REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE MEDIANTE VELAS RÍGIDAS Y PANELES SOLARES

Cachaza Vázquez, Lucía[1]; Pérez López, Gabriel[2]; Villa Caro, Raúl[3] ; Fraguela Formoso, José Ángel[4]

[1]Universidad de A Coruña. Escuela Politécnica Superior. España. lucia.cachaza@udc.es
[2]Universidad de A Coruña. Escuela Politécnica Superior. España. gabriel.perez.lopez@udc.es
[3]Dr. Ing. Naval y Oceánico / Cap. Marina Mercante. Raúl Villa Caro. Escuela Politécnica Superior. Universidad de A Coruña. España. raul.villa@udc.es
[4]Dr. Ing. Naval. Escuela Politécnica Superior. Universidad de A Coruña. España. jafraguela@udc.es

RESUMEN.

Debido a su dependencia del combustible fósil y al hecho de que es una de las fuentes de emisiones antropogénicas menos reguladas, las emisiones del sector del transporte marítimo contribuyen significativamente a la polución del aire y al cambio climático. El impacto medioambiental se centra principalmente en las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_X), dióxido de azufre (SO_2) y partículas sólidas ($PM_{2.5}$).

Gracias a la concienciación social e institucional, en esta década se están implementando importantes normas medioambientales que restringen las emisiones de gases, tanto a nivel local como global. El cumplimiento de las mismas es un desafío que depende de diversos factores, entre los que se incluyen las restricciones financieras, la inmadurez de la tecnología y la incertidumbre en cuanto a su implantación y las consecuencias de su incumplimiento.

Durante la década de los 80 y debido al gran aumento del precio del combustible, se construyeron algunos buques en Japón equipados con velas rígidas, que junto con el motor principal, consiguieron una reducción en el consumo de combustible. Fueron los primeros pasos en el campo de la "propulsión asistida por el viento". Además, en las últimas décadas se ha producido un desarrollo importante de la energía solar, siendo ampliamente instalada en instalaciones terrestres.

En este trabajo queremos analizar la capacidad de las energías eólica y solar para conseguir una reducción en el consumo de combustible de un buque mercante de mediano tamaño, con el fin de alentar a la industria naval hacia la consecución de buques más ecológicos y respetuosos con el medio ambiente.

Palabras clave: buque; velas; paneles solares, eficiencia energética

1. INTRODUCCIÓN.

Hasta la fecha, la mayoría de las mejoras en la eficiencia del consumo de combustible en los buques se han llevado a cabo a través de cambios en su funcionamiento, como puede ser la navegación lenta, y a la reducción de la potencia instalada, en ambos casos intentando cumplir con los requerimientos del Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI). Los nuevos combustibles (principalmente el LNG) y las tecnologías híbridas han sido adoptadas por operadores del Norte de Europa y de América del Norte en nichos con tonelajes pequeños o especializados, tales como los ferris. Mientras tanto, los buques de carga de línea regular todavía tienen que dar pasos tecnológicos u operacionales significativos [1]. La dramática bajada en el precio del petróleo y de los combustibles para buques durante 2014 ha menguado el estímulo de los operadores en reducir el consumo de energía, al menos de momento.

Para cubrir la potencial demanda de sistemas de bajo consumo energético y reducir las emisiones de carbono, han surgido un gran número de ideas tecnológicas de ahorro de energía. Muchos de estos conceptos no son completamente innovadores, pero se obtienen beneficios significativos a partir de nuevos entendimientos, materiales o métodos. Uno de estos viejos conceptos con una renovada vida es la propulsión asistida por el viento.

El interés en la propulsión asistida por el viento comenzó en la década de 1980, motivado, de un modo similar al actual, por la crisis del petróleo de los años 70. Al mismo tiempo que la tecnología se mostraba prometedora, los precios del combustible se estabilizaron y supuso un freno en su desarrollo y adopción. En 2015, se puede argumentar que la tecnología de la propulsión asistida por el viento afronta la misma amenaza (la reducción de los estímulos debida la caída de los precios de los combustibles), a pesar de su potencial para conseguir ahorros de combustible de dobles dígitos. Actualmente, vivimos en un mundo diferente, donde muchas organizaciones ven beneficios que van más allá de reducir los costes

operacionales, buscando disminuir las emisiones de carbono y la dependencia sobre los combustibles fósiles [2]. A este respecto, la propulsión asistida por el viento ofrece una de las pocas opciones realistas para introducir las energías renovables en el transporte marítimo.

En algunos de los conceptos desarrollados se busca conseguir un sistema híbrido de energías renovables, empleando no sólo la energía eólica, sino también la energía solar. Los avances recientes en las tecnologías de células solares y módulos fotovoltaicos han hecho que la energía solar se convierta en una opción, con un coste efectivo, para la reducción de combustible en embarcaciones de recreo, ferris y buques de pasaje. Sin embargo, la cantidad de combustible ahorrado en buques grandes utilizando solamente la energía solar es relativamente pequeña.

A pesar de ello, varias empresas han comenzado a desarrollar diseños de velas rígidas que, además de aprovechar la fuerza del viento, sean capaces también de utilizar la energía solar. Para ello, las velas se recubren con paneles solares, que proporcionan un empuje propulsivo extra y son una fuente útil de energía auxiliar, de modo que puedan ser utilizados tanto durante la navegación como en las estancias en puerto. Sin embargo, la combinación de tecnologías eólica y solar debe estudiarse convenientemente, ya que la complejidad y el coste de la instalación pueden aumentar notablemente.

2. PROPULSIÓN ASISTIDA POR EL VIENTO: VELAS RÍGIDAS.

La propulsión asistida por el viento se basa en la utilización de un dispositivo para capturar la energía del viento y generar un empuje [1]. El empuje requerido para propulsar el buque a través del agua se obtiene de la combinación de este dispositivo con el motor del buque. Esto reduce la cantidad de energía propulsora efectiva necesaria para conseguir una velocidad dada. La propulsión asistida por el viento puede funcionar de dos formas:

i. Mantener la misma velocidad del buque para una potencia reducida del motor. Esto significa una reducción en el consumo de combustible, en los costes y en las emisiones de CO_2.

ii. Incrementar la velocidad del buque para la misma potencia del motor. Esto implica reducir la duración de las travesías y, potencialmente, incrementar la rentabilidad del buque.

La propulsión asistida por el viento es una de las pocas tecnologías aplicables a buques que ofrecen ahorros potenciales de combustible de dobles dígitos, aunque los ahorros reivindicados por las diferentes tecnologías eólicas varían ampliamente, llegando a alcanzar valores cercanos al 50%. Estas variaciones no son debidas únicamente a los diferentes tipos de tecnologías, sino también a las diversas opciones para su implementación y a la influencia de los factores operacionales, tales como las condiciones climáticas y la ruta del buque. Entre las diferentes opciones de tecnologías para la propulsión asistida por el viento, en este trabajo nos centraremos en la utilización de velas rígidas.

Al contrario que las velas tradicionales, las cuales son flexibles, las velas rígidas modernas son perfiles aerodinámicos (tipo NACA0030 en [3], NACA0021 y EPPLER420 en [4]) de placas metálicas o materiales compuestos, con geometrías y configuraciones variadas. Dependiendo del tamaño del buque, del espacio disponible en cubierta y de otras restricciones, se pueden disponer múltiples juegos de velas. El principio operativo es el mismo que el de cualquier perfil aerodinámico: cuando la vela se mueve a través de un fluido, este produce una fuerza aerodinámica consistente en una sustentación y un arrastre.

Una característica fundamental para la implantación de los sistemas de velas rígidas en los buques es la capacidad de los mástiles que las soportan para rotar. Mediante la rotación del perfil hasta alcanzar el ángulo de ataque óptimo, se puede maximizar la sustentación. El mecanismo de rotación debe estar totalmente automatizado, de modo que el sistema se ajuste en tiempo real con el viento actuante, contando además con un control desde el puente para tomar decisiones manualmente. En situaciones de fuertes vientos que puedan comprometer la integridad de la estructura, se debe orientar las velas hasta oponer la mínima resistencia al viento. Una vela rígida puede producir empuje hasta un ángulo de ataque ligeramente superior a 30°, lo que significa que las velas podrían desarrollar empuje útil en la mayoría de las condiciones.

Otra propiedad clave para el éxito de los sistemas de propulsión asistida por el viento utilizando velas rígidas es la capacidad de las mismas para ser arriadas. Mediante un mecanismo de arriamiento telescópico vertical, como el que se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, con un diseño cuyas secciones son crecientes en sentido vertical, las piezas superiores envuelven a las inferiores al arriarse, reduciendo notablemente el área expuesta y la altura de las velas. Esta característica es fundamental en

condiciones de vientos muy fuertes, cuando la estructura puede estar en riesgo; durante las maniobras en puerto, facilitando las tareas de carga y descarga; y en canales con restricciones al calado aéreo, permitiendo al buque navegar evitando obstáculos tales como puentes. Sin embargo, la solución retráctil añade una complejidad mecánica considerable y, una vez arriadas, incluso podría ocupar espacio en el interior del casco, impidiendo su uso para carga y afectando a la rentabilidad del buque.

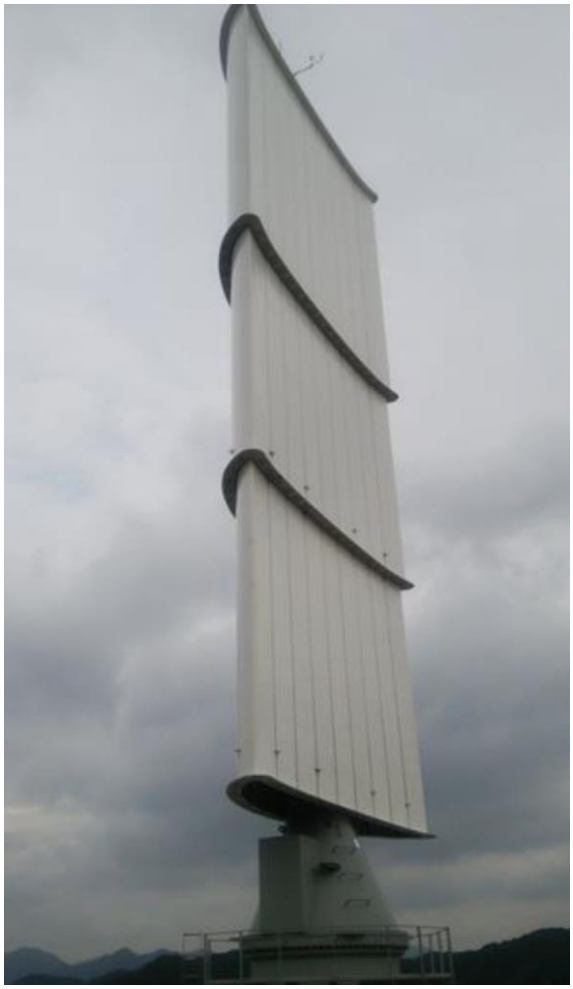

Figura 1. Modelo a escala de la vela del proyecto "UT Wind Challenger" [6][7]

La efectividad de la propulsión asistida por el viento mediante velas rígidas estará determinada por la capacidad para aprovechar la máxima energía eólica posible y evitar las situaciones desfavorables. Un factor a tener en cuenta es el gradiente vertical del viento. La velocidad del viento atmosférico disminuye al acercarse a la superficie, tanto del mar como de la tierra. Disponer una superficie vélica mayor en la parte superior de las velas, donde la velocidad del viento es más alta, podría suponer un mayor aprovechamiento de la energía.

Además, el beneficio que se pueda obtener de la velocidad del viento atmosférico reinante, dependerá de la posibilidad de ofrecer toda la superficie vélica al flujo de viento de forma óptima. Estas condiciones sólo se dan cuando un barco navega adrizado. Cuanto más escora el buque, más se reduce la superficie útil y menos viento pueden aprovechar las velas, con lo que se reduce la fuerza vélica y, en consecuencia, el empuje. Este efecto es muy significativo en pequeñas embarcaciones de vela, mientras que en buques de mayor porte debería atenuarse, aunque nunca despreciarse.

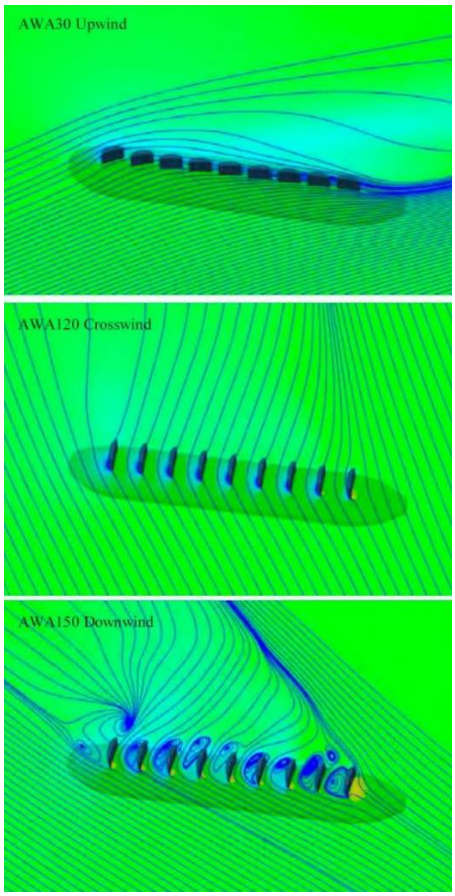

Figura 2. Modelo CFD para la interacción aerodinámica entre velas en cascada [6][7]

También existe un efecto adverso al instalar varias velas rígidas sobre la cubierta del buque (disposición conocida como “velas en cascada”). Es imprescindible instalar varias velas para conseguir el empuje necesario; es posible que, según la dirección del viento reinante, se produzca una interacción aerodinámica entre las diferentes velas. En la Figura 2 se puede apreciar esta interacción en un modelo CFD para diferentes ángulos de viento aparente. Rotando los mástiles individualmente, de modo que se adapten a las perturbaciones en el

flujo causadas por el resto de velas, se podría obtener el máximo empuje posible para cada condición de viento.

3. ESTUDIO DE APLICACIÓN DE VELAS RÍGIDAS A UN BUQUE GRANELERO

Teniendo en cuenta las referencias que sirvieron de inspiración para este trabajo, los tipos de buques que mejor se ajustan a la instalación de velas rígidas son los graneleros y los petroleros, siendo los graneleros los más adecuados debido a que suelen estar sometidos a menores presiones temporales que los petroleros [5].

Por este motivo, hemos estudiado el empuje logrado en un granelero, cuyas características principales se indican en la Tabla 1, al que se le instalarían tres velas rígidas.

L_{PP} [m]	180,00	Desplazamiento [t]	53.740
B [m]	30,00	Velocidad servicio [nudos]	15,00
D [m]	16,15	Peso muerto [t]	44.500
T [m]	12,10	Arqueo bruto [GT]	24.730
C_B	0,81	Potencia motor principal [kW]	12.240

Tabla 1. Características principales del buque bajo estudio

Para dimensionar las velas se han utilizado tres diseños diferentes, basados en modelos reales o en proyecto, que se resumen a continuación:

- Diseño Pioneer: empleado en el buque granelero japonés *Usuki Pioneer*, construido en 1984 en el astillero Usuki Iron Works, Ltd. Saiki Shipyard. Las dimensiones de sus velas rígidas son 20 m de manga y 15 m de altura.

- Diseño Cosco: la naviera china Cosco anunció en 2008 un acuerdo con la empresa australiana Solar Sailor para la instalación de velas rígidas en un petrolero y un granelero. Desgraciadamente, la naviera decidió no continuar con el proyecto, argumentando la dificultad de implantar las energías renovables en el comercio

marítimo. Estas velas de aluminio tendrían unas dimensiones de 12 metros de manga y 30 m de altura.

- Diseño Challenger: basado en el "Wind Challenger", proyecto desarrollado por la Universidad de Tokyo junto con las mayores navieras japonesas [6][7]. El buque estaría equipado con nueve velas rígidas extremadamente grandes (20 m de manga y 50 m de altura), fabricadas con un compuesto CFRP muy ligero. Se espera que generen suficiente empuje para propulsar un granelero de 180.000 TPM, a una velocidad de 14 nudos con una velocidad del viento de 12 m/s.

El proveedor de energía eólica para navegar a vela no es el viento atmosférico sobre el agua, sino un viento relativo originado en un sinfín de variaciones a partir del viento atmosférico y el viento causado por el avance del buque. Aunque habitualmente se habla de viento aparente, no se trata estrictamente de una fuerza aparente, sino de una fuerza real que permite generar la energía con la que las velas pueden desarrollar una potencia medible y conseguir el avance del barco.

Para el cálculo del viento aparente se emplea el triángulo de velocidades. Su composición es muy sencilla. El barco se mueve a una velocidad V_S siguiendo su rumbo y la composición de los vectores V_T, velocidad del viento real (el que sentiría el barco parado), y V_S, en la misma dirección pero en sentido contrario al avance del buque, genera por diferencia un vector de viento aparente V_A, que es el que siente el barco. El ángulo de viento aparente β es el determinado por los vectores V_S y V_A, mientras que el ángulo de viento real γ es el formado por los vectores V_S y V_T.

Para este trabajo se ha supuesto una velocidad del buque V_S = 10 nudos. Esta cifra es considerablemente inferior a la velocidad de servicio del buque estudiado (V_{SERV} = 15 nudos), pero teniendo en cuenta el interés en navegaciones lentas para reducir el consumo de combustible, sería una situación más realista para el cálculo del viento aparente que suponer que el buque navega a su velocidad de servicio, con el motor funcionando a una carga alta.

En cuanto a la velocidad del viento real V_T, se han supuesto tres velocidades distintas: 8, 14 y 18 nudos. Estas velocidades se corresponden con valores en la escala de viento Beaufort 3, 4 y 5; son valores bajos-medios de la escala, ya que consideramos más interesante comprobar los resultados obtenidos con vientos moderados. Además, se han supuesto tres

valores distintos para el ángulo de viento aparente β: 15°, 30° y 45°. De esta forma, para cada velocidad del viento real V_T se obtienen tres condiciones distintas, haciendo un total de nueve situaciones estudiadas.

Una vez obtenidos los valores de la velocidad de viento aparente V_A, el siguiente paso es calcular el empuje que dicho viento generará sobre la superficie de las velas. Según [6][7], el empuje T generado por las velas rígidas se puede expresar como:

$$T = 0{,}5 * \rho_a * V_A^2 * A * C_X \quad [kgf] \qquad (1)$$

Donde ρ_a es la densidad del aire, A es superficie vélica total y C_X es el coeficiente de empuje (parámetro variable de acuerdo con el ángulo de viento aparente β). Empleando (1) para los tres diseños de velas y las nueve alternativas de viento aparente V_A, junto con una predicción de la resistencia al avance y de la potencia necesaria para el buque granelero estudiado, se han obtenido los resultados indicados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Como se puede ver en la Tabla 2, los resultados obtenidos con el diseño Challenger son muy superiores a los conseguidos por los diseños Pioneer y Cosco. Esto se debe a que la superficie de las velas rígidas del Challenger es mucho mayor, siendo la única variable en la Ecuación 1 respecto a los otros diseños. Es interesante destacar que para cinco de las nueve alternativas del diseño Challenger se consiguen velocidades superiores a la velocidad supuesta del buque VS = 10 nudos. Al aumentar la velocidad del buque por encima de la propuesta, la velocidad del viento aparente VA también aumentará, provocando una retroalimentación hasta un valor límite. En la mejor alternativa (VT = 18 nudos, β = 15°), dicho valor límite se alcanza a una velocidad V = 15,357 nudos, mayor que la velocidad de servicio del buque bajo estudio VSERV = 15 nudos.

Aunque estos resultados se han obtenido a partir de un estudio básico, que no tiene en cuenta los posibles efectos adversos anteriormente mencionados (la escora del buque, un ángulo de ataque no ideal, la interacción aerodinámica entre las velas en cascada) ni la diferente disposición de las velas (que favorecería a los diseños verticales debido al gradiente vertical del viento), se puede concluir que los resultados conseguidos son estimulantes para profundizar en este campo de estudio y alcanzar el objetivo de crear un sistema de

propulsión híbrido más respetuoso con el medio ambiente, reduciendo significativamente las emisiones de CO2.

Alternativa para VA	Diseño Pioneer			Diseño Cosco			Diseño Challenger		
	T			***T*** **(kN)**	***V*** **(nudos)**	**% Ahorro Potencia**	***T*** **(kN)**	***V*** **(nudos)**	**% Ahorro Potencia**
(kN)	V (nudos)	% Ahorro Potencia	T	79,67	4,67	3,45%	219,28	7,93	15,22%
(kN)	V (nudos)	% Ahorro Potencia	T	59,63	4,01	2,21%	164,12	6,81	9,94%
(kN)	V (nudos)	% Ahorro Potencia		31,38	2,86	0,68%	86,37	4,87	3,89%
VT = 8 nudos				147,18	6,44	8,48%	405,11	10,93	38,18%
β = 15°	66,52	4,25	2,63%	126,81	5,95	6,83%	349,04	10,11	30,48%
VT = 8 nudos				98,46	5,21	4,72%	271,02	8,86	20,85%
β = 30°	49,79	3,65	1,65%	202,56	7,61	13,53%	557,53	12,92	61,80%
VT = 8 nudos				180,76	7,17	11,45%	497,53	12,18	52,07%
β = 45°	26,20	2,61	0,42%	149,78	6,49	8,70%	412,27	11,04	39,20%

Tabla 2. Empuje y velocidad generados por las velas y porcentaje de ahorro en la potencia necesaria para conseguir la velocidad de servicio VSERV = 15 nudos

4. PANELES SOLARES SOBRE LA SUPERFICIE VÉLICA.

Los barcos también pueden beneficiarse de la energía solar. La cubierta de un buque siempre está orientada al Sol, por lo que reciben una gran cantidad de esta energía de forma gratuita, siendo dicha energía un modo altamente beneficioso de producir energía eléctrica. Sin embargo, la cantidad de combustible ahorrado en buques grandes utilizando solamente la energía solar es relativamente pequeña.

Varias empresas han comenzado a desarrollar diseños de velas que, además de aprovechar la fuerza del viento, sean capaces también de utilizar la energía solar a través de paneles solares

en su superficie. El concepto de "vela energética" hace referencia a una vela rígida dispuesta en el buque, capaz de rotar automáticamente para sacar el máximo partido del viento y ayudar a propulsar el buque; al mismo tiempo, los paneles solares incorporados en la vela aprovechan la energía solar para proporcionar energía eléctrica y reducir la cantidad de combustible utilizado por los generadores auxiliares.

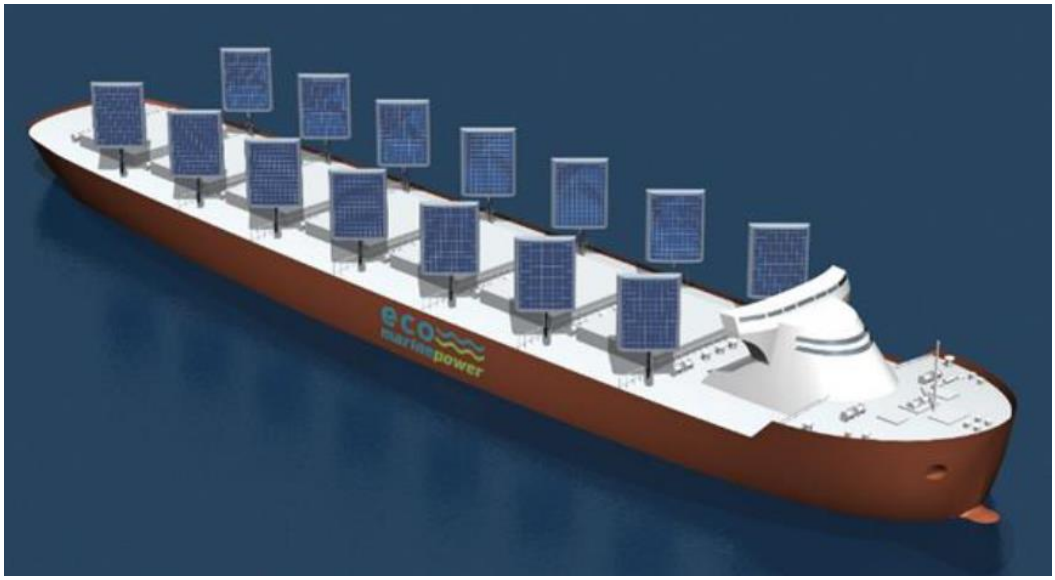

Figura 3. Proyecto de Eco Marine Power que incluye paneles solares sobre la superficie de sus velas rígidas [5]

Sin embargo, los paneles solares pueden usarse mientras el buque está en puerto, almacenando la energía en módulos de baterías y, potencialmente, proporcionar la totalidad de electricidad, totalmente libre de emisiones, necesaria para las operaciones mientras el buque no está en la mar.

Para introducir la energía solar en el buque es necesario convertirla en energía eléctrica. La electricidad puede ser usada y transportarse a lo largo de todo el buque. Las células fotovoltaicas son las encargadas de realizar la conversión de la energía solar en eléctrica. Se necesita convertir la corriente continua (DC) en corriente alterna (AC), de modo que la red eléctrica de 50 o 60 Hz pueda transportar la energía por el buque. Estas conversiones de la energía reducen la eficiencia total del sistema.

Tras analizar el mercado de los paneles solares, buscando aquellos modelos con las mayores eficiencias, aunque principalmente destinados a instalaciones terrestres con ambientes menos

agresivos que el marino, podemos hacernos una idea del estado de esta tecnología y asemejar su rendimiento al limitado espacio que supone una vela. El modelo escogido ha sido el panel X21-345-COM de la marca SunPower Corporation [8]. Los paneles de esta empresa estadounidense consiguen una eficiencia media del panel del 21,5% y entregan 345 W (en condiciones de prueba estándar de 25°C y una irradiancia solar de 1000 W/m^2).

5. APLICACIÓN DE LOS PANELES X21-345-COM A LOS DISEÑOS DE VELA CONSIDERADOS.

Partiendo de las dimensiones de los diseños de velas considerados anteriormente, se deben adaptar teniendo en cuenta las dimensiones de los paneles X21-345-COM (1559x1046x46 mm). Los paneles no se instalarían completamente pegados entre sí, sino que estarían ligeramente separados. Por ello, se ha decidido suponer una separación de 10 cm entre cada panel, tanto en el sentido de la manga como de la altura de la vela. Por otra parte, la instalación de los paneles no se realiza directamente en los extremos de las velas, sino que es necesario dejar un marco o borde. En este caso, se ha optado por considerar un marco de 1 metro de anchura.

De acuerdo con estas dimensiones, tanto del panel como de la separación entre paneles consecutivos y del marco de la vela, las dimensiones finales de las velas y el número de paneles solares que se instalarán en ellas se pueden ver en la Tabla 3.

La potencia que entregará cada panel solar dependerá, principalmente, de la temperatura de funcionamiento y de la cantidad de radiación solar que reciba. Si la vela no está bien orientada o las condiciones climáticas no son las idóneas, la irradiancia solar disminuirá significativamente, afectando al rendimiento de los paneles. Una pequeña zona de sombras puede provocar una gran pérdida de potencia entregada por el panel.

Al contrario de lo que podría pensarse, los paneles solares desarrollan una menor potencia a medida que aumenta su temperatura de funcionamiento. Esto se debe a varios motivos, que se pueden resumir en los siguientes:

- El ancho de la banda prohibida (espacio donde se lleva a cabo el proceso de conversión de la luz en energía eléctrica) disminuye al aumentar la temperatura.

- Los semiconductores, incluyendo las células solares, tienen estructuras de rejilla regular, con los átomos situados en posiciones fijas. El aumento de la energía cinética de los átomos al incrementarse la temperatura provoca que los movimientos de los átomos sean más rápidos y violentos, afectando al rendimiento de la célula solar.

- El aumento de la temperatura de la célula solar disminuye su tensión. Cuanto menor es la tensión, menor es la energía producida por la célula.

Diseño	**Altura de la vela (m)**	**Manga de la vela (m)**	**Superficie vélica (m^2)**	**Nº de paneles (vertical)**	**Nº de paneles (horizontal)**	**Nº paneles por vela**
Pioneer	15,172	20,236	307,021	8	16	128
Cosco	30,103	12,214	367,678	17	9	153
Challenger	50,011	20,236	1.012,023	29	16	464

Tabla 3. Dimensiones de las velas y número de paneles instalados en cada diseño.

Los fabricantes de paneles fotovoltaicos proporcionan, en la especificación de sus productos, los coeficientes de temperatura para la potencia, el voltaje y la corriente generada por los paneles. Para este estudio se utilizará el coeficiente de temperatura de potencia (C_{TEMP}) indicado en la especificación de los paneles X21-345-COM, cuyo valor es de -0,30 %/°C.

Teniendo en cuenta estos dos factores, temperatura de funcionamiento e irradiancia solar, se ha elaborado la Tabla 4 de potencia entregada, en kW, para cada uno de los diseños considerados. Se han variado los valores de temperatura de funcionamiento (T_X) e irradiancia solar ($\%_{IRR}$) para obtener una serie de valores en las diferentes condiciones posibles.

Como se puede observar en la Tabla 4, la energía eléctrica producida por la instalación de los paneles solares en la superficie de las velas es muy reducida, alcanzando únicamente un 5,59% de la potencia del motor principal para el diseño Challenger, con un 100% de irradiancia solar y una temperatura de funcionamiento de 25°C. Si toda la energía generada se invirtiese en propulsar el buque, no se alcanzarían los seis nudos.

$\%_{IRR}$	Diseño Usuki			Diseño Cosco			Diseño Challenger		
	T_X (°C)								
	5	25	45	5	25	45	5	25	45
10	14,043	13,248	12,453	16,786	15,836	14,885	50,905	48,024	45,143
20	28,086	26,496	24,906	33,571	31,671	29,771	101,811	96,048	90,285
30	42,129	39,744	37,359	50,357	47,507	44,656	152,716	144,072	135,428
40	56,172	52,992	49,812	67,143	63,342	59,541	203,622	192,096	180,570
50	70,214	66,240	62,266	83,928	79,178	74,427	254,527	240,120	225,713
60	84,257	79,488	74,719	100,714	95,013	89,312	305,433	288,144	270,855
70	98,300	92,736	87,172	117,499	110,849	104,198	356,338	336,168	315,998
80	112,343	105,984	99,625	134,285	126,684	119,083	407,244	384,192	361,140
90	126,386	119,232	112,078	151,071	142,520	133,968	458,149	432,216	406,283
100	140,429	132,480	124,531	167,856	158,355	148,854	509,054	480,240	451,426

Tabla 4. Potencia entregada, en kW, por los paneles solares para cada diseño de vela considerado.

A pesar de que las potencias generadas no serían aprovechables para la propulsión del buque, se podrían utilizar para equipos auxiliares, tales como la iluminación del buque, la carga de la habilitación, etc. La posibilidad de almacenar la energía generada en baterías hace que se pueda alimentar estos servicios tanto de día, cuando los paneles solares producen la energía y cargan las baterías, como durante la noche, descargándolas al aprovechar la energía almacenada.

6. CONCLUSIONES.

La propulsión asistida por el viento mediante velas rígidas para proporcionar empuje al buque es una opción prometedora, arrojando resultados muy interesantes. Tras estimar el empuje producido por las velas y aplicar los resultados a una predicción de la resistencia al avance y de la potencia propulsiva de un buque granelero de tamaño medio, en la mejor condición de viento obtuvimos resultados de dobles dígitos en ahorro de potencia propulsora

para los tres diseños considerados. Los resultados del diseño Challenger son extraordinarios dado que su superficie vélica triplica la de los otros diseños. Estos resultados no son más que una aproximación al potencial de esta tecnología y creemos que se debería profundizar en su investigación, realizando estudios más exhaustivos que tengan en cuenta todas las variables mencionadas en este trabajo.

En cuanto a la energía producida por los paneles solares y a pesar de los avances realizados en esta industria durante las últimas décadas, vemos que el potencial para propulsar buques mercantes de mediano y gran tamaño es realmente escaso. La eficiencia de los paneles solares comerciales todavía es inferior al 25%, por lo que es necesario un gran espacio en cubierta para alcanzar un nivel de potencia aceptable. A pesar de ello, esta producción de energía libre de emisiones puede resultar útil para alimentar servicios auxiliares del buque, tanto durante la navegación como en las estancias del buque en puerto, reduciendo la demanda de potencia a los motores del buque o a la red de suministro del puerto al aprovechar la energía almacenada en las baterías.

La aplicación de estos sistemas a un buque mercante todavía tiene que recorrer un camino lleno de incertidumbres. El empuje conseguido mediante las velas rígidas, su resistencia durante tormentas con fuertes vientos, la complejidad de los mecanismos de rotación de los mástiles o la instalación necesaria para emplear la energía generada por los paneles solares, por ejemplo, son algunos de los puntos clave que pueden afectar a la viabilidad económica del proyecto. Si estos factores no son analizados con la suficiente profundidad y aproximación a la realidad, las navieras recelarán de la tecnología y no apostarán por ella.

Los miembros de la comunidad naval debemos adelantarnos a las necesidades de la industria y entender la importancia de alcanzar una menor dependencia de los combustibles fósiles para la propulsión de los buques. Este hecho no radica solamente en el significativo ahorro económico que supone la reducción del consumo de combustible, sino en el impacto medioambiental que implica la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero y partículas contaminantes. La sociedad y las instituciones están cada vez más concienciadas de lo necesario que resulta conservar nuestro entorno natural de un modo respetuoso y sostenible, siendo nuestra obligación el avanzar hacia una nueva era de buques más ecológicos.

7. REFERENCIAS.

[1] Lloyd's Register Marine, "Wind-Powered Shipping," 2015.

[2] Det Norske Veritas, "Shipping 2020," 2012.

[3] T. Fujiwara, K. Hirata, M. Ueno, and T. Nimura, "On Aerodynamic Characteristics of a Hybrid-Sail with Square Soft Sail," Int. Offshore Polar Eng. Conf., vol. 5, pp. 326–333, 2003.

[4] L. Qiao, N. Yasunori, and I. Yoshiho, "A Study on Performance of Cascade of Wing Sails for Sail-equipped Vessels - Considering Their Aerodynamic Interaction," Isope, 2012.

[5] D. Pike, "The Motorship - The wind as fuel. http://www.motorship.com/news101/comment-and-analysis/the-wind-as-fuel 29," pp. 44–45, 2013.

[6] K. Ouchi, K. Uzawa, and A. Kanai, "Huge Hard Wing Sails for the Propulsor of Next Generation Sailing Vessel *," no. June, pp. 1–5, 2011.

[7] K. Ouchi, K. Uzawa, A. Kanai, and M. Katori, "' Wind Challenger ' the Next Generation Hybrid Sailing Vessel," no. May, pp. 562–567, 2013.

[8] SunPower Corporation, "SUNPOWER X-Series Commercial Solar Panels X21-345-COM," 2013. [Online]. Available: http://us.sunpower.com/sites/sunpower/files/media-library/data-sheets/ds-x21-series-345-commercial-solar-panels.pdf.