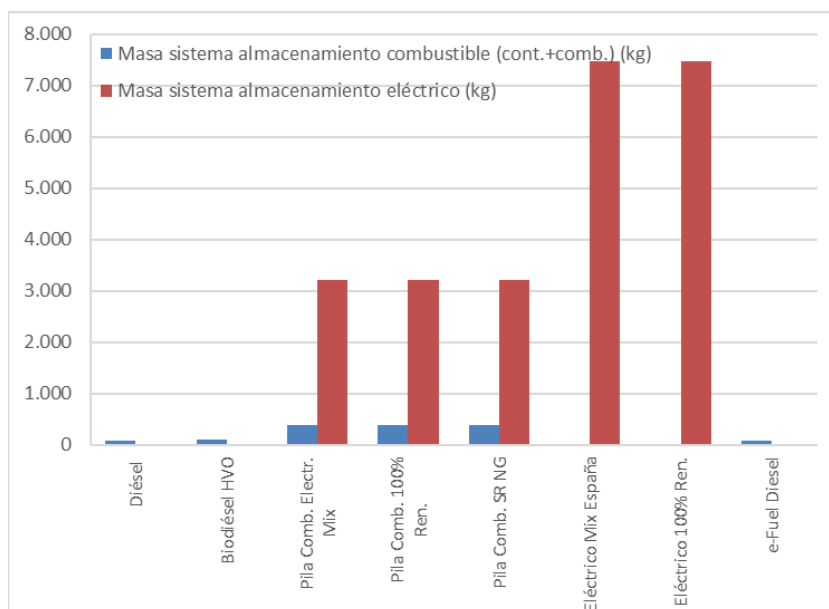


Ilustración 60. Masa de almacenamiento de combustible y eléctrico.

Como se puede observar, en las dos alternativas eléctricas no aparece la masa del combustible, ya que lo único que influye es la masa de almacenamiento de la electricidad debido al peso de las baterías. En el caso de la pila de combustible la masa del sistema de almacenamiento es mucho mayor que el peso del hidrógeno, eso es debido a que los depósitos de almacenamiento de hidrógeno solo pueden almacenar el 5% del contenido de hidrógeno con respecto a la masa total del depósito de almacenamiento.

Y por lo que respecta a los volúmenes del sistema de almacenamiento eléctrico y de combustible, se ha realizado la siguiente gráfica:

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

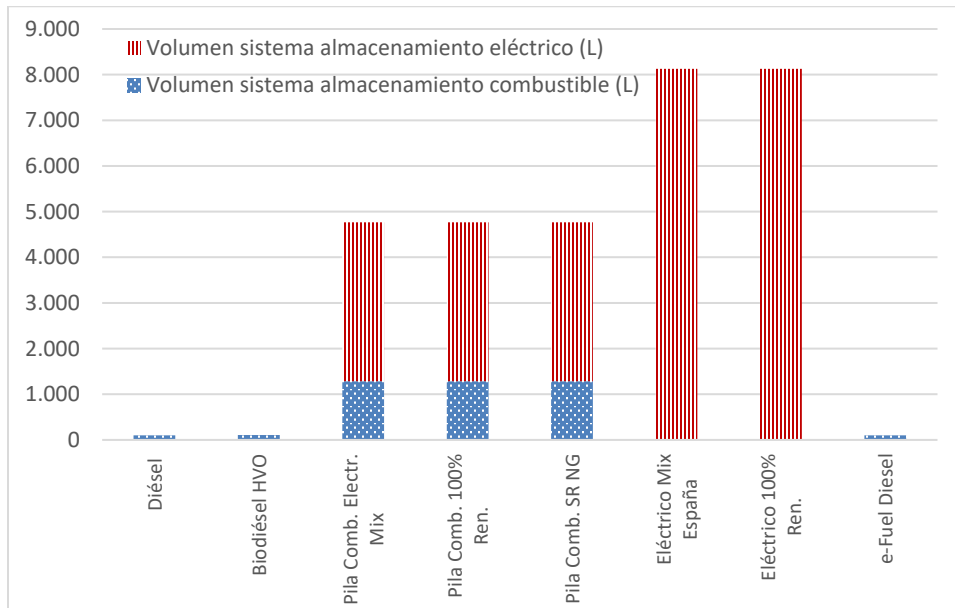


Ilustración 61. Volúmenes de los sistemas de almacenamiento.

En este caso ocurre lo mismo que en la gráfica de las masas, las alternativas que más volumen de almacenamiento demandan son las eléctricas (8 m³) y la pila de combustible (5 m³). En ambos casos resultan mucho mayores que los volúmenes requeridos para el almacenamiento de combustibles líquidos (menos de 0,1 m³).

5.4. Costes de las distintas alternativas.

En este apartado se va a mostrar los costes totales de cada alternativa, desglosados en:

- Costes del combustible/electricidad (€/km)
- Costes de mantenimiento (€/km)
- Costes de amortización (€/km)

Primero de todo se muestra el coste que representa el combustible por cada km recorrido para cada alternativa mediante el siguiente diagrama de barras.

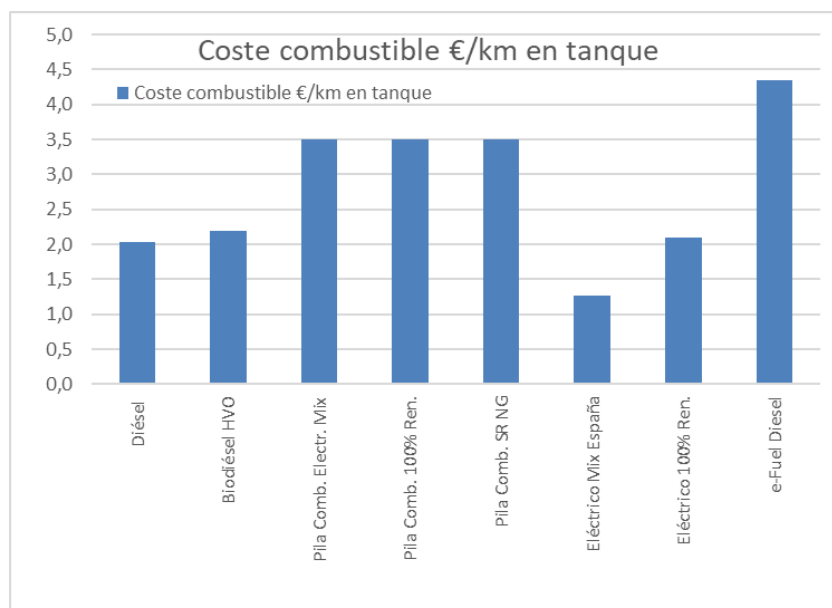


Ilustración 62. Coste del combustible/electricidad en el almacenamiento en €/km.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

El combustible más caro en utilización es el e-fuel, porque se obtiene mediante procesos de síntesis, usando CO₂ y con energías renovables y por ello su precio es muy elevado (3 €/L aprox.). Le siguen las tres alternativas de la Pila de Combustible debido a que el coste de la producción del hidrógeno sigue siendo muy elevado (10 €/kg aprox.). Finalmente, la electricidad como combustible es una alternativa en general más económica, aunque depende fuertemente del precio contratado (12-20 c€/kWh).

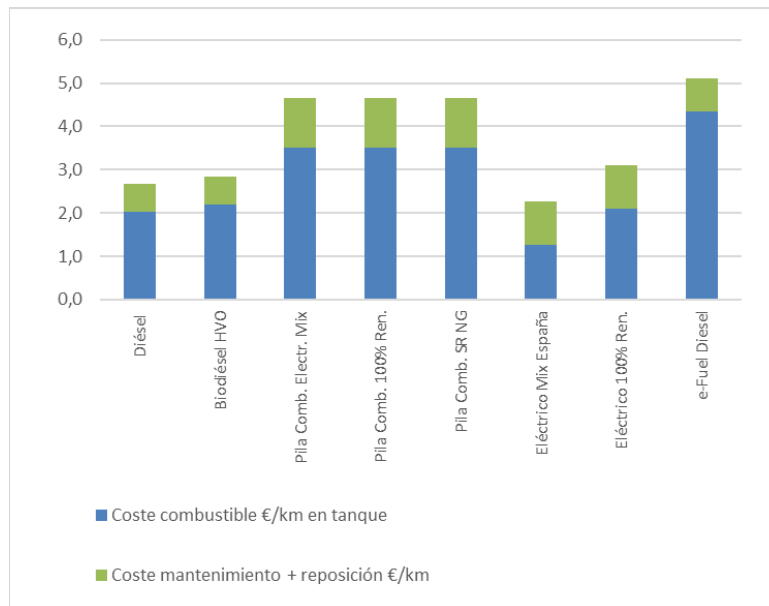


Ilustración 63. Coste del combustible y coste de mantenimiento de cada alternativa en €/km.

En el siguiente gráfico se añaden a los costes del combustible los costes del mantenimiento y reposición de cada alternativa. Los sistemas eléctricos, tanto basados en pila de combustible como en baterías, pueden tener costes de mantenimiento bajos.

Sin embargo, cuando se incluyen los costes de reposición de la pila y de la batería (prevista una sustitución en la vida útil considerada), el coste combinado mantenimiento más reposición es mayor que para los sistemas convencionales de combustión.

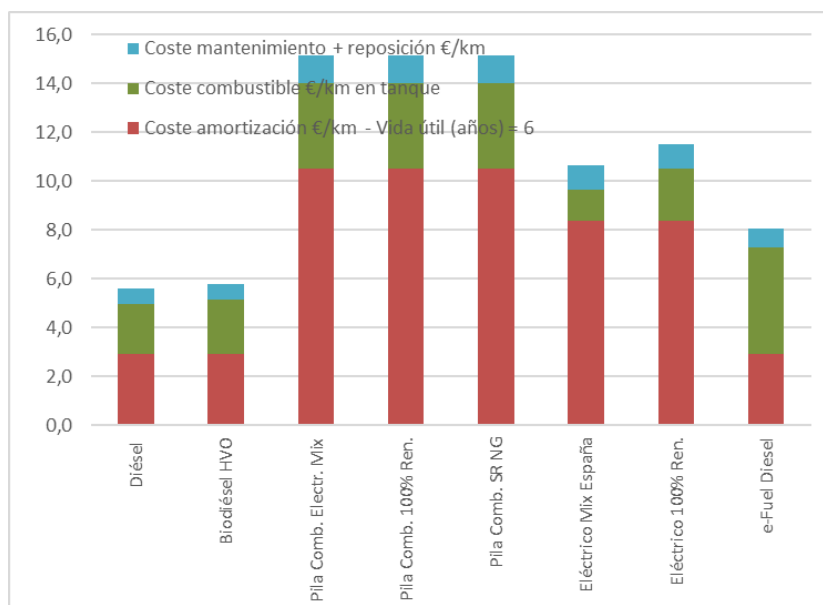


Ilustración 64. Coste total para el propietario de cada alternativa en €/km.

Por último, se muestra el coste total para la propiedad (TCO) de cada alternativa, en el cual se ha añadido el coste de amortización de la inversión inicial repercutido a lo largo de la vida

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

útil de la embarcación. Destaca el coste de amortización de la alternativa de las pilas de combustible el cual es de aproximadamente de 9 €/km. Ello es debido a que las pilas de combustible comerciales hoy en día son muy caras, especialmente en las versiones marinizadas. A ello hay que añadir el coste del almacenamiento de combustible a alta presión, y por tanto su coste de amortización es tan alto.

Para ver el efecto de la amortización durante la vida útil, en la gráfica siguiente se presentan los resultados para 12 años de vida útil, considerando dos reposiciones de pilas y/o baterías.

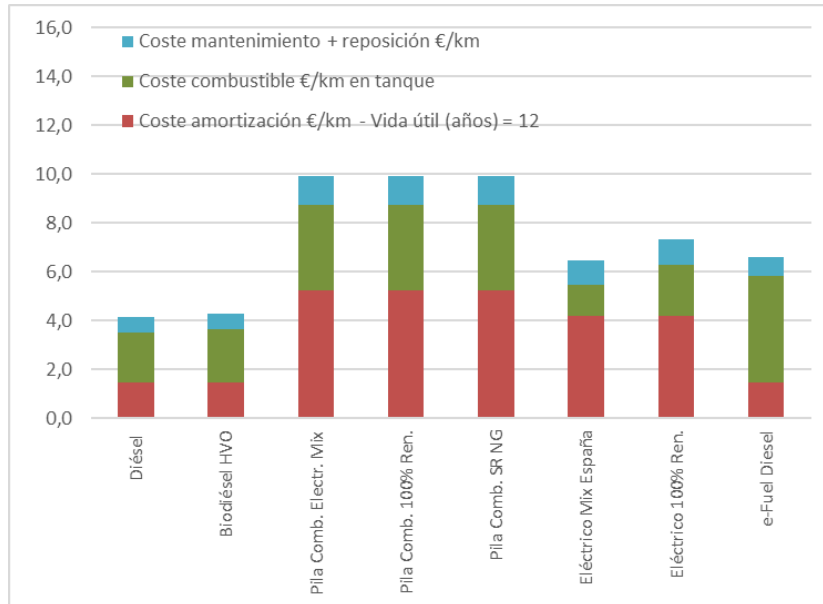


Ilustración 65. Coste total para el propietario de cada alternativa en €/km.

Para concluir, se puede afirmar que las alternativas más caras sumando los tres tipos de costes son las pilas de combustible independientemente del origen del hidrógeno (ya que se ha supuesto el mismo coste del hidrógeno).

6. CONCLUSIONES SOBRE LAS ALTERNATIVAS DE PROPULSIÓN PARA LANCHAS DE PRÁCTICOS.

6.1. Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo se presentan considerando dos niveles:

- Conclusiones generales sobre los sistemas de propulsión, y
- Conclusiones específicas, relativas a la comparación de los resultados de los cálculos: energías consumidas, energías primarias consumidas, emisiones directas y emisiones W-T-W, costes de operación, costes totales TCO, etc.

Con **carácter general**, para cumplir los objetivos de descarbonización de los puertos y en particular del de Valencia, se pueden considerar distintas alternativas de sistema de propulsión/combustible/electricidad, como son el hidrógeno, la electricidad o combustibles de origen vegetal y sintéticos como el biodiesel HVO y el e-Fuel.

Hay **alternativas de los sistemas de propulsión** como los que utilizan el motor **eléctrico con almacenamiento en baterías** y en menor medida la **pila de combustible con almacenamiento de hidrógeno** que no resultan idóneas debido al peso de las baterías y de los depósitos de almacenamiento, lo que se traduce en un aumento de la potencia necesaria en hélice y como consecuencia un aumento de las emisiones, aunque sean combustibles cero emisiones en su operación a grandes rasgos. Por otro lado, los combustibles que emplean motor térmico como el diésel, el biodiésel HVO, y el e-fuel tienen un rendimiento global de la propulsión relativamente bajo, pero sin embargo son alternativas que no aumentan el peso de la embarcación y en algunos casos como se ha visto anteriormente tienen menos emisiones totales que las otras alternativas que son cero emisiones en utilización.

Para obtener los **recorridos de las embarcaciones** se han utilizado los valores de las posiciones dependientes del tiempo, previo filtrado y eliminación de valores contradictorios. Por su parte para obtener valores adecuados de las velocidades y las aceleraciones de las embarcaciones, ha sido necesario introducir varias alternativas de cálculo. La comparación de los resultados de las mismas ha permitido establecer que la **velocidad obtenida considerando cuatro puntos** consecutivos (tres intervalos de recorrido y de tiempo) reduce los errores y resulta la más adecuada, tanto en valores de velocidades como de aceleraciones.

Por otro lado, por lo que respecta a los **resultados específicos** de cada alternativa de propulsión, aplicadas al caso de la embarcación Edetania perteneciente a los prácticos de Valencia, se ha elaborado una tabla para comparar de forma cualitativa los siguientes nueve criterios de todas las alternativas de propulsión posibles:

- Masa de almacenamiento, combustible más contenedor y en su caso la batería eléctrica.
- Volumen de almacenamiento, ídem
- Energía consumida T-T-W, necesaria para la propulsión de la embarcación.
- Energía de la transformación W-T-T, asociada a la producción del combustible/electricidad.
- Energía primaria consumida W-T-T (suma de las dos anteriores)
- Emisiones de CO₂ directas T-T-W, originadas en la propulsión.
- Emisiones de CO₂ generadas en la transformación W-T-T de cada combustible/electricidad.
- Emisiones de CO₂ Totales C-T-G, suma de las dos anteriores más las correspondientes a la fabricación de la embarcación más las de cada una de las opciones de propulsión.
- Coste total para la propiedad, como suma de coste de combustible, de mantenimiento y de amortización de la inversión inicial repercutida sobre la vida de la embarcación.

Alternativas de propulsión descarbonizada para embarcaciones

En la Tabla se asigna a cada alternativa un valor entre 1 y 8 para cada uno de los nueve criterios, de forma que **cuanto menor sea el índice numérico, mejor es la alternativa en ese aspecto** (se ha asignado un valor de cero en el caso de las emisiones para las alternativas que no tienen emisiones de CO₂). A la peor alternativa dentro de cada criterio se le ha asignado un valor de ocho, excepto en el criterio de energía consumida T-T-W, dado que las diferencias entre las distintas opciones son pequeñas. Para destacar la bondad relativa de los distintos resultados, se ha establecido un formato condicional de colores gradual desde el verde (el mejor) hasta el rojo (el peor).

Tabla 17: Evaluación cualitativa de las distintas alternativas bajo diferentes criterios.

Sistema de propulsión	Masa Almacenamiento	Volumen Almacenamiento	Energía Consumida T-T-W	Energía Transformación W-T-T	Energía 1ª Consumida W-T-W	Emisiones CO2 Directas T-T-W	Emisiones CO2 Transf. W-T-T	Emisiones CO2 Totales C-T-G	Coste Total Propiedad
Diésel	1	1	4	2	3	8	3	7	1
Biodiésel HVO	1	1	5	6	7	0	5	6	1
Pila Comb. Electr. Mix	4	5	2	6	6	0	6	6	8
Pila Comb. 100% Ren.	4	5	2	4	4	0	2	2	8
Pila Comb. SR NG	4	5	2	5	5	0	8	8	8
Eléctrico Mix España	8	8	1	3	2	0	4	5	3
Eléctrico 100% Ren.	8	8	1	1	1	0	0	3	4
e-Fuel Diesel	1	1	3	8	8	0	1	1	3

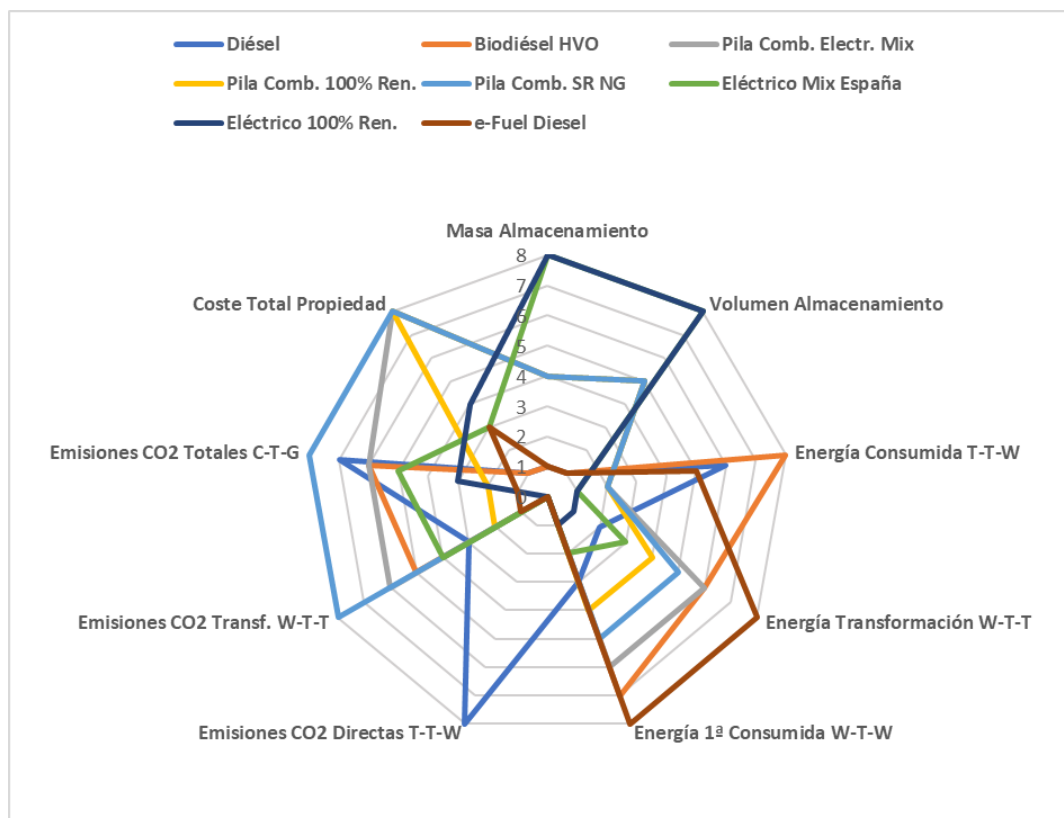


Ilustración 66. Representación cualitativa de las distintas alternativas frente a cada criterio.

La misma información de la tabla anterior se ha representado en forma de gráfico radial, considerando para cada alternativa de propulsión una línea que adopta diversos valores para cada criterio (eje). Por la valoración asignada a cada alternativa/criterio, **los valores más próximos al centro son más favorables**, mientras que los más alejados son más desfavorables.

Como se puede deducir al observar en la Tabla 17 y la Ilustración 66, **no hay ninguna alternativa de propulsión que tenga valores óptimos (1, 2) conjuntamente en todos los criterios** considerados. Por el contrario, algunas alternativas de propulsión tienen resultados muy favorables en algunos criterios y desfavorables en otros. Por ello, hay que evaluar cada alternativa atendiendo a los distintos criterios, sin que haya un ganador único.

Si se considera como referencia un **motor alimentado con combustible diésel**, esta resulta la mejor opción en términos de **masa y volumen de almacenamiento**, así como en **coste**. Sin embargo, no es favorable al considerar la **energía consumida T-T-W**, ni tampoco en las **emisiones directas de CO₂** (de hecho, es la única de las alternativas que genera dichas emisiones). Si se considera la **energía primaria consumida**, se posiciona en un tercer puesto (justo detrás de las alternativas eléctricas a batería). Al considerar las **emisiones de todo el ciclo de vida (C-T-G)**, la alternativa diésel es casi la peor (sólo por delante de la pila de combustible alimentada con hidrógeno obtenido por reformado de gas natural).

Las alternativas con **motor de combustión**, pero alimentadas con los **dos combustibles renovables** considerados (**HVO y e-Fuel diésel**), presentan comportamientos similares en cuanto a **masa y volumen de almacenamiento** (favorables) y energía consumida T-T-W (desfavorables). En cuanto al **coste**, el **HVO** resulta similar al diésel, mientras que el **e-Fuel** es mucho más caro (consecuencia de los valores de entrada introducidos 1,4 y 3,0 €/L, respectivamente). Los elevados valores de la **energía consumida en la transformación W-T-T** para estos combustibles les penalizan frente al diésel. En las **emisiones directas de CO₂ T-T-W**, ninguno de los dos combustibles las genera (por su carácter renovable). Sin embargo, en las **emisiones de CO₂ de la transformación W-T-T**, el HVO se ve muy penalizado, mientras que son muy pequeñas para el e-Fuel. Esta misma conclusión vale para las **emisiones totales C-T-G**.

Para la **propulsión con pila de combustible y motor eléctrico**, se han considerado **tres orígenes para el hidrógeno consumido**. Por ello, las tres opciones presentan los mismos comportamientos en términos de **masa y volumen de almacenamiento** (valores intermedios en la clasificación), así como comportamiento favorable en **energía consumida T-T-W** (sólo detrás de las opciones eléctricas a batería). En la **energía de la transformación W-T-T**, los distintos procesos de obtención del hidrógeno (electrólisis con electricidad del mix en España, electrólisis con electricidad 100% renovable, y reformado de gas natural sin captura de CO₂), tienen consumos de energía ligeramente distintos, y sobre todo emisiones de CO₂ asociadas a la transformación W-T-T muy distintos. Esto se traduce también en valores distintos de las **emisiones C-T-G** (muy favorable pila con H₂ de electricidad renovable, malo para H₂ de electricidad mix, y el peor para H₂ de reformado de gas natural). Al considerar los **costes**, las alternativas con pila de combustible alimentada con hidrógeno resultan las más caras (coste de 10 €/kg de H₂, más elevados valores de la inversión en pila de combustible, almacenamiento de H₂ y batería eléctrica).

Finalmente, al considerar las opciones de **propulsión eléctrica a batería**, con dos orígenes de la electricidad, dichas opciones resultan favorables en términos de **energía consumida T-T-W** (a pesar del aumento de energía en la hélice necesaria para propulsar la embarcación con mayor peso debido a las baterías. Precisamente, estas opciones son las peores en términos de **masa y volumen de almacenamiento** (hasta 8 t de sobrepeso) asociados a las baterías (versiones marinizadas). En la **energía de la transformación W-T-T**, asociada a la generación de la electricidad utilizada, la alternativa 100% renovable es más favorable, al igual que para la **energía primaria W-T-T**. Obviamente no hay emisiones directas de CO₂ en la utilización y las emisiones en la transformación sólo aparecen en el caso de electricidad del Mix en España (a pesar del valor favorable de sólo 136 gCO₂/kWh). Por el contrario, al considerar las **emisiones totales C-T-G**, la fabricación de las baterías penaliza el posicionamiento, incluso para electricidad 100% renovable.

6.2. Sugerencias para desarrollos futuros

Durante el desarrollo de esta tesis han surgido algunas líneas futuras que se han dejado abiertas y que sería necesario para avanzar más en la descarbonización del sector marítimo.

- Por lo que respecta a las alternativas que implementan motor eléctrico y pila de combustible, es necesario invertir e incentivar en la investigación de nuevos materiales para los **sistemas de almacenamiento con baterías** que sean capaces de disminuir el peso para que sea posible implementar dichos sistemas en las embarcaciones de prácticos.
- Así mismo, también es necesario investigar en nuevos métodos de investigación para la **obtención de la electricidad y del hidrógeno** a través de fuentes de energía renovables para conseguir la neutralidad de emisiones, al igual que en la construcción de las baterías y de la pila para reducir así sus emisiones totales.
- Del mismo modo, para reducir las emisiones durante la vida útil, se requiere buscar nuevas formas de desarrollar baterías y pilas de combustibles que duren más tiempo, para que no sea necesario el cambio de ambas durante la vida.
- En el caso de los **biocombustibles**, es necesario buscar fuentes alternativas para su producción para disminuir la energía para producirlos y alternativas al cultivo que se realiza para producir la materia prima con los que se producen los mismos ya que en algunos casos están reemplazando a las cosechas alimenticias lo que libera una gran cantidad de carbono al suelo y con el uso de los fertilizantes que se emplean, se libera una gran cantidad de óxido nitroso.
- Por último, en el caso de los **combustibles sintéticos**, como es el caso del e-fuel, es una opción muy interesante para considerar ya que estos combustibles no emiten más CO₂ a la atmósfera, sino que devuelven el que emplearon en su fabricación. Pero aún queda mucho trabajo de investigación para que sean una realidad, ya que hoy en día su producción es muy cara y no es asequible debido a su alto precio por litro. Por ello es necesario buscar otras opciones de fabricación que hagan este combustible más asequible para todos los públicos y se puedan emplear como alternativa a los combustibles fósiles

REFERENCIAS.

Libros y artículos de consulta:

- ALVARIÑO (1997) PROYECTO BÁSICO DEL BUQUE MERCANTE. COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS NAVALES (Alvariño, 1997)
- BALLARD (2022) FC-200kW WAVE SPECIFICATION SHEET. (Ballard Power Systems, 2022)
- BORGWARNER (2016) MOTORS HVH250-090 (BORGWARNER, 2016)
- CUMMINGS (2022) QSL9 MARINE PROPULSION ENGINES 0042687 (Cummins, 2022)
- EODEV (2021) REXH₂ PRODUCT INFORMATION SHEET (EODev , 2021)
- EODEV (2022) FUEL CELL REXH₂ INTEGRATION (EODev , 2022)
- EU_BATTERY POWEREDELECTRICVEHICLES_TRAN_2018
[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/617457/IPOL_STU\(2018\)617457_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/617457/IPOL_STU(2018)617457_EN.pdf) (EU_Battery-PoweredElectricVehicles_TRAN_2018, s.f.)
- TINAUT, F. (2020). METODOLOGÍA USADA EN INFORME JEC W-T-W v5, MÁSTER INGENIERÍA AUTOMOCIÓN, UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. (Tinaut)
- JEC W-T-W v5, MÁSTER INGENIERÍA AUTOMOCIÓN, UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. (JEC, s.f.)
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC121213>
- QUANTUM (2021) H₂TANK-SPECIFICATIONS-SEPT-2021-ALL-TANKS (Quantum, 2021)
- Yanmar (2012) Hydrogen Fuel Cell Boat Testing RELEASE-210324 (Yanmar, 2022)

Páginas Web de consulta:

- GREET. MODEL FOR HYDROGEN LIFE CYCLE GHG EMISSIONS. PRESENTATION AT H₂IQ WEBINAR. JUNE 15, 2022 (webinar, 2022)
- JEC (2020) WELL-TO-TANK REPORT v5, <HTTPS://PUBLICATIONS.JRC.EC.EUROPA.EU/REPOSITORY/HANDLE/JRC119036> (JEC, s.f.)
- DIESELNET (2023) EMISSION TEST CYCLES ISO 8178
<https://dieselnet.com/standards/cycles/iso8178.php> (DieselNet. Emission Test Cycles ISO 8178 , 2023)

PRESUPUESTO

Una vez realizado el presupuesto se han dividido las horas totales de trabajo en las diferentes tareas que se han realizado para poder completar la memoria, siendo estas la revisión bibliográfica en la cual se incluye la búsqueda de información, la búsqueda de alternativas de propulsión, la identificación de recorridos típicos donde se incluye el cálculo de las aceleraciones y velocidades, el cálculo de las distancias recorridas donde se integran la búsqueda de los diferentes métodos para el cálculo de las distancias, y por último la revisión de los resultados, la representación gráfica de dichos resultados y la supervisión del tutor como responsable del trabajo.

Para poder realizar la memoria han sido necesarias herramientas para el cálculo, el graficado y la redacción del trabajo, las cuales por ser estudiantes de la UPV no suponen coste alguno, pero sí que se contabilizan en este presupuesto.

Tabla 18. Presupuesto parcial

Mano de obra			
Descripción	Unidades (h)	Coste unitario (€/h)	Importe (€)
Revisión bibliográfica	90	5,50 €	495,00 €
Búsqueda de alternativas de propulsión	20	5,50 €	110,00 €
Identificación de recorridos típicos	30	5,50 €	165,00 €
Calculo de distancias recorridas	20	5,50 €	110,00 €
Representación gráfica de los resultados obtenidos	15	5,50 €	82,50 €
Revisión de resultados	30	5,50 €	165,00 €
Supervisión del tutor	100	40,00 €	4.000,00 €
TOTAL			5.127,50 €
SOFTWARE			
Descripción	Unidades	Coste unitario (€)	Importe (€)
Licencia Microsoft Office 365 A1 Universitaria	1	- €	- €
TOTAL			- €

El coste total de este trabajo se presenta en el siguiente presupuesto global (Tabla 19), en el cual se incluye el presupuesto parcial mostrado en la Tabla 18 donde se muestra la mano de obra y el software, los gastos generales, el beneficio industrial y el impuesto sobre el valor añadido (IVA) que el cual es del 21%.

Tabla 19. Presupuesto global

Descipción	Importe
Mano de obra	5.127,00 €
Software	- €
Presupuesto Ejecución Material	5.127,00 €
Gastos Generales (10%)	512,70 €
Beneficio Industrial (8%)	410,16 €
Presupuesto de Ejecución Por Contrata	6.049,86 €
IVA(21%)	1.270,47 €
TOTAL	7.320,33 €

Por tanto, el coste total del trabajo, IVA incluido, asciende a **SIETE MIL TRESCIENTOS VEINTE MIL EUROS CON 33 CÉNTIMOS.**