

MÁSTER UNIVERSITARIO EN NÁUTICA Y TRANSPORTE MARÍTIMO

TRABAJO FIN DE MÁSTER

INNOVACIÓN DE LA PROPULSIÓN EÓLICA EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO

Estudiante	<i>Gallardo Santos, Jorge</i>
Director/a	Díaz Tajada, Esperanza
Departamento	Ingeniería Minera y Metalúrgica y Ciencia de Materiales
Curso académico	<i>2020-2021</i>

Portugalete, Octubre, 2021

AGRADECIMIENTOS

Después de todo el camino recorrido que he realizado desde mis estudios obligatorios, pasando por el bachiller y el grado hasta la culminación de este trabajo de fin de Máster en Náutica y Transporte Marítimo, quiero agradecer la colaboración desinteresada de todas aquellas personas (familiares, amigos, docentes) que han facilitado la realización de este trabajo.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo ha sido analizar los proyectos y estudios de las nuevas formas de propulsión eólica. De esta manera, primero se analizan las diferentes formas de propulsión eólica y, por último, se estudian los proyectos existentes llevados a la práctica, es decir, los proyectos reales. Para la realización de este estudio se ha utilizado una comparación de un total de cuatro tipos de propulsión eólica. En la mayoría de los casos, el tipo de propulsión eólica dependerá del tipo de buque o del tipo de mercancía que vaya a transportar. El factor más importante es el combustible ya que ocupa un 80 % del coste total del transporte. Al instalar la propulsión eólica se reduce el uso de combustible pudiendo ahorrar hasta un 40%, siendo este uno de los principales resultados del estudio. Con los resultados obtenidos se concluye, que una pequeña inversión de capital para implementar una propulsión eólica, tiene como premio una disminución de combustible y, por ello, una reducción del coste del transporte. Por lo tanto, seremos una naviera competitiva llevando a cabo un transporte ecológico con el medioambiente.

Palabras clave: Innovación, propulsión eólica, buque, combustible, buque propulsado por el viento.

The objective of this work has been to analyze the projects and studies of new forms of wind propulsion. In this way, the different forms of wind propulsion are first analyzed and, finally, the existing projects implemented, that is to say, the real projects, are studied. To carry out this study, a comparison of a total of four types of wind propulsion has been used. In most cases, the type of wind power will depend on the type of ship or the type of merchandise to be transported. The most important factor is fuel since it occupies 80% of the total cost of transport. By installing wind propulsion, fuel use is reduced and can save up to 40%, this being one of the main results of the study. With the results obtained, it is concluded that a small capital investment to implement wind power has the reward of a reduction in fuel and, therefore, a reduction in the cost of transport. Therefore, we will be a competitive shipping company carrying out a green transport with the environment.

Key words: Innovation, wind power, ship, fuel, wind powered ship.

Lan honen helburua haize bidezko propulzio modu berrien proiektuak eta azterketak aztertzea izan da. Modu honetan, haize bidezko propulzio modu desberdinak aztertzen dira lehenik eta, azkenik, burututako proiektuak, hau da, benetako proiektuak, aztertzen dira. Azterketa hau egiteko, haize propulsioko lau motaren konparazioa erabili da guztira. Kasu gehienetan, haize propulzio mota itsasontzi motaren edo garraiatu beharreko salgaien motaren arabera izango da. Faktore garrantzitsuena erregaia da, garraioaren kostu osoaren% 80 hartzen baitu. Haizearen propulzioa instalatuz erregaiaren erabilera murriztu egiten da eta% 40ra arte aurreztu daiteke, hori izan da ikerketaren emaitza nagusietako bat. Lortutako emaitzekin ondorioztatu da haize propulzio bat ezartzeko kapital inbertsio txikiak erregaiaren murrizketa eta, beraz, garraioaren kostua murriztearen saria duela. Horregatik, garraio berdea ingurumenarekin garraiatzeko konpainia lehiakorra izango gara.

Hitz gakoak: Berrikuntza, energia eolikoa, itsasontzia, erregaia, haize bidezko ontzia.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN	3
ÍNDICE.....	5
LISTADO DE FIGURAS.....	6
LISTADO DE ACRÓNIMOS	7
INTRODUCCIÓN	8
IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.....	11
OBJETIVOS	14
BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO	16
CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA GLOBAL	18
TIPOS DE PROPULSIÓN EÓLICA	22
ROTOR FLETTNER	23
VELA RÍGIDA	27
COMETA	33
CASCO - VELA.....	39
CASOS REALES	41
E-SHIP 1	42
SHIN AITOKU MARU	45
AQUA CITY	47
THESEUS	49
SC CONNECTOR	50
RESULTADOS	51
CONCLUSIONES	53
BIBLIOGRAFÍA	56
ANEXO I: CARACTERÍSTICAS DE LOS BUQUES QUE CONFORMAN LOS CASOS REALES.....	60

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Esquema circulación atmosférica global

Figura 2. Efecto Magnus

Figura 3: Diagrama de las fuerzas que actúan en un rotor Flettner

Figura 4. Buque *Baden Baden*

Figura 5. Buque Barbara atracado en Barcelona.

Figura 6. Tipos de velas tradicionales

Figura 7. Esquema de innovaciones de las velas rígidas

Figura 8. Pesquero *Balueiro Segundo*.

Figura 9. Buque *Naumon*.

Figura 10. Buque *Black Pearl*.

Figura 11. Diferentes rumbos posibles en función de la dirección del viento.

Figura 12. Buque *MS Beluga*.

Figura 13. Esquema sistema de izado y arriado cometa.

Figura 14: Fuerzas que actúan en una cometa.

Figura 15. Portacoches de Vindskip & Høglund Marine.

Figura 16. Prototipo Vindskip.

Figura 17. Buque "*E-Ship 1*".

Figura 18. Ilustración sistema magnus y rumbos posibles en función del viento.

Figura 19. Buque *Shin Aitoku Maru*.

Figura 20. Buque granelero *Aque city*.

Figura 21. M/V *THESEUS*.

Figura 22. M/V *SC Connector*.

Figura 23. Representación de los costes en el transporte marítimo.

Figura 24. Representación gráfica de tres tipos de propulsión eólica existentes.

LISTADO DE ACRÓNIMOS

UE → Unión Europea

IMO → Organización Marítima Internacional

CO₂ → Dióxido de Carbono

OR.PA.GU → Organización de Palangreros Guardeses

M/V → Motor Vessel

GNL → Gas Natural Licuado

NKK → Astillero *Nippon Kokan*

GRT → Gross Register Tonnage / Toneladas de Registro Bruto

DWT → Deadweight Tonnage / Tonelaje de Peso Muerto

Ro-Ro → Roll on – Roll off / Carga rodada

kW → Kilowatio.

MW → Megawatio

INTRODUCCIÓN

En el presente estudio se realiza un análisis de la investigación del transporte marítimo centrado en la propulsión eólica. Para analizar esta innovación es necesario mencionar la problemática que ha llevado a desarrollar otros tipos de propulsión.

La causa principal es el elevado consumo de combustible utilizado con los motores convencionales de fuel y diésel. Existiendo otras causas que también han generado esta investigación de la innovación de la propulsión, como es el papel del combustible en el precio del transporte de mercancías, ya que representa hasta un 80 por cien del precio total. Otras de las causas, son las emisiones de óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, dióxido de carbono y partículas en suspensión provocadas por el consumo de combustibles derivados del petróleo en el transporte marítimo. Es decir, un transporte marítimo más sostenible. [1]

Mi principal interés es la búsqueda de nuevas formas de propulsión para los buques mercantes. Para poder llevar a cabo esta búsqueda, he tenido que revisar diferentes artículos, tesis y monografías para poder contrastar la información de las diversas fuentes y así poder sacar unas conclusiones propias basadas en los estudios de fuentes externas.

La característica principal es el estudio de las diversas formas de propulsión existentes, siempre centrándome en la propulsión eólica. Hoy en día, los buques tienen una propulsión dual con un motor convencional funcionando a diésel o a fuel. Pero cada vez más navieras optan por implementar el transporte más ecológico en sus buques, sin que haya mucha pérdida de velocidad, que se traduce en pérdida de tiempo y por lo tanto de dinero.

El interés de este estudio es de importancia económica, debido a que el combustible ocupa entorno a un 80 % del costo total del transporte; y medioambiental, porque esta reducción de combustible significa una reducción de la emisión de gases a la atmósfera que representa cifras notables, sabiendo que el 90 % de las mercancías son transportadas por vía marítima.

En el ámbito profesional, es importante tener conocimiento de nuevas formas de propulsión, para poder saber desempeñar tus competencias en el trabajo laboral, ya que afecta a tu sector de trabajo. Los más interesados en la innovación de nuevas formas de propulsión, son los que tienen que pagar el fuel o diésel consumido, que se traduce en los costes del transporte de las mercancías. Por lo tanto, si reducimos el consumo de combustible, se reducirán los costes del transporte marítimo, debido a que el combustible representa al 80% del coste del transporte de mercancías. Además, se reducirá la emisión de gases de efecto invernadero y otras partículas contaminantes.

La metodología empleada consiste en una comparación de un total de cuatro tipos de propulsión eólica, y posteriormente se procede a describir los casos reales de los tipos de propulsión eólica que se han llevado a cabo en la realidad. De esta manera, se pueden obtener unas conclusiones [2]. En la mayoría de los casos, el tipo de propulsión eólica dependerá del tipo de buque o del tipo de carga que transporte, debido a la importancia de la velocidad, que será uno de los factores a tener en cuenta, ya que va en función del tiempo. [3]

Los objetivos de este trabajo constan en analizar los proyectos y estudios de las nuevas formas de propulsión eólica, posteriormente, compararlos para poder sacar las ventajas y desventajas de las diferentes formas de propulsión eólica y, por último, proyectos existentes llevados a la práctica, es decir, proyectos reales.

IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

El 90% del comercio mundial de mercancías se lleva a cabo por vía marítima donde se transportan mil millones de toneladas al año. Para esto se utiliza una flota de más de 85.000 buques que hay en nuestros mares y océanos.

Dichos buques consumen más de 400 millones de toneladas de combustible al año. Esto quiere decir, que produce del 2.8 al 3 por ciento de la emisión total de gases de efecto invernadero, principalmente la emisión de CO₂ [4]. Los efectos que pueden provocar estas emisiones son la generación de lluvias ácidas que se depositan en los suelos y efectos perjudiciales para la salud humana que se pueden traducir en fallecimientos prematuros.

En el Parlamento Europeo se votó a favor de establecer requisitos vinculantes para que las compañías navieras reduzcan sus emisiones de CO₂ en al menos un 40% para 2030. [5] Las medidas más destacadas para que el sector marítimo sea más limpio y eficiente y así, llegar al pacto verde europeo son:

- La eliminación progresiva del petróleo pesado con compensaciones mediante exenciones fiscales sobre combustibles alternativos.
- Reducción de emisiones de carbono (descarbonización), digitalización y automatización de los puertos europeos.
- Acceso regulado a los puertos de la UE para los barcos más contaminantes y mejoras técnicas, como la optimización de la velocidad de los barcos e innovación en los sistemas de autopropulsión hidrodinámicos.

Hasta la actualidad, no existían requisitos de la UE para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en los buques. [6]

El reglamento IMO 2020, entró en vigor el 1 de enero de 2020, con el fin de reducir el contenido máximo de azufre en los combustibles, del actual 3.5 % al 0,5%, para así, reducir las emisiones de óxido de azufre provenientes de los buques. Dicha sustancia contribuye a la contaminación ambiental y a la destrucción de la capa de ozono, por ello es de vital importancia regular estas emisiones. [7]

Para reducir esta contaminación y hacer que el transporte marítimo sea sostenible, muchos investigadores han sugerido el uso parcial y / o total de la energía eólica para el transporte marítimo. De esta manera, se pretende conseguir un transporte ecológico con el medioambiente, más allá de la era de los combustibles fósiles. [8]

Con este estudio se barajan diferentes tipos de propulsión eólica que ayudan a reducir las emisiones y el consumo de combustible. Para así, reducir el impacto medioambiental tan elevado que representa el transporte marítimo global.

Hoy en día, existen diferentes proyectos de buques totalmente ecológicos sin uso de motores de combustión, por lo tanto, no necesitan combustibles fósiles. El problema más importante es el tiempo, sobre todo en el caso de las navieras, debido a que el transporte de mercancías y de pasaje deben de ser de manera rápida, y cada vez, cobra más importancia el tiempo. Por lo tanto, a la hora de implementar cualquier tipo de propulsión eólica es importante conocer cuál va a ser la zona de navegación, debido en este caso, del viento. Si el buque va a realizar rutas en zonas dónde confluye mucho viento, tendrá mejor rendimiento y su implementación será más adecuada en este tipo de escenarios. [9]

OBJETIVOS

Partiendo de la base, que se trata de un estudio, se desarrollarán nuevas líneas de investigación para crear nuevos tipos de propulsión eólica y avanzar con la investigación de los diferentes tipos de propulsión eólica existentes. [10]

La intención de este trabajo consiste en analizar los distintos proyectos y formas de propulsión eólica aplicados a los buques para así mejorar el transporte marítimo. De esta manera, se procede a analizar los cuatro tipos de propulsión eólica y así, poder obtener como resultado una comparación de las diferentes formas de propulsión eólica y, por último, un análisis de los proyectos existentes llevados a la práctica, es decir, los proyectos reales.

Las consecuencias medioambientales y el ahorro de combustible son otros de los objetivos a tratar. Gracias a la reducción de emisión de gases hacia la atmósfera reduciendo el uso de los motores principales, se obtiene un ahorro de consumo de combustible. Teniendo en cuenta que el 80% de los costes operativos del transporte es el combustible, entonces si conseguimos un ahorro de combustible, abarataremos el precio del transporte.

Un dato interesante e impactante, es la comparativa de las emisiones de azufre generadas por los 16 buques más grandes del mundo es equivalente a las emisiones producidas por la flota mundial de vehículos. Debemos de tener en cuenta que el combustible utilizado en los grandes buques contiene 3.500 veces más azufre que el diésel.

Como resultado, llegaremos a ser una naviera con una flota de buques eficientes y promoviendo un transporte marítimo sostenible para el planeta.

BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

Gracias a la innovación de la propulsión eólica hace que el sector del transporte marítimo prospere día a día. Con esta dualidad de propulsión, podemos proporcionar mayor seguridad al transporte en caso de pérdida de uno de los dos sistemas de propulsión y, de esta manera, se puede tener la posibilidad de utilizar otro. Se estudiarán diversos beneficios en este trabajo, tal y como se irá analizando a continuación, como, por ejemplo, el ahorro de combustible es uno de los beneficios más relevantes.

Otro beneficio a tener en cuenta, es el conocimiento de otros medios de propulsión alternativos a los convencionales, en este caso se analizan los medios de propulsión eólicos. Si se tiene en consideración el porcentaje que ocupa el consumo de combustible en el transporte marítimo, se observa que ocupa el 80 por ciento del coste total del transporte por vía marítima. Por lo tanto, se produciría una bajada de los precios del transporte. [11]

Por medio de este trabajo, se pretende abrir un abanico de posibilidades con los diferentes tipos de propulsión eólica que existen en el mercado y se pueden aplicar en buques mercantes y en buques privados.

Por último, la gran repercusión de las emisiones contaminantes generadas tanto por la flota mundial de buques o de vehículos, por ejemplo, se pretenden reducir por medio de una nueva regulación promovida por la IMO (Organización Marítima Internacional). En la cual, se pretenden reducir las emisiones de azufre y de CO₂ del transporte de mercancías por mar. A continuación, se explicarán diferentes tipos de propulsión eólica aplicables a buques mercantes y posteriormente, casos reales de los distintos tipos de propulsión eólica.

CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA GLOBAL

Uno de los factores más importantes de este trabajo es el viento, debido a que en este estudio se tratan diferentes tipos de propulsión eólica aplicables a distintos tipos de buques. Por ello, se dedica este apartado al viento en la navegación marítima. [12]

El viento es la circulación de masas de aire, provocada por diferentes causas, pero con un denominador común: el gradiente de energía. La Tierra recibe del Sol luz y calor, pero a causa del grado de inclinación sobre su eje, las zonas ecuatoriales y tropicales son las que reciben la mayor parte de esta energía, estableciéndose un gradiente entre el ecuador y los polos. Este gradiente de energía es el que determina la circulación general de la atmósfera, funcionando como una bomba que traslada el calor ecuatorial hacia ambos polos.

A pequeña escala, es posible visualizar este gradiente en las brisas terrestres y marinas. Durante el día, la tierra se calienta más rápido que el mar, provocando el ascenso del aire superficial, por diferencia de densidad, en la atmósfera. Esto provoca bajas presiones relativas que facilita la entrada de aire del mar, más frío. Son las denominadas brisas marinas. Durante la noche sucede el fenómeno contrario. La tierra pierde con más rapidez que el mar el calor acumulado durante el día. Esto provoca un ascenso del aire marino (más cálido) y, en consecuencia, bajas presiones relativas sobre el mar. El aire marino ascendente es reemplazado por aire procedente de la tierra, más frío. Son las denominadas brisas terrestres.

No solo influye este calentamiento desigual, también depende de otros factores como son el movimiento de rotación de la tierra, la disposición del mar y la tierra y las propiedades que tiene el aire.

Una vez se entiende que las grandes masas de aire se mueven de zonas de altas presiones, que son las que tienen menos calentamiento, es decir altas latitudes hacia zonas de bajas presiones, que son las que reciben mayor calentamiento, se refiere a zonas ecuatoriales.

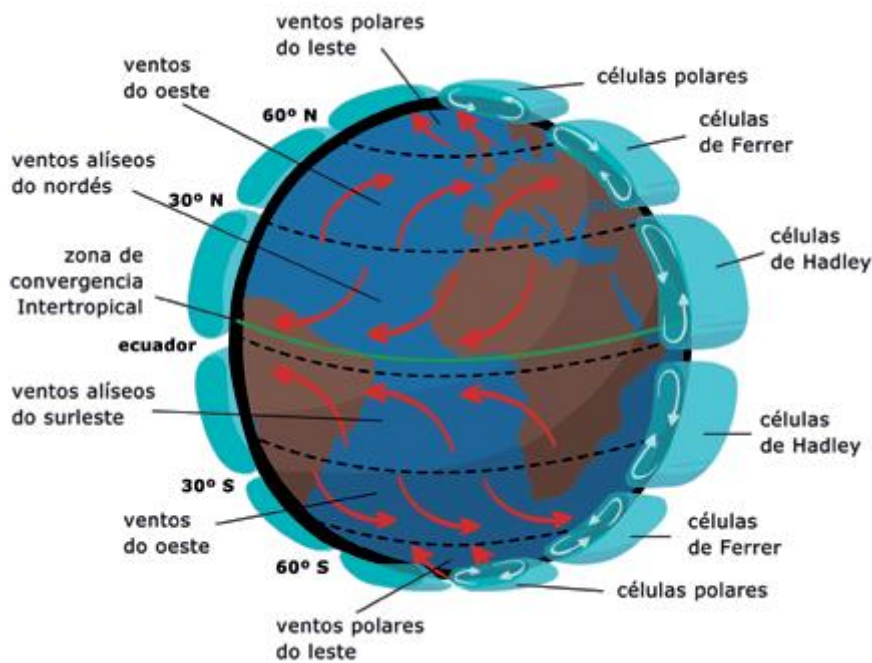


Figura 1. Esquema circulación atmosférica global

https://www.ceupe.com/images/easyblog_images/157/b2ap3_thumbnail_figura-4.png

Se denomina célula de Hadley a la zona próxima al ecuador, donde la masa de aire caliente asciende y el frío de los polos desciende, formando una gran célula convectiva en cada hemisferio, así lo explico George Hadley en el siglo XVIII. [13]

Se ha de tener en cuenta que no solo afecta el calentamiento de las masas de aire, sino que hay otros factores que intervienen, como son las posiciones y los relieves de los continentes y océanos y el efecto Coriolis.

Como se puede observar en la ilustración, en la zona del ecuador y sobre los 60 grados de latitud norte y sur aparecen bajas presiones, es dónde el aire desciende. Por el contrario, en ambos polos y entre los 30 y 40 grados de latitud se dan las altas presiones, donde el aire desciende.

De esta forma, no existen vientos con direcciones norte-sur, suelen tener direcciones oblicuas o perpendiculares a los meridiones debido al efecto Coriolis. Este efecto es causado por el movimiento rotacional de la tierra de Oeste a Este, siendo la velocidad de rotación mayor en el ecuador que en los polos. Por lo tanto, debido a estas fuerzas del efecto de Coriolis, cualquier fluido que se desplace horizontalmente sobre la superficie terrestre tiende a desviarse hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur. [14]

TIPOS DE PROPULSIÓN EÓLICA

ROTOR FLETTNER

Actualmente, vivimos en una era en la que nos centramos en mejorar y optimizar todo lo que podamos. Por lo tanto, el ahorro de energía es uno de los principales objetivos. El Rotor Flettner consta de un cilindro en rotación, el cual crea un empuje debido a que las moléculas de aire se quedan adheridas a su superficie.

El rotor Flettner es un tipo de propulsión eólica basado en el efecto Magnus, el cual dice “Un objeto en rotación afecta a la trayectoria del mismo a través de un fluido, como es el aire”. Como, por ejemplo, el efecto producido en el balón de fútbol cuando los futbolistas golpean la pelota y le provocan una desviación en su trayectoria. [15]

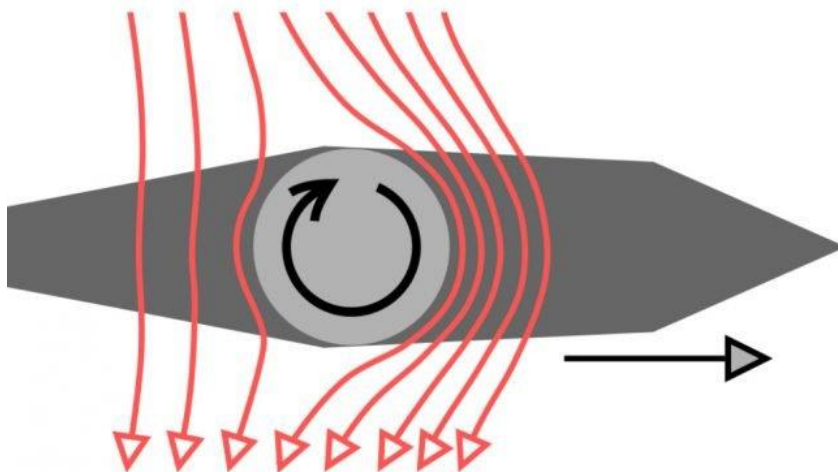


Figura 2. Efecto Magnus (Fuente: <https://okdiario.com/img/2018/11/20/descubre-que-es-el-efecto-magnus-655x368.jpg>)

Dicho rotor consta de un cilindro giratorio colocado verticalmente sobre la cubierta de un buque. Este, giran en un fluido, que es el viento y producen una fuerza que es perpendicular a la dirección del viento y será la que propulse al buque. Si comparamos la fuerza que podría ejercer una vela de las mismas dimensiones que el cilindro, ésta podría equivaler a 10 veces la ejercida por la vela convencional. [16]

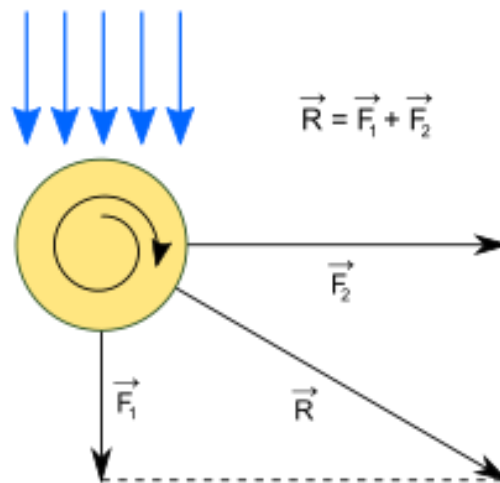


Figura 3: Diagrama de las fuerzas que actúan en un rotor Flettner. Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flettner_rotor_forces.svg

La patente de Flettner se llevó a cabo en 1922 y fue probado por primera vez en 1924 por Anton Flettner y asistido por Albert Betz, Jacob Ackeret y Ludwig Prandtl, transformaron una goleta de tres mástiles llamada Buckau, en un barco birrotor, con dos rotores en disposición vertical sobre la cubierta, dicho buque lo renombraron como Baden Baden. Realizaron la ruta Danzig hasta Escocia con tan solo dos rotores y un motor auxiliar en caso de que no hubiera viento. Se demostró que fueron más eficientes que las velas tradicionales, llegando a ser diez veces más eficaz que un velamen tradicional.

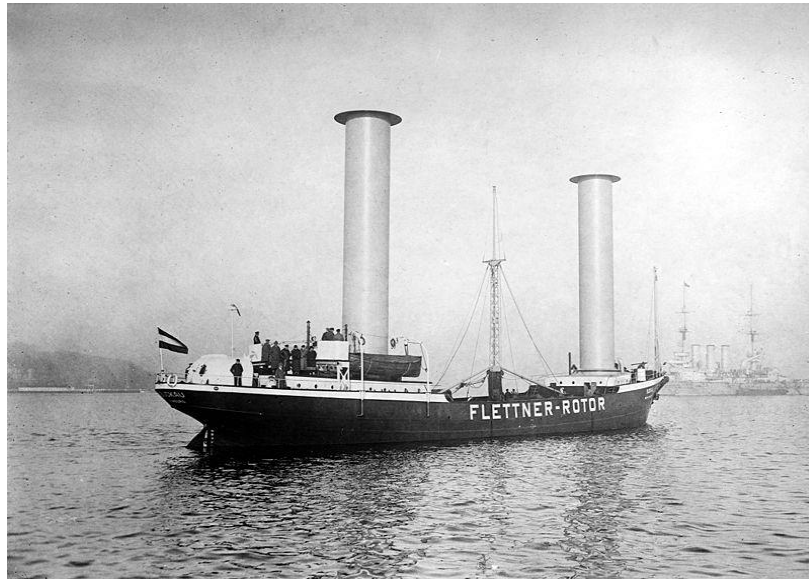


Figura 4. Buque *Baden Baden*. Fuente:

https://vadebarcos.files.wordpress.com/2014/04/800px-buckau_flettner_rotor_ship_loc_37764u.jpg

El buque mercante *Bárbara* cuyo puerto de origen es Hamburgo, fue el primer buque comercial equipado con rotores Flettner y el segundo buque en disponer de rotores como medio de propulsión. El primer viaje que realizó fue desde el puerto base de Hamburgo, recalando en diferentes puertos españoles como fue Santander, Bilbao, Málaga y Barcelona.

Anton Flettner y su esposa, embarcaron en el *Barbara* animando y presentando su invento por los puertos que recalaba, llegando a puertos italianos. De esta forma, querían pregonar la versatilidad de poder tener un buque con rotores posible de realizar rutas comerciales y con un gran potencial para el futuro de la propulsión naval. [17]



Figura 5. Buque Barbara atracado en Barcelona. Fuente:

<https://envisitadecortesia.files.wordpress.com/2020/09/barbara-07-anc.jpg?w=541>

Los rotores Flettner no tuvieron éxito debido a la difícil competitividad que tenían frente a los combustibles fósiles. Pero en 2008 con la construcción del E-Ship 1, volvieron los rotores Flettner al combate sobre la innovación de la propulsión eólica. Hasta el 2010 no pudieron hacerse las pruebas de mar y realizar su primer viaje en carga.

VELA RÍGIDA

Primeramente, debemos de conocer la definición de aparejo, como el conjunto de velas, arboladura y jarcia de un barco. Siendo la arboladura, el conjunto de mástiles y vergas, y con respecto a la jarcia se refiere a los cabos que conforman el aparejo.

Podemos agrupar en dos diferentes tipos de velas para la propulsión eólica, por una parte, las tradicionales o velas blandas (soft sails), y las rígidas (Rigid sails). La gran diferencia entre ambas es, las tradicionales son las que se realizan con materiales flexibles y las que han sido comúnmente conocidas a lo largo de la historia.

Respecto al inicio de la vela tradicional no se conoce el lugar donde comenzó, pero se cree que empezó alrededor del 3000 a.C. en el antiguo Egipto faraónico. Las velas utilizadas eran velas cuadras con un mástil central y fabricadas con corteza de papiro. Solo podían utilizarse con vientos de popa, por ello estaban provistos de remos para navegar donde el viento no les permitiese. [18]

A lo largo de los años, después de diversas formas geométricas que han adquirido las velas, aparecen las velas de cuchillo, triangulares o latinas, para así poder navegar contra el viento, ciñendo, a un ángulo determinado al viento. No se sabe su origen exacto, pero se cree que data del siglo III en la Polinesia o el océano Índico.

Entre las velas tradicionales, podemos diferenciar diferentes tipos de velas que podemos agrupar en velas de cuchillo y las velas cuadradas.



Figura 6. Tipos de velas tradicionales. Fuente: <http://3.bp.blogspot.com/-H4fCsrhNK8g/VWVygvswnI/AAAAAAAAAFI/kduzQcCbjUY/s1600/Dibujo.jpg>

Entre los distintos tipos de velas nombrados en la ilustración anterior, cabe destacar las diferentes formas que tienen las velas, las cuales tienen diferentes usos y han ido evolucionando a lo largo de la historia.

Mayormente las velas que tienen una forma más cuadrada, son para vientos portantes, que provengan de la parte de popa. Y, por el contrario, las velas del tipo de cuchillo, son más pensadas para poder hacer rumbos de ceñida, es decir, para vientos provenientes de la amura al través del barco, pudiendo trabajar con vientos de aleta o de popa también.

En el uso de velas rígidas como propulsión eólica en buques, cabe destacar una empresa que es un startup, la cual, ha desarrollado un sistema de velas rígidas, plegables y autónomas, pudiendo ser integradas en diversos tipos de buques. Esta empresa se denomina *Bound4blue*. [19]

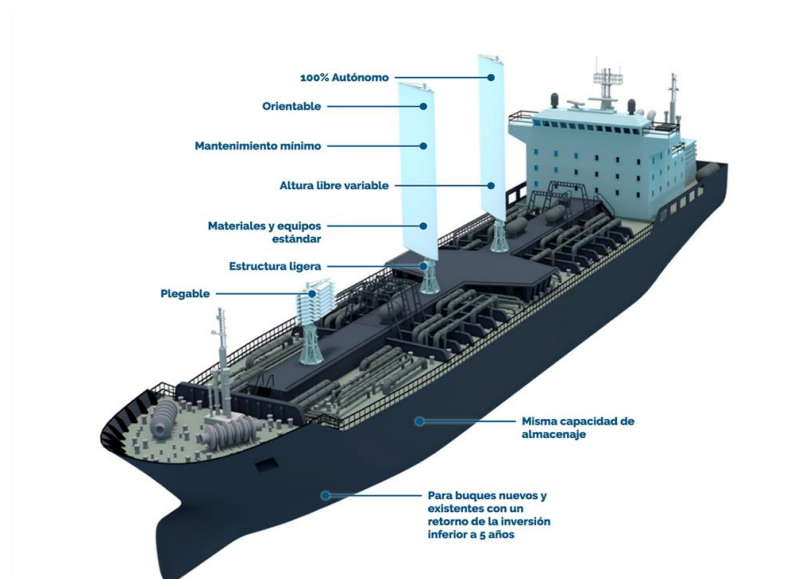


Figura 7. Esquema de innovaciones de las velas rígidas. Fuente:

<https://www.hibridosyelectricos.com/media/hibridos/images/2019/05/02//2019050212223636945.png>

El avance es tan elevado, que es totalmente autónomo, sin necesidad de aumentar la tripulación propia del buque. Los materiales de los cuales pueden ser fabricadas las velas son el acero, el aluminio o la fibra de vidrio. Dichas velas son plegables de forma que permite ejercer la operatividad total del buque cuando sea necesario. Puede llegar a ser amortizable en 3 o 4 años.

Coexisten una serie de competencias que lo hacen ser un atractivo sobre todo para buques que realicen rutas por zonas donde haya una intensidad considerable de viento.

Los primeros proyectos que están en curso son, un pesquero con 37 metros de eslora de la Organización de Palangreros Guardeses (OR.PA.GU)



Figura 8. Pesquero *Balueiro Segundo*. Fuente:

<https://bound4blue.com/upload/media/technology/0001/01/96f3b45c65f110a705ef1176960ab8d20aca9909.jpeg>

Y, el buque Naumon, un buque teatro de 60 metros de eslora perteneciente a la compañía teatral, La Fura dels Baus. Dicha expedición marítima se puso en marcha en 2004 con la intención de realizar la vuelta al mundo con una iniciativa pionera llevando la ciencia y el arte de puerto en puerto.

El objetivo de *La Fura dels Baus* es concienciar a la gente sobre el medioambiente y promover un desarrollo sostenible. Por ello, la empresa *Bound4Blue*, está fabricando una vela rígida para fomentar la propulsión eólica entre otras de las energías renovables existentes.



Figura 9. Buque *Naumon*. Fuente:

<https://bound4blue.com/upload/media/technology/0001/01/6ead5d835b8b9cb7aab45a4024b56f9c9b47a09d.jpeg>

Gracias al empuje del viento en las velas, el buque puede reducir las revoluciones del motor principal y de esta manera, reducir el consumo del mismo. Aseguran un ahorro de combustible y reducción de emisiones contaminantes en hasta un 40%, según la empresa *Bound4blue*.

Además de las velas rígidas, cabe destacar un tipo de velas que tienen una dualidad funcional, por una parte, la propulsión eólica y por otra, ser alimentadas por energía solar. Dicho tipo de velas se consideran muy interesantes desde el punto de vista ecológico, las cuales se les toma mucho interés en este estudio.

Entre los diferentes tipos de velas, cabe destacar las velas hechas con paneles solares flexibles, como es el caso del innovador velero privado *Black Pearl*. Es uno de los veleros privados más largos y caros, cuenta con 106 metros de eslora y se estima un valor de 220 millones de dólares. [20]

La característica más destacable y principal de este yate a vela es su dualidad híbrida de poder viajar utilizando la energía eólica y la energía solar gracias a sus innovadoras velas flexibles.



Figura 10. Buque *Black Pearl*. Fuente:

<https://cdn.cnn.com/cnnnext/dam/assets/190128173658-oceanco-black-pearl-9-exlarge-169.jpg>

COMETA

Las primeras cometas datan del año 1200 a.C, fueron utilizados por los chinos como dispositivos de señalización militar. Posteriormente Benjamín Franklin (1752) demostró, haciendo volar una cometa con una llave en su extremo, que las nubes estaban cargadas de electricidad. En 1980 Miles LLOYD demostró que la velocidad relativa del aire y la fuerza de arrastre de la cometa se podrían incrementar haciendo volar ésta en dirección perpendicular a la dirección del viento. En 2001, M. Diehl estudió modelos predictivos de control no lineal de la trayectoria de las cometas.

Las cometas o kites tienen numerosas ventajas frente a otros sistemas de propulsión. Primeramente, no requieren de mástiles en cubierta, puede generar hasta 25 veces más energía que una vela convencional, se puede instalar en casi cualquier buque, con unos costes de inversión bajos. La zona de vuelo está comprendida entre los 100 y los 300 metros de altitud sobre el nivel del mar, por lo tanto, hay una velocidad de viento más elevada. [21]

Existen cometas de gran tamaño como sistema de propulsión eólico utilizado como fuerza de arrastre combinado con los motores principales de propulsión. Los costes de inversión son más bajos que otros sistemas de propulsión y tienen una mayor eficiencia de ahorro energética.

El sistema utilizado por la empresa *SkySails* está compuesto por tres componentes: una cometa, un dispositivo de piloto automático que proporciona un manejo más fácil y mayor fiabilidad; y un sistema de guía de ruta que elige la ruta óptima en función de la meteorología y las características del barco.

Una de las ventajas frente a las velas convencionales es que apenas causan pequeños ángulos de escora y no necesitan lastre. Debido a la posición del punto de anclaje que se sitúa muy bajo, y el momento escorante que es mucho menor comparando con las velas convencionales.

Según los datos que aporta la empresa SkySails, pueden llegar a alcanzar un 50% de ahorro de combustible en condiciones óptimas de viento y una media del 35% en condiciones normales de viento.

Siempre debemos de tener en cuenta que abaratar en el consumo de combustible es directamente proporcional con la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero y la reducción de costes del transporte marítimo.

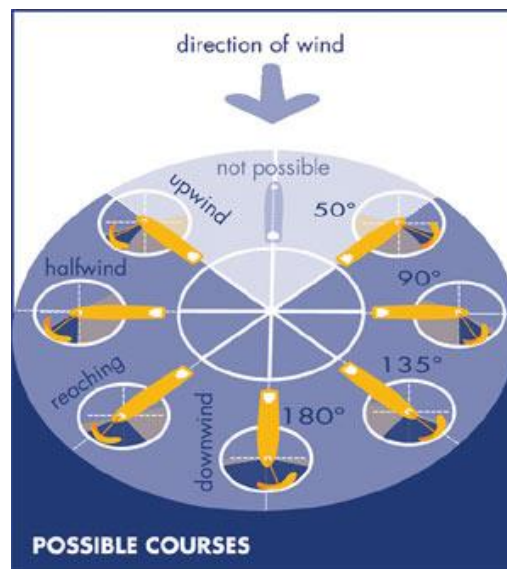


Figura 11. Diferentes rumbos posibles en función de la dirección del viento.

Fuente: https://www.vos.noaa.gov/MWL/apr_09/Images/skysailsImg1.jpg

Hay que tener en cuenta, que también existen inconvenientes, uno de ellos, es que no pueden ser utilizados en rumbos contra el viento, ya que el funcionamiento de la cometa consiste en una fuerza creada por el viento contenida en toda el área de la cometa pudiendo así tirar del buque. Por ello, cuando el viento está por delante del barco, no puedo tirar del mismo.

Cuando la cometa se encuentra en vuelo, la maniobrabilidad se restringe, no podemos ir en contra del viento, y se corre el riesgo de que se caiga al agua, particularmente en nuestra derrota. Por ello, no se debe de usar en áreas con tráfico marítimo denso ni tampoco cuando los vientos sean de baja intensidad.

En 2006, se instaló un sistema de cometa en un buque de carga, MS Beluga Skysails, con 132 metros de eslora. La cometa tenía una superficie de 160 metros cuadrados y gracias a un ordenador que lo controla puede reducir el consumo de combustible hasta en un 20 %.



Figura 12. Buque *MS Beluga*. Fuente:

https://www.vos.noaa.gov/MWL/apr_09/Images/skysail.jpg

SkySails es la primera empresa que ha desarrollado la tecnología de las cometas como aplicación industrial, cometas de hasta 400 metros cuadrados que ofrecen hasta 2000 kW de potencia de propulsión.

La compañía Cargill firmó un acuerdo con Skysails en 2011, para equipar al mayor buque asistido con una cometa de 320 m² en un buque de 28.500 toneladas de peso muerto y 170 metros de eslora, llamado M/V Aghia Marina. [22]

Hoy en día, hay dos grandes empresas que desarrollan sistemas de propulsión eólica con cometas para aplicar a buques. Una es la compañía americana, KiteShip y la otra, la compañía alemana SkySails.

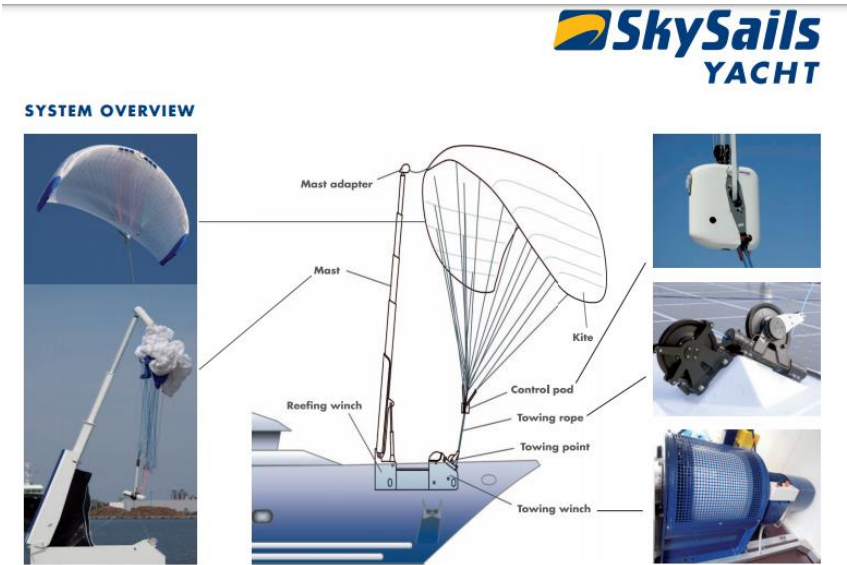


Figura 13. Esquema sistema de izado y arriado cometa. Fuente: <https://skysails-group.com/index.html>

Debido al precio del combustible que es muy elevado, el sistema que incorpora *SkySails* resulta eficaz y rentable. La propia empresa dice que se podría llegar a amortizar en tan solo tres años y medio; y diez años y medio utilizando Fuel Oil.

Fuerzas que actúan en una cometa:

Existen tres fuerzas principales que actúan sobre una cometa:

1. El Peso W actúa desde el centro de gravedad de la cometa hacia el centro de la tierra.
2. La tensión del cable de remolque actúa a través del punto de sujeción de la cometa, se divide en el empuje vertical VP y el empuje horizontal VH . Ambas forman un ángulo de brida β , que indica la inclinación del cable de tensión.
3. La fuerza aerodinámica Taf , se descompone en dos fuerzas, la de sustentación L , que actúa perpendicular al viento y la de arrastre D , en la dirección del viento. Estas fuerzas actúan desde el centro de presiones Kc . [23]

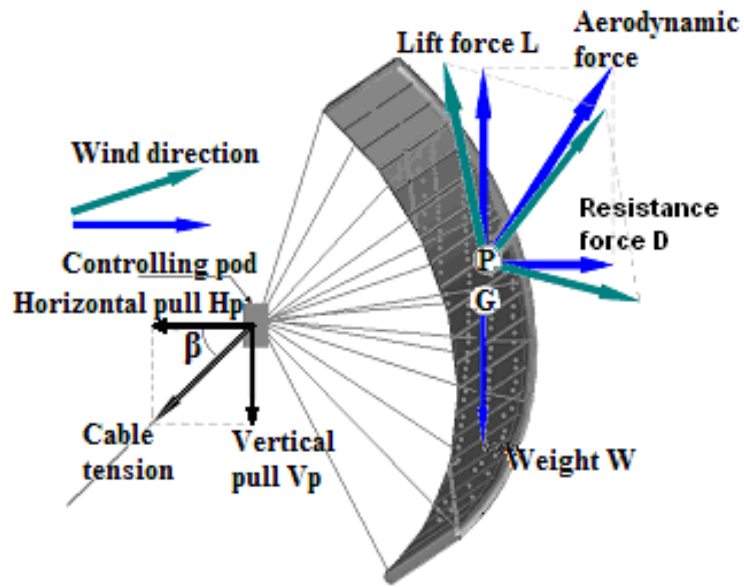


Figura 14: Fuerzas que actúan en una cometa.

Fuente: "CONSIDERATIONS REGARDING KITE TOWED SHIP'S MANOEUVERING" NICOLAE GROSAN, DUMITRU DINU, Navigation and Maritime Transport. Maritime Engineering. Constanta Maritime University. ROMANIA. ISSN: 1792-4707 31 ISBN: 978-960-474-222-6

CASCO - VELA

El fundador del prototipo *Vindskip*, Terje Lade, es un arquitecto naval noruego que ha creado un casco que combina la aerodinámica y ejerce la función de una vela rígida.



Figura 15. Portacoches de Vindskip & Hoglund Marine.

Fuente: <https://www.mascontainer.com/wp-content/uploads/2020/11/Vindskip-Hoglund-Marine-trabajan-en-car-carrier-propulsado-por-GNL-y-viento.png>

El punto principal del proyecto de la empresa *Lade As* es el viento relativo, el flujo de aire que produce el buque al desplazarse, es decir, el viento que tiene el buque cuando se encuentra en movimiento también denominado viento aparente. [24]

La tecnología empleada puede llegar a predecir las condiciones meteorológicas. Todo esto, gracias a un sistema de gestión de datos ayuda al capitán a elegir la ruta óptima en función de

los datos meteorológicos, de esta manera podría funcionar de forma autónoma alcanzando los 14 nudos de velocidad.

La primera versión de Vindskip es un portacoches con una capacidad de 6600 turismos. El buque, con una altura de 43 metros, está equipado con motores que funcionan con gas natural licuado (GNL). Y existe otro proyecto igual destinado para pasaje.

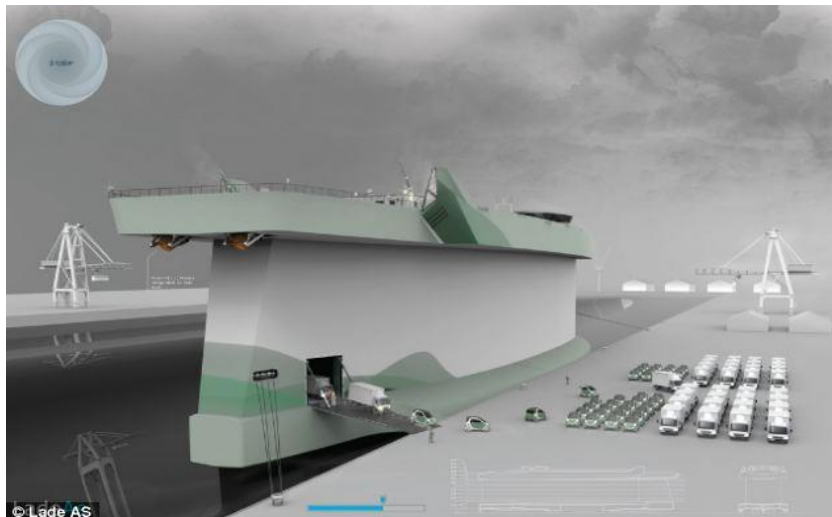


Figura 16. Prototipo Vindskip.

Fuente: http://i.dailymail.co.uk/i/pix/2013/09/20/article-2426577-1BEE16B0000005DC-187_634x420.jpg

Se dice que podría llegar a ahorrar hasta un 60% de combustible y reducir hasta en un 80% las emisiones.

El propio diseñador, que era un marinero de barcos de regatas, afirma que el barco funciona más como un avión o un velero que como un barco convencional, también afirma que podría navegar a un ángulo máximo de 18 grados de ceñida.

CASOS REALES

E-SHIP 1

El buque “E-Ship 1” con el puente de mando situado a proa cuenta con unas dimensiones de 134 metros de eslora, 22 metros de manga y un calado que oscila entre 6 y 9 metros. La carga máxima que puede transportar es de 10500 toneladas y su máxima velocidad es de 18 nudos.



Figura 17. Buque “E-Ship 1”. Fuente: <https://alchetron.com/cdn/e-ship-1-7a98223f-896a-49fa-92e7-89d2a124cee-resize-750.jpeg>

Este buque pertenece a la clase de hielo que ha sido asignada por una sociedad de clasificación o por una autoridad nacional, en la cual, se indica que el buque está preparado para navegar a través del hielo marino, por lo tanto, uno de los requisitos es un refuerzo adicional del casco. [25]

Es propulsado por un sistema híbrido constituido por nueve generadores diésel eléctricos que alimentan a dos motores propulsores. La exhaustación de los generadores conectados a una turbina Siemens es la encargada de girar los 4 modernos rotores Enercon instalados en cubierta de 27 metros de altura por 4 metros de ancho.

En el primer viaje que hicieron en 2010 transportando nueve turbinas desde Emden hasta Dublín. La propia empresa de los rotores, Enercon, publicó en una rueda de prensa, el potencial de sus rotores a bordo del buque "E-ship 1".

En la parte superior de la ilustración, se describe el sistema Magnus que ha sido explicado en el apartado anterior del rotor Flettner. Y en la parte inferior de la ilustración, se pretende mostrar los rumbos posibles que puede optar el buque y el color nos indica en verde, el rumbo más óptimo y en rojo, en dirección al viento y en dirección opuesta, siendo estos los rumbos peores para obtener una resultante con los rotores.

Se obtuvo como resultado, un ahorro de combustible operativo de hasta un 25 por ciento en comparación con buques de dimensiones similares. Los resultados son un ahorro de un 30 a un 40 por ciento del gasto en combustible gracias al empuje generado por los rotores.

Otro resultado es que el rumbo óptimo de navegación con rotores Flettner son aquellos rumbos cuyo viento sea 90 grados de la proa del buque, es decir, el viento debe venir por el través.

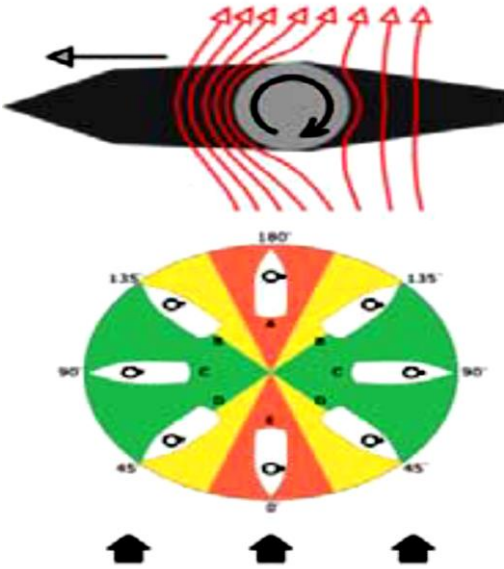


Figura 18. Ilustración sistema magnus y rumbos posibles en función del viento. Fuente Rutkowski, G. (2016). Study of green shipping technologies - harnessing wind, waves and solar power in new generation marine propulsion systems. Transnav-International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 10(4), 627-632.

doi:10.12716/1001.10.04.12

SHIN AITOKU MARU

El *Shin Aitoku Maru*, es un buque petrolero, el cual, fue el primer buque mercante al que se le instalaron velas plegables cuyo resultado fue exitoso.



Figura 19. Buque *Shin Aitoku Maru*. Fuente: [http://www.change-climate.com/Transport Land Sea Sustainable/ElizabethSwann/H2020 Shipping Decarbonizing Zero Emissions Long Distance Solar Wind Assistance.htm](http://www.change-climate.com/Transport_Land_Sea_Sustainable/ElizabethSwann/H2020_Shipping_Decarbonizing_Zero_Emissions_Long_Distance_Solar_Wind_Assistance.htm)

Este diseño fue desarrollado por la empresa japonesa *Nippon Kokan* en 1980, como resultado de la crisis del petróleo. Y así, esta empresa pudo abaratar costes y poder ser más competitiva en el sector. [26]

Logró aumentar su velocidad y reducir el consumo frente a un buque mercante de carga convencional, gracias a la instalación de dos velas cuadradas rígidas fabricadas con paneles metálicos del tipo arco circular, cuya área total es de 200 m².

Las dimensiones del buque son 72 metros de eslora y 11 metros de manga. Su peso muerto total era de 26.000 toneladas.

Posteriormente a la instalación de este sistema de propulsión eólica a bordo del petrolero *Shin Aitoku Maru*, se procedió a instalar y adaptarse en aproximadamente 10 barcos de diferentes tamaños, cuyas características varían desde 600 a 30 mil toneladas.

Se ha demostrado que este sistema posee un ahorro potencial de combustible, pudiendo llegar hasta un 20 – 30 %.

AQUA CITY

El primer buque oceánico de tipo granelero asistido por dos velas. Cuyas dimensiones son 177 metros de eslora y 25 metros de manga, con una capacidad de 30.900 toneladas.

Fue desarrollado por el astillero *Nippon Kokan* (NKK) en Japón, el cual, es pionero en el diseño de buques con velas, siendo el primero que construyó un buque de este tipo, el buque *Shin Aitoku Maru*, en 1980.



Figura 20. Buque granelero Aqua city. Fuente:

<http://www.shipspotting.com/photos/middle/5/5/2/2138255.jpg>

La ruta que realizaba era Japón – Canadá – EEUU (costa Oeste) con una velocidad media de 14 nudos. Las dos velas que se instalaron en la parte de proa del buque tienen una superficie velica de 350 m². Se desguazó en septiembre de 2013 después de pasar por diferentes propietarios y cambios de nombre.

Dichas velas eran rectangulares con forma parabólica fabricada a partir de armazones de acero. Las dimensiones de las velas eran de 16 metros de alto y 11 metros de ancho, todo ello controlado por medio de un ordenador que le permite responder automáticamente a los cambios en la dirección del viento. [27]

La eficiencia que puede llegar a alcanzar en condiciones favorables es de hasta un 30 por ciento de ahorro de combustible.

THESEUS

Es el primer buque mercante que incorpora una cometa de SkySails para darle un uso comercial. Dicho buque, realizara la ruta Bremen – Venezuela bajo la compañía DHL.

Se trata de un buque de carga de pequeña envergadura, cuenta con 87 metros de eslora. Se calcula que podría llegar a ahorrar entre el 10 y el 35 por ciento de combustible, este porcentaje equivale a una media de 280 mil euros solo en combustible. [28]



Figura 21. M/V *THESEUS*. Fuente: <https://media.gettyimages.com/photos/skisails-towing-kite-propels-the-cargo-ship-mv-theseus-in-the-north-picture-id111977240?s=2048x2048>

SC CONNECTOR

Se trata del primer buque en el que se instalan dos rotores Flettner basculantes en un buque ro-ro, de carga rodada. Dichos rotores mediante el efecto Magnus explicados anteriormente, aprovechan la energía eólica como ayuda a la propulsión principal del buque. [29]



Figura 22. M/V *SC Connector*. Fuente:

http://www.canaryports.es/multimedia/images/SCconnector_flettner.jpg

La empresa *Norsepower* realizó un sistema con rotores Flettner, el cual si detecta viento se ponen en marcha automáticamente. El *SC Connector* es el quinto buque, el primero fue un ro-ro llamado *Estraden*, posteriormente un crucero de la naviera Viking Line, el *Viking Grace* con un solo rotor; un petrolero *Maersk Pelican* que cuenta con dos rotores. En 2020 se instalaron en un ferry híbrido llamado *Copenhagen* de la naviera *Scandilines*. Y como proyectos futuros, se quieren instalar cinco rotores basculantes en un granelero en este año 2021.

RESULTADOS

Gracias a este estudio en el que se han analizado cuatro tipos de propulsión eólica, de los cuales solo tres de ellos se encuentran en uso en la actualidad, se han obtenido los siguientes resultados.

En el caso de los rotores Flettner, a pesar de que no triunfó en sus inicios, actualmente, se han mejorado con materiales más ligeros. Llegando a conseguir un ahorro de 25-40 por ciento en combustible.

En cambio, los buques que han instalado velas rígidas, han llegado a conseguir hasta un 40 por ciento de ahorro de combustible.

En el estudio de las cometas, se han alcanzado ahorros de combustible desde un 10 a un 35 por ciento.

Y por último en el caso de casco – vela, es solo un prototipo, pero el buque Vindskip ha conseguido varias patentes internacionales y se espera que en cuatro años se esté desarrollando para alguna naviera en alguna de sus dos modalidades, de pasaje o de carga rodada.

CONCLUSIONES

Como se ha ido corroborando a lo largo del estudio de los diferentes tipos de propulsión eólica que se han nombrado, conseguimos un descenso del consumo de combustible.

El peso del combustible en la totalidad de los costes del transporte marítimo, ocupa el 80 por ciento; por lo tanto, conseguiremos bajar el precio del transporte marítimo.

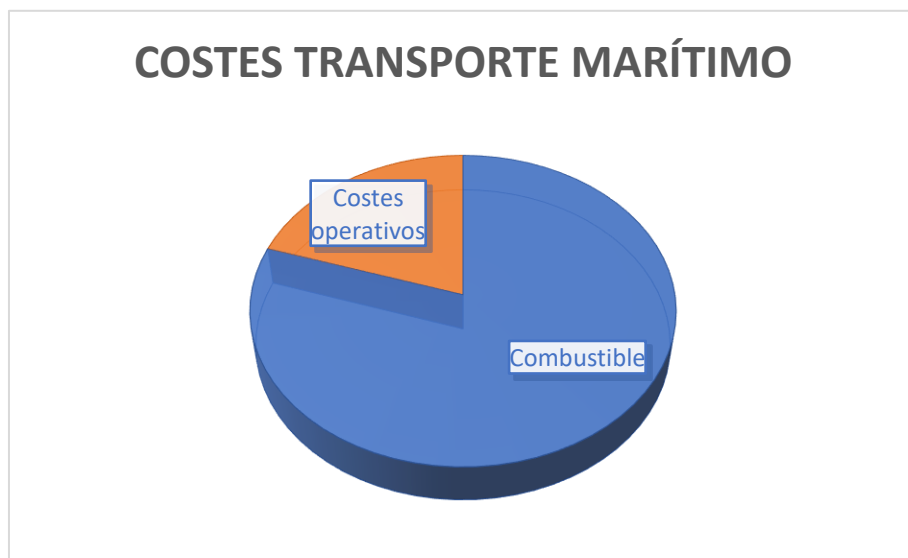


Figura 23. Representación de los costes en el transporte marítimo. Fuente propia.

Tal y como se demostró en 1924 con el primer buque con rotores Flettner, *Baden Baden*, se demostró que era más eficaz que las velas tradicionales. Si comparamos la fuerza que podría ejercer una vela de las mismas dimensiones que el cilindro, ésta podría equivaler a 10 veces la ejercida por la vela convencional.

Lograr mejorar a nivel mundial la flota de buques existentes, desde el punto de vista de la contaminación. Implementando nuevos sistemas de propulsión, diferentes a los existentes a partir de combustibles fósiles.

Conseguir que las navieras sean más ecológicas recibiendo ayudas de los estados, tanto a las propias navieras como a las empresas que se dedican a la innovación y al estudio de nuevas formas de propulsión.



Figura 24. Representación gráfica de tres tipos de propulsión eólica existentes. Fuente: Colomar Lix, G. (2012). Medios de propulsión eólica alternativos a la vela tradicional.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Silvanius, M. (2009). Wind assisted propulsion for pure car and truck carriers. KTH, Stockholm,
- [2]<https://www.marineinsight.com/green-shipping/top-7-green-ship-concepts-using-wind-energy/>
- [3] Bentin, M., Kotzur, S., Schlaak, M., Zastrau, D., & Freye, D. (2018). Perspectives for a wind assisted ship propulsion. *International Journal of Maritime Engineering*, 160, 1-10. doi:10.3940/rina.ijme.2018.a1.439
- [4] Lele, A., & Rao, K. V. S. (2016). Ship propulsion strategies by using wind energy. NEW YORK; 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE.
- [5]<https://www.consilium.europa.eu/es/press/press-releases/2018/05/14/effort-sharing-regulation-council-adopts-emission-reduction-targets/>
- [6]<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/eu-affairs/20210429STO03106/semana-lux-del-publico-vea-las-peliculas-y-califiquelas>
- [7] Levent Bilgili, Life cycle comparison of marine fuels for IMO 2020 Sulphur Cap, *Science of The Total Environment*, Volume 774, 2021
- [8] Talluri, L., Nalianda, D. K., Kyprianidis, K. G., Nikolaidis, T., & Pilidis, P. (2016). Techno economic and environmental assessment of wind assisted marine propulsion systems doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.05.047>
- [9] Tillig, F., Mao, W., & Ringsberg, J. (2015). Systems modelling for energy-efficient shipping. Chalmers University of Technology
- [10] Clayton, B. R. (1985). BWEA initiative on wind assisted ship propulsion (WASP) doi:[https://doi.org/10.1016/0167-6105\(85\)90064-9](https://doi.org/10.1016/0167-6105(85)90064-9)

- [11] Ballini, F., Olcer, A. I., Brandt, J., & Neumann, D. (2017). Health costs and economic impact of wind assisted ship propulsion. *Ocean Engineering*, 146, 477-485. doi:10.1016/j.oceaneng.2017.09.014
- [12] Kang, I. S., & Lau, K. M. (1994). Principal modes of atmospheric circulation anomalies associated with global angular momentum fluctuations. *Journal of Atmospheric Sciences*, 51(9), 1194-1205.
- [13] Diaz, H. F., & Bradley, R. S. (2004). The Hadley circulation: present, past, and future. In *The Hadley circulation: present, past and future* (pp. 1-5). Springer, Dordrecht.
- [14] Walther, L., Jahn, C., & Lade, T. (2015). Weather routing for a wind driven hybrid merchant vessel. Paper presented at the OCEANS 2015-Genova, pp. 1-7.
- [15] <https://vadebarcos.net/2014/04/28/buques-rotores-flettner-e-ship-1/>
- [16] Copuroglu, H. I., & Pesman, E. (2018). Analysis of flettner rotor ships in beam waves doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.004>
- [17] <https://envisitadecortesia.com/2020/09/05/el-revolucionario-barbara-y-sus-rotores-flettner/>
- [18] Colomar Lix, G. (2012). Medios de propulsión eólica alternativos a la vela tradicional.
- [19] <https://bound4blue.com/en/>
- [20] <https://www.azureazure.com/es/motor-tecnologia/black-pearl-de-oceanco-el-velero-privado-mas-grande-del-mundo/>
- [21] Aguiar Delgado, V. (2016). Skysail: estudio del sistema y aportacion a la sostenibilidad en el transporte maritimo (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- [22] <https://www.marineinsight.com/green-shipping/aghia-marina-the-worlds-largest-vessel-equipped-with-kite-power-technology/>

- [23] “CONSIDERATIONS REGARDING KITE TOWED SHIP“S MANOEUVERING” NICOLAE GROSAN, DUMITRU DINU, Navigation and Maritime Transport. Maritime Engineering. Constanta Maritime University. ROMANIA. ISSN: 1792-4707 31 ISBN: 978-960-474-222-6
- [24] <https://ladeas.no/>
- [25] Chica Bertol, A. (2012). Estudio sobre el método de propulsión mediante rotores Flettner.
- [26] Watanabe, T., Endo, Y., Nakanishi, K., Takeda, K. (1982). Sail-equipped motor ship Shin Aitoku Maru and studies on larger ship, in Proceedings of the 12th AIAA Symposium on Aero/Hydronautics of Sailing, American Institute of Aeronautics and Astronautics/Society of Naval Architects and Marine Engineers, pp. 238–249, Los Angeles, USA.
- [27] <https://magazines.marinelink.com/Magazines/MaritimeReporter/198409/content/oceangoing-sailassisted-delivered-203567>
- [28] <https://www.vistaalmar.es/ciencia-tecnologia/ingenieria-innovacion/929-thesseus-el-barco-que-practica-qkite-surfq.html>
- [29] <https://www.norsepower.com/roro>

ANEXO I: CARACTERÍSTICAS DE LOS BUQUES QUE CONFORMAN LOS CASOS REALES.

E-SHIP 1



Eslora Total: 130 metros

Manga: 24 metros

Calado: 6 a 9 metros

Año de construcción: 2010

Tonelaje: 10.500 GRT

Clase: Buque de carga RoRo

Capacidad de carga: 3 bodegas bajo cubierta (20.580 m³)

Mástiles: 4 a 62 metros

Motores: 4 rotores Flettner (27 m de alto y 4 m de diámetro) y 2 motores diésel (2 x 3.5 MW)

Velocidad: 11.6 nudos de media / 22.1 velocidad máxima.

Ahorro de combustible: hasta un 30 %

SHIN AITOKU MARU



Eslora Total: 72 metros

Manga: 10.6 metros

Calado: 6 a 9 metros

Año de construcción: 2010

Tonelaje: 600 GRT

Clase: Oil tanker

Capacidad de carga: 1475 DWT

Velas: 2 mástiles y 2 velas de 12,5m ancho x 8 m de alto (400 m²)

Motores: 1 motor diésel (1.177 kW)

Velocidad: 12 velocidad máxima.

Ahorro de combustible: entre 20 – 30 %

AQUA CITY



Eslora Total: 179,9 metros

Manga: 26.3 metros

Calado: 6 – 9 metros

Año de construcción: 1984

Tonelaje: 18.597 GRT

Clase: Granelero

Capacidad de carga: 31.217 DWT

Velas: 2 mástiles y 2 velas de 16 m ancho x 11 m de alto (350 m²)

Motores: 1 motor diésel

Velocidad: 14 velocidad máxima.

Ahorro de combustible: 10 – 30 %

THESEUS



Eslora Total: 90 metros

Manga: 12 metros

Calado: 3 – 5.8 metros

Año de construcción: 2000

Tonelaje: 1846 GRT

Clase: Carga general

Capacidad de carga: 2500 DWT

Velas: 1 cometa kitesurf

Motores: 1 motor diésel (1500 kW)

Velocidad: 12.5 velocidad máxima.

Ahorro de combustible: 10 – 30 %

SC CONNECTOR



Eslora Total: 163 metros

Manga: 22 metros

Calado: metros

Año de construcción: 1997

Tonelaje: 12251 GRT

Clase: Buque de carga RoRo

Motores: 4 rotores Flettner (35 m de alto y 5 m de diámetro)

Velocidad: 14.3 nudos de media / 17.1 velocidad máxima.

Ahorro de combustible: hasta un 25 %