



UNIVERSIDAD LAICA

“ELOY ALFARO” DE MANABÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA

CARRERA DE INGENIERÍA MARÍTIMA

Trabajo de titulación, modalidad Proyecto de Investigación

TÍTULO:

**“ESTUDIO DE LA VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
ENERGÍA EÓLICA COMO FUENTE AUXILIAR DE PROPULSIÓN EN EL
TRANSPORTE MARÍTIMO COMERCIAL”**

AUTORES:


VERA SOLÓRZANO NASLHY MAILEN


TUTOR:

ING. ISRAEL TERÁN LOZANO

MANTA – ECUADOR

2026

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1 Página 1 de 1

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-04-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	REVISIÓN: 1 Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría de la estudiante **VERA SOLÓRZANO NASLHY MAILEN**, legalmente matriculado en la carrera de Ingeniería Marítima, período académico **2025-2**, cumpliendo el total de **384 horas**, cuyo tema del proyecto es **"ESTUDIO DE LA VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA COMO FUENTE AUXILIAR DE PROPULSIÓN EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO COMERCIAL"**.

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 5 de febrero de 2026.

Lo certifico



Israel Terán Lozano
Docente Tutor

Ingeniería, Industria y Arquitectura

AUTORIA DEL PROYECTO TÉCNICO

El trabajo de grado que presentamos es inédito y justifica el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura, de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí ULEAM. En tal virtud, los fundamentos teóricos – científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

Manta, 5 de febrero de 2026



Naslhy Mailen Vera Solórzano

1350167233



Israel Terán Lozano

1104213093

DEDICATORIA

Con gratitud infinita y profundo amor, dedico esta tesis a:

Dios por brindarme la fortaleza, la paciencia y la sabiduría necesarias para superar cada uno de los desafíos que se presentaron a lo largo de mi formación académica y durante el desarrollo de esta tesis. Su guía fue fundamental para no perder la fe ni la constancia en los momentos de mayor dificultad.

A mis padres Olmedo Vera Rodríguez y Amarilis Solorzano Chavez, por siempre apoyarme y por ser el pilar más importante de mi vida. Gracias por su apoyo incondicional, por los sacrificios realizados, por su comprensión y por creer en mí. Este logro es también fruto de su esfuerzo, de sus enseñanzas y de los valores que me inculcaron desde siempre. Sus consejos y su confianza en mí fueron fundamentales para continuar avanzando, incluso en los momentos de mayor cansancio y dificultad.

A mis hermanas Liseth y Leslie Vera Solorzano por siempre estar presentes apoyándome en este proceso quienes han sido una fuente constante de apoyo, motivación y fortaleza a lo largo de mi vida académica y personal.

A mis docentes y tutor, por impartir sus conocimientos, por su orientación profesional y por su dedicación, los cuales fueron determinantes para el desarrollo adecuado de esta investigación. Sus enseñanzas no solo contribuyeron a mi formación académica, sino también a mi crecimiento personal y profesional.

Finalmente, dedico este trabajo a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a mi formación académica. Este logro representa el cierre de una etapa importante y el inicio de nuevos desafíos profesionales.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar este proceso académico. Su guía y acompañamiento fueron fundamentales para mantener la constancia y la fe durante el desarrollo de esta investigación.

Agradezco profundamente a mis padres, Olmedo Vera Rodríguez y Amarilis Solórzano Chávez, por su apoyo incondicional, por su comprensión, por los sacrificios realizados y por la motivación constante que me brindaron a lo largo de mi formación universitaria. Su confianza, sus consejos y sus enseñanzas fueron esenciales para superar los desafíos presentados y alcanzar este objetivo académico.

Mi agradecimiento especial a mis hermanas, Lisseth y Leslie Vera Solórzano, por su apoyo permanente, por su comprensión y por ser una fuente constante de motivación y fortaleza durante todo este proceso académico.

Compartir este logro con ustedes es un honor y una alegría inmensa. Agradezco a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, por brindarme la oportunidad de ser parte de su comunidad educativa, permitiéndome acceder a sus instalaciones y recibir una formación académica que me preparará para contribuir de manera productiva a la sociedad.

A mi estimado tutor de tesis Ing. Israel Terán Lozano. Su guía experta, paciencia y dedicación han sido fundamentales en este viaje académico. A lo largo de este proceso, su orientación ha iluminado mi camino, brindándome claridad y perspectiva en cada desafío que he enfrentado. Gracias por compartir su conocimiento de manera tan generosa y por inspirarme a alcanzar estándares más altos.

INDICE GENERAL DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
AUTORIA DEL PROYECTO TÉCNICO.....	¡Error! Marcador no definido.
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	IV
INDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	V
INDICE DE FIGURAS.....	VIII
INDICE DE TABLAS	X
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT.....	XII
1 CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE.....	4
1.1 INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA EÓLICA.....	4
1.1.1 Origen y evolución de la energía eólica.....	4
1.1.2 Historia de las energías renovables	5
1.1.3 Etapas de la evolución de la energía eólica.....	6
1.2 APLICACIONES TERRESTRES VS MARÍTIMAS.....	10
1.3 VENTAJAS DE LA ENERGÍA EÓLICA COMO FUENTE RENOVABLE.....	11
1.4 CONTEXTO DEL TRANSPORTE MARÍTIMO COMERCIAL Y SU IMPACTO AMBIENTAL.....	13
1.5 EMISIONES DE GEI DEL TRANSPORTE MARÍTIMO (CO ₂ , NO _x , SO _x)	14
1.5.1 Principales emisiones contaminantes del transporte marítimo.....	14
1.5.2 Emisiones de Gases Contaminantes.....	15
1.5.3 Emisiones de gas efecto invernadero	16
1.6 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL Y ECONÓMICA DEL USO DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO.....	16
1.6.1 Crecimiento de las emisiones y proyecciones futuras.....	16
1.6.2 Impactos ambientales adicionales	17
1.7 NORMATIVAS INTERNACIONALES PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES EN EL SECTOR MARÍTIMO (OMI, EEXI, CII)	17
1.7.1 Regulaciones para reducir las emisiones de los barcos.....	17
1.8 TECNOLOGÍAS MODERNAS DE PROPULSIÓN EÓLICA EN EMBARCACIONES	20

1.8.1	Velas rígidas (WindWings).....	20
1.8.2	Rotores Flettner.....	22
1.8.3	Cometas de tracción (kites).....	23
1.9	APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA <i>KITE</i> EN UNA EMBARCACIÓN COMERCIAL.....	24
1.10	BENEFICIOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES DE LA PROPULSIÓN EÓLICA AUXILIAR.....	25
1.10.1	Desafíos y soluciones.....	27
1.11	ESTUDIOS DE CASO Y PROYECTOS PILOTO RELEVANTES.....	29
2	CAPÍTULO II: METODOLOGÍA.....	32
2.1	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	32
2.2	TIPO Y ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.....	32
2.3	EMBARCACIÓN SELECCIONADA.....	33
2.4	ANÁLISIS COMPARATIVO Y TABLA DE PUNTUACIONES PARA SELECCIÓN DE PROPULSIÓN EÓLICA.....	33
2.5	PROCESO DE APLICACIÓN DE PROPULSIÓN EÓLICA EN PARALELO PARA BUQUE RO-RO.....	41
2.6	PROCEDIMIENTO PARA EVALUACIÓN DE VIABILIDAD TÉCNICO, ECONÓMICO Y AMBIENTAL.....	42
2.7	HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y MODELADO.....	43
2.8	RECOLECCIÓN DE DATOS E INSTRUMENTOS.....	44
2.9	FLUJOGRAMA DE INSTALACIÓN.....	44
3	CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	46
3.1	SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL BUQUE.....	46
3.2	PARÁMETROS NAVALES RELEVANTES PARA INTEGRAR SISTEMAS EÓLICOS.....	47
3.3	EVALUACIÓN DE CONDICIONES OPERATIVAS Y METEOROLÓGICAS....	48
3.4	IMPACTO AMBIENTAL.....	50
3.5	SIMULACIONES DE RENDIMIENTO ENERGÉTICO.....	51
3.5.1	Software de simulación empleado y enfoque metodológico.....	52
3.5.2	Escenario de referencia y parámetros de simulación.....	53
3.5.3	Parametrización de las simulaciones y validación con casos reales.....	53
3.5.4	Simulación de escenarios de ahorro energético.....	54

3.6	DISEÑO CONCEPTUAL E INTEGRACIÓN ESTRUCTURAL	57
3.7	SELECCIÓN DEL SISTEMA EÓLICO MÁS VIABLE.....	58
3.7.1	Implementación técnica a bordo (instalación física).....	58
3.7.2	Pruebas y validaciones	58
3.8	ENTREVISTAS CON EXPERTO Y REVISIÓN DOCUMENTAL.....	59
3.9	ANÁLISIS FINANCIERO DEL PROYECTO	59
3.9.1	Análisis financiero (CAPEX, OPEX, ROI)	59
3.9.2	Análisis económico	60
4	Capítulo IV: ANÁLISIS Y PROPUESTA	63
4.1	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS ESCENARIOS SIMULADOS	63
4.1.1	Selección del escenario más conveniente.....	64
4.2	PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SELECCIONADO	65
4.2.1	Descripción general del sistema.....	65
4.2.2	Integración estructural y ubicación a bordo	65
4.2.3	Diseño del barco.....	65
4.2.4	Sistemas de control y operación.....	69
4.3	EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL PROYECTADA	70
4.3.1	Ahorro de combustible y emisiones	70
4.3.2	Análisis financiero	70
4.3.3	Costos operativos y mantenimiento	71
4.4	PLAN DE ACCIÓN Y CONSIDERACIONES OPERATIVAS	71
4.5	ANÁLISIS DE ENTREVISTA A EXPERTO	72
	CONCLUSIONES	74
	RECOMENDACIONES	76
	BIBLIOGRAFÍA	77
	ANEXOS	81

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Buque comercial navegando próximo a un parque eólico	4
Figura 2. Molino múltipala de bombeo de agua estado de Washington.....	5
Figura 3. Molino persa.....	7
Figura 4. Molino persa.....	8
Figura 5. Buque comercial navegando próximo a un parque eólico	8
Figura 6. Primeras bombas eólicas	9
Figura 7. Diseño y fabricación de una maquina experimental de 100w.....	10
Figura 8. Parque eólico marino Middelgrunden	12
Figura 9. Transporte marítimo	13
Figura 10. OMI regulaciones ambientales.....	15
Figura 11. Petrolero Brasileiro SA	17
Figura 12. Buque portacontenedor	19
Figura 13. Buque Bergebulk con velas rígidas	21
Figura 14. Rotores Flettner de accionamiento eléctrico modernos	23
Figura 15. Ventana de viento.....	23
Figura 16. Movimientos en 8 de la cometa.....	24
Figura 17. Cometa como ayuda al sistema de propulsión	24
Figura 18. Cometa para generar electricidad	25
Figura 19. Buque cargrill.....	26
Figura 20. Buque Mol.....	28
Figura 21. Buque cargrill con dos WindWings	29
Figura 22. Technology-Windwings takes flight	30

Figura 23. Buque Carolina del sur	31
Figura 24. Configuración en serie	35
Figura 25. Configuración en paralelo	36
Figura 26. Buque Carolina del sur Buque Ro-Ro conceptual con vela rígida “Oceanbird”	37
Figura 27. Configuración en híbrido	38
Figura 28. Buque Ro-Ro cosco tengfei.....	47
Figura 29. Interfaz del software de simulación empleado	52
Figura 33. Consumo de combustible (t/día)	56
Figura 34. Reducción de consumo de combustible según el ángulo del viento.	57
Figura 32. Vista en Planta.....	68
Figura 33. Vista de Perfil.....	68
Figura 34. Secciones	69
Figura 35. Sistema de control y operación	70

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Análisis de criterios</i>	40
Tabla 2 <i>Características promedio del viento en la ruta de estudio</i>	49
Tabla 3 <i>Condiciones oceánicas promedio en la ruta</i>	49
Tabla 4 <i>Matriz de impacto ambiental por escenario</i>	50
Tabla 5 <i>Resultados de simulación para el Cosco Tengfei</i>	55
Tabla 6 <i>Análisis económico</i>	60
Tabla 7 <i>Flujo de caja e indicadores financieros</i>	62
Tabla 8 <i>Comparación de escenarios</i>	63

RESUMEN

El presente estudio caracteriza la factibilidad medioambiental, técnica y económica de la posibilidad de utilizar energía eólica como fuente de propulsión auxiliar de un buque de tipo Ro Ro para tráfico rodante que opera en Manta (Ecuador). El transporte marítimo genera en la actualidad cerca del 3 % de las emisiones antropogénicas de CO₂ y la implementación de tecnologías de tipo rotores Flettner puede ayudar a lograr una reducción en el consumo de combustible de entre el 3 y el 15 %. La investigación ligada a la caracterización de la propulsión asistida por energía eólica tiene su base de datos en un combinar de simulaciones numéricas de dinámica de fluidos y modelaje energético con análisis financiero y entrevistas a expertos para evaluar tres escenarios posibles: el de dos rotores Flettner, el de tres velas de succión, y el de cuatro rotores Flettner de gran tamaño. La investigación se centra en el buque Cosco Tengfei de 182 m de eslora, el cual se considera representativo del tráfico rodante que se realiza en Manta, y las simulaciones se ejecutaron a partir de simulaciones CFD y proyecciones de ahorro energético aplicadas a las condiciones que presenta localmente el puerto de Manta. Los resultados obtenidos, en términos del ahorro energético que ofrecen las diferentes propuestas de tecnología de propulsión auxiliar Wind-Assisted, demuestran que la instalación de dos rotores Flettner, sobre el buque Cosco Tengfei, permitiría un ahorro del 9 % en el consumo de combustible, y que además su cobertura significaría, o implicaría, un periodo de retorno de 4 años. El sistema de velas de succión admite unos ahorros inferiores, mientras que la opción de cuatro rotores provoca mayores ahorros, aunque se desprecia el coste de instalación. Se concluye que la propulsión eólica auxiliar es una alternativa viable para lograr reducir el consumo y las emisiones en el transporte marítimo, y también para posicionar al puerto de Manta como una zona de referencia para la región.

Palabras clave: Conservación; Energía eólica; Propulsión; Transporte marítimo.

ABSTRACT

This study characterizes the environmental, technical, and economic feasibility of using wind energy as an auxiliary propulsion source for a Ro-Ro vessel operating in Manta, Ecuador. Maritime transport currently generates approximately 3% of anthropogenic CO₂ emissions, and the implementation of Flettner rotor technologies could contribute to reducing fuel consumption by between 3% and 15%. The research, which characterizes wind-assisted propulsion, is based on a combination of numerical fluid dynamics simulations and energy modeling, along with financial analyses and expert interviews, to evaluate three possible scenarios: two Flettner rotors, three suction sails, and four large Flettner rotors. The research focuses on the 182-meter-long Cosco Tengfei vessel, considered representative of Ro-Ro cargo traffic in Manta. The simulations were performed using CFD simulations and energy-saving projections applied to the local conditions of the Port of Manta. Energy savings applied to the local conditions of the Port of Manta. The results obtained, in terms of the energy savings offered by the different Wind-Assisted auxiliary propulsion technology proposals, demonstrate that the installation of two Flettner rotors on the vessel Cosco Tengfei would allow for a 9% reduction in fuel consumption, and that its implementation would have a payback period of 4 years. The suction sail system offers lower savings, while the four-rotor option provides greater savings, although the installation cost is negligible. It is concluded that auxiliary wind propulsion is a viable alternative for reducing fuel consumption and emissions in maritime transport, and for positioning the Port of Manta as a benchmark for the region.

Keywords: Conservation; Wind energy; Propulsion; Maritime transport.

TÍTULO

“ESTUDIO DE LA VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA COMO FUENTE AUXILIAR DE PROPULSIÓN EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO COMERCIAL”.

ANTECEDENTES

La descarbonización del transporte marítimo se ha convertido en un asunto de gran actualidad a partir del evidente crecimiento de las emisiones generadas por el mismo. Según la Organización Marítima Internacional (OMI) y otras organizaciones, el transporte marítimo representó alrededor del 3 % de las emisiones generadas por la humanidad en 2018 y podría llegar a incrementar su cantidad en un 16 % para 2030 y en un 50 % para 2050 si no se toman medidas (Berkehan et al., 2022). Entre las soluciones que se plantean se encuentra la recuperación de la propulsión eólica.

La tecnología de rotors Flettner se ha consolidado como una de las aplicaciones más prometedoras: el coste de cada rotor se encuentra entre 400 000 y 1 000 000 USD, y se lograrían reducciones del consumo de combustible entre un 3 % y un 15 % (de hasta un 25 % en casos completamente favorables). Ensayos como el que se desarrolló con el petrolero Maersk Pelican, que navegó con dos rotors durante un año, lograron una reducción del 8,2 % del consumo de combustible, o aún, el ahorro de unas 1 400 toneladas de CO₂ al año; estudios que combinan velas de rotor con optimización meteorológica logran reducciones medias del 19 % (Echevarría, 2023).

El renacer de la propulsión eólica también se tiene que ver como una respuesta al encarecimiento del precio del bunker y a la inclusión del transporte marítimo en planes de comercio de emisiones. En América Latina, la adopción de tecnologías limpias es todavía incipiente; Ecuador importa cerca del 95 % de los vehículos a través del puerto de Manta y carece de referencias locales sobre asistencia eólica. Este estudio se nutre de casos internacionales para adaptar la tecnología al contexto ecuatoriano.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial, la actividad marítima genera alrededor de un 3 % del total de emisiones de CO₂, cifra que podría incrementarse un 50 % al 2050 si no se toman cartas en el asunto.

Esta situación contradice lo estipulado en el Acuerdo de París y ha llevado a la OMI a plantear metas ambiciosas de reducción de dichas emisiones (Berkehan et al., 2022).

En Latinoamérica, la actualización de las flotas va muy lentamente; la mayoría de los buques navegan utilizando motores diésel muy poco eficientes y carecen de asistencia de la eólica, y los puertos presentan un escaso avance en la adopción de una infraestructura que permita la utilización de sistemas retráctiles. (Flores, 2021).

Al nivel del país, Ecuador carece de astilleros especializados y de políticas que favorezcan la reducción de emisiones en navegación (Hernández L. A., 2021). En el puerto de Manta se concentra aproximadamente un 95 % de la carga que se mueve por carretera, opera en una zona de vientos favorables, pero no se registran precedentes de buques con asistencia de la eólica en sus rutas. A nivel local se desconoce el impacto que tendría la instalación de rotores Flettner o de velas de succión en un buque Ro Ro en términos estructurales, operativos y económicos.

Estas carencias llevan a formular la pregunta clave que da sentido a la tesis: ¿es factible la instalación de un sistema de energía eólica auxiliar para un buque Ro Ro que opera en Manta, atendiendo a las limitaciones técnicas, económicas y ambientales que existen a nivel mundial, regional, nacional y local?.

JUSTIFICACIÓN

La importancia social que tiene el estudio se deriva de que la disminución de emisiones del transporte marítimo para afrontar el cambio climático y mejorar la calidad del aire en el litoral. Utilizar el viento reduce el consumo de recursos llegados por vía de combustibles fósiles, ahorra recursos y disminuye gases de efecto invernadero.

Para una comunidad portuaria como Manta, la utilización de tecnologías limpias refuerza su imagen de puerto sostenible; también puede atraer inversiones y empleos asociados a la instalación y mantenimiento de estos sistemas.

Prácticamente, la investigación proporciona herramientas concretas a operadores y autoridades portuarias para encarar proyectos de asistencia eólica: cuantifica ahorros de combustible y emisiones evitadas, aporta información sobre las inversiones y los periodos de recuperación e identifica limitaciones tanto estructurales como operativas y regulatorias; además añade recomendaciones sobre la ubicación de los dispositivos y la capacitación de los tripulantes.

Teóricamente, la tesis hace una extensión del estado de la técnica al conjugar métodos cuantitativos (CFD y análisis financiero) y cualitativos (entrevistas y revisión documental), evalúa diferentes tecnologías (rotores Flettner y velas de succión) y produce evidencia que se podrá aplicar en futuras indagaciones y políticas en Ecuador y América Latina.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la implementación de sistemas de energía eólica como fuente auxiliar de propulsión en el transporte marítimo comercial.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar las tecnologías actuales disponibles para la propulsión eólica en embarcaciones comerciales (velas rígidas, cometas, turbo velas, etc.).
- Evaluar el impacto del uso de energía eólica en el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del transporte marítimo.
- Determinar la rentabilidad económica de la implementación de sistemas de asistencia eólica en rutas comerciales marítimas.
- Analizar las limitaciones y condiciones operativas necesarias para una implementación eficiente de energía eólica en embarcaciones comerciales

CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA EÓLICA

2.1.1 Origen y evolución de la energía eólica

La historia de la energía eólica se remonta a la época de los antiguos egipcios, quienes utilizaban velas para impulsar sus barcos a través del río Nilo (Carda, 2008). Desde entonces, la energía eólica ha sido utilizada para moler granos, bombear agua y generar electricidad (Echevarría, 2023).

En la actualidad, la energía eólica se ha convertido en una alternativa importante a los combustibles fósiles y ha ayudado a reducir la dependencia de los recursos no renovables. Además, la energía eólica es limpia y no emite gases de efecto invernadero, lo que la convierte en una opción amigable con el medio ambiente.



Figura 1. Buque comercial navegando próximo a un parque eólico

Fuente: <https://inspenet.com/>

La historia de la energía eólica y cómo ha evolucionado a lo largo de los años. Veremos cómo la tecnología ha avanzado para hacer que la energía eólica sea más eficiente y efectiva, y cómo se está utilizando en todo el mundo para generar energía limpia y renovable.

La energía eólica es una fuente de energía renovable que se ha utilizado desde hace siglos. El descubrimiento de la energía eólica se remonta a la antigua civilización persa y egipcia, donde se utilizaban molinos de viento para moler granos y bombear agua.

Sin embargo, fue en el siglo XIX cuando la energía eólica se convirtió en una fuente de energía más ampliamente utilizada. En 1887, el inventor escocés Charles F. Brush

construyó el primer molinete eléctrico en Cleveland, Ohio. Este molinete gigante tenía 144 aspas y generaba suficiente electricidad para alimentar varias casas.

En la década de 1920, la energía eólica se utilizó para producir electricidad en Dinamarca. Durante la Segunda Guerra Mundial, los alemanes utilizaron la energía eólica para generar electricidad en áreas remotas. En la década de 1970, la crisis del petróleo llevó a un renovado interés en la energía eólica como fuente de energía alternativa.

En la actualidad, la energía eólica es una de las fuentes de energía renovable de más rápido crecimiento en el mundo. Los molinos de viento modernos son mucho más eficientes que sus predecesores y pueden generar suficiente electricidad para alimentar ciudades enteras. Desde entonces, ha evolucionado hasta convertirse en una de las fuentes de energía renovable más importantes del mundo.

2.1.2 Historia de las energías renovables

La historia de la energía eólica se remonta algunos miles de años atrás, cuando las velas de los barcos eran impulsadas por el viento. Sin embargo, el uso de la energía eólica para generar electricidad es relativamente reciente.

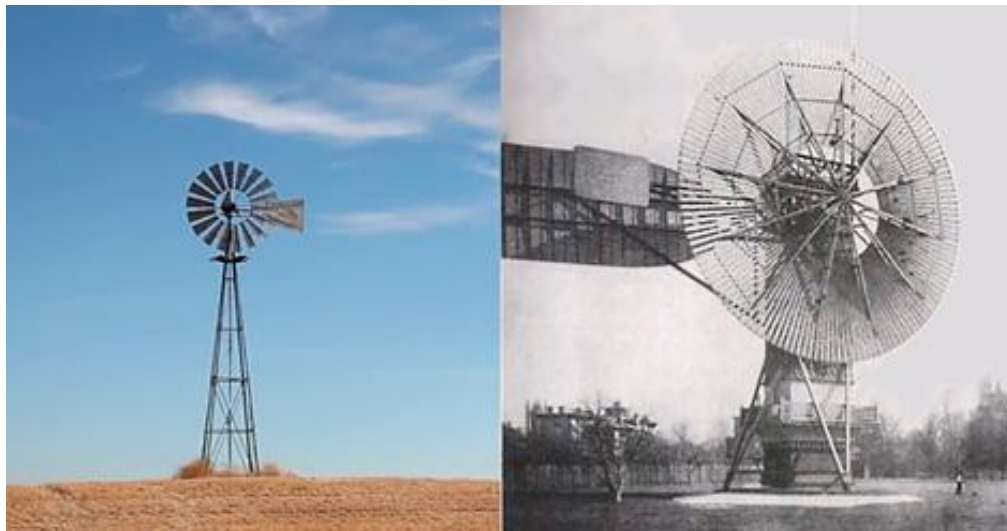


Figura 2. Molino múltipala de bombeo de agua estado de Washington
Fuente: <https://unpocodecienciaporfavor.com/>

La primera turbina eólica fue construida en 1887 por el científico escocés James Blyth. Esta turbina era capaz de generar suficiente electricidad para alimentar su casa de campo en Marykirk, Escocia.

En la década de 1920, la energía eólica se utilizó para abastecer de electricidad a zonas rurales aisladas en Dinamarca y los Estados Unidos. Sin embargo, la energía eólica no se convirtió en una fuente de energía importante hasta la década de 1970, cuando aumentó

el precio del petróleo y se intensificó la preocupación por el medio ambiente y la seguridad energética.

Hoy en día, la energía eólica es una de las energías renovables más importantes y se utiliza en todo el mundo. Según la Asociación Mundial de Energía Eólica, a finales de 2019, la capacidad global de energía eólica instalada era de más de 651 gigavatios, lo que representa alrededor del 6% de la capacidad total de generación de energía eléctrica del mundo. (eolica, 2024)

2.1.3 Etapas de la evolución de la energía eólica

En la evolución histórica de los molinos de viento se puede diferenciar cuatro etapas definidas por acontecimientos históricos o técnicos:

- La primera etapa comprende desde las primeras máquinas conocidas hasta el siglo XIV o XV y se caracteriza por una lenta evolución técnica.
- La segunda etapa empieza en el Renacimiento y termina en plena Revolución Industrial. En esa etapa, hay un gran interés por las máquinas eólicas. Se produce una rápida evolución técnica y ello permite al hombre introducir importantes mejoras en los molinos. Se desarrollan los sistemas de orientación, se mejora el diseño de las palas, etc.
- La tercera etapa comprende desde la mitad del siglo XIX hasta mediados del siglo XX. Durante esa época se desarrolla la teoría aerodinámica y se efectúan otros descubrimientos de carácter técnico. Los molinos de viento sufren una transformación completa en su diseño.
- La cuarta y última etapa empieza con la crisis energética de 1973 y llega hasta la actualidad. No se aprecian grandes modificaciones en el diseño, pero se produce una evolución tecnológica, se elaboran métodos de cálculo más rigurosos, se utilizan nuevos materiales más ligeros y resistentes, aparecen los sistemas electrónicos de regulación y control, etc.

2.1.3.1 Primera Etapa: La primera era de la energía eólica

El documento histórico más antiguo que se conoce acerca del aprovechamiento de la energía eólica son unos grabados egipcios que tratan de la navegación a vela del cuarto o quinto milenio antes de Cristo.

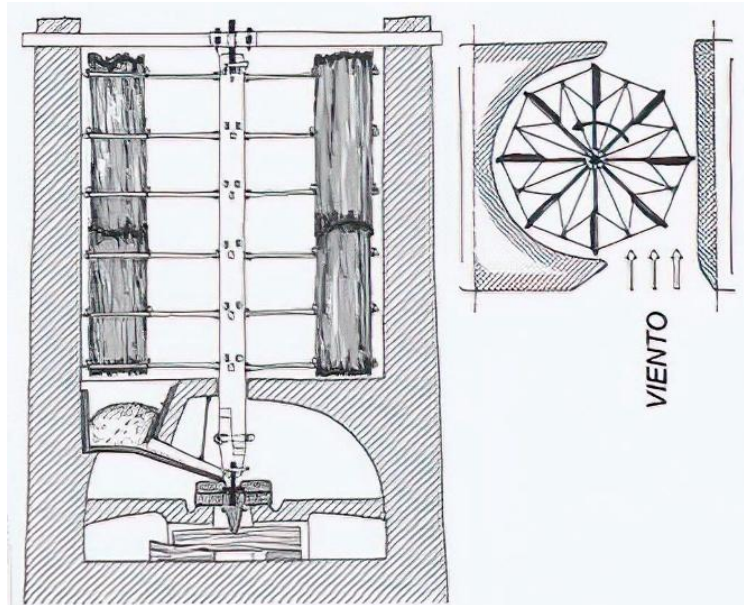


Figura 3. Molino persa

Fuente: <https://renov-arte.es/energias-renovables/>

La primera referencia histórica sobre una posible aplicación de la energía eólica que no fuera la navegación, data del año 1700 a.C., siendo los babilonios los pioneros en utilizar molinos de viento para bombear agua con el fin de regar sus campos.

El primer molino de viento de aplicaciones utilitarias que se conoce con cierto detalle es el molino persa de eje vertical que se utilizó posiblemente varios siglos antes de nuestra era. Este molino se empleaba para moler grano y fue de uso corriente en el Sijistán, zona situada en la antigua Persia en lo que hoy en día es Irán y Afganistán, donde se dice que soplaba un viento muy constante llamado de los 120 días. Se cree que la aparición de este molino tiene alguna relación con la rueda hidráulica aparecida anteriormente.

El molino persa, Figura 3, estaba formado por una torre de mampostería provista de una pared frontal que permitía dirigir el viento sobre las palas.

El rotor estaba formado por unas ocho palas de madera que se unían en el eje central, comunicando el movimiento a las muelas situadas en la base.

2.1.3.2 Segunda Etapa: Mejoras en el aprovechamiento de los molinos



Figura 4. Molino persa

Fuente: <https://renov-arte.es/energias-renovables/>

A partir del siglo XV se extienden por Europa dos tipos de molinos estructuralmente bien diferenciados, y que se desarrollan hasta mediados del siglo XIX. Son los molinos de trípode y los de torre. Los molinos de trípode habían sustituido a los de pivote consiguiendo una sustancial mejora en el sistema de apoyo, lo que hizo posible la construcción de máquinas de mayor tamaño.

Evolución de las palas

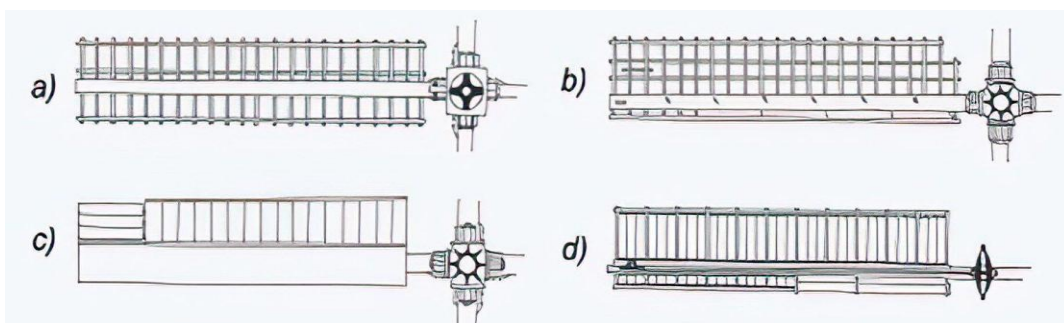


Figura 5. Buque comercial navegando próximo a un parque eólico

Fuente: <https://renov-arte.es/energias-renovables/>

Las palas de los molinos anteriores al siglo XVI se construían con un entramado de varillas a ambos lados de un mástil principal, cubriéndose posteriormente con una tela. Más tarde, el mástil se colocó en el borde de ataque de la pala, de forma que soportara mejor la entrada de aire y le diera cierta torsión a la pala a lo largo de su envergadura, con

el fin de mejorar su rendimiento aerodinámico. Las palas con torsión se desarrollaron en el siglo XVII y la incorporación de los sistemas de regulación aerodinámica en el XVIII.

2.1.3.3 Tercera Etapa: Una nueva concepción de los molinos

En la segunda mitad del siglo XIX empieza a aparecer una nueva generación de turbinas eólicas, con una diferente concepción de diseño. Son máquinas sencillas y su ámbito de aplicación se reduce a zonas rurales más o menos aisladas, donde las ventajas de la industrialización no se han hecho notar y en general se utilizan para bombear agua de los pozos.

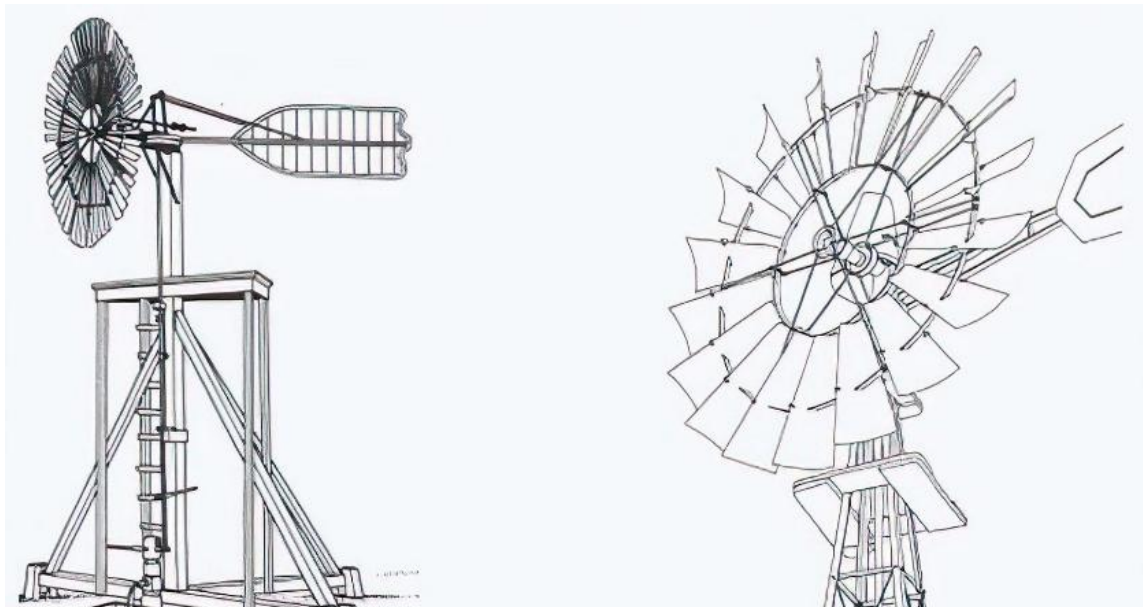


Figura 6. Primeras bombas eólicas

Fuente: <https://renov-arte.es/energias-renovables/>

Las primeras bombas eólicas aparecieron en Estados Unidos en 1854, y fueron desarrolladas por Daniel Halladay. Se trataba de rotores de múltiples alabes (multipala) acoplados a una bomba de pistón.

2.1.3.4 Cuarta Etapa: Desarrollo a partir de 1973

Después de la crisis energética de 1973 en la que hubo un fuerte incremento del precio del petróleo, algunos países realizaron planes de investigación y desarrollo como es el caso de Estados Unidos cuyo primer resultado importante fue la instalación en 1975 del aerogenerador MOD-0, un aerogenerador bipala, de 38 metros de diámetro con palas de metal y 100 kW de potencia. (Renov-arte.es, 2021)

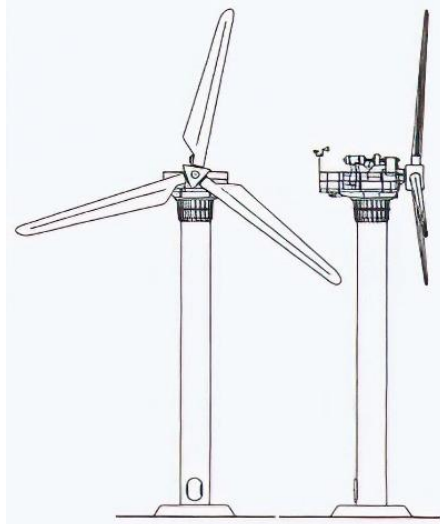


Figura 7. Diseño y fabricación de una maquina experimental de 100w
Fuente: <https://renov-arte.es/energias-renovables/>

2.2 APLICACIONES TERRESTRES VS MARÍTIMAS

Las aplicaciones terrestres y marítimas de la energía eólica tienen diferencias significativas en cuanto a su funcionamiento, ventajas, desventajas y desafíos técnicos.

Energía eólica terrestre:

- Se instala en tierra firme, en zonas con vientos adecuados pero que suelen ser menos constantes y de menor velocidad que en el mar. (Antala, 2019)
- Las turbinas tienen una potencia unitaria típica de unos 5 MW como consecuencia de las limitaciones de transporte y del espacio.
- Los parques eólicos terrestres requieren grandes extensiones de terreno pero el espacio existente por debajo de las turbinas puede ser útil para la agricultura o para otros usos.
- Presentan impacto visual y ambiental, incluyendo la mortalidad de aves y murciélagos, y también son capaces de generar ruido.
- La variabilidad del viento terrestre complica la planificación energética, lo que puede requerir sistemas de almacenamiento para asegurar que el suministro sea constante.
- El mantenimiento y la construcción son más simples y menos costosos que en el caso de los parques marinos (Orlandi, 2019).

Energía eólica marítima:

- El aprovechamiento del viento en aguas abiertas, que es fuerte y constante por la falta de obstáculos, permite mayor producción de electricidad.

- Los parques pueden ser fijos sobre lecho marino o flotantes, optimizando así lugares más profundos, lejos de las costas, con mínimo impacto visual y mínimos conflictos con otros usos de los territorios (Hansen., 2020).
- Las turbinas de mar tienen mayores potencias unitarias, de hasta 10-15 MW, gracias al transporte por el mar y al espacio existente.
- La construcción y mantenimiento son más complicados e incrementan costes, requieren la utilización de equipamiento especial y cumplir con estrictos niveles de seguridad.
- Se llevan a cabo estudios ambientales que minimizan los efectos sobre fauna marina, rutas migratorias y dinámica sedimentaria, y se aplican tecnologías para mitigar los efectos como cortinas de burbujas para proteger mamíferos marinos en la fase de construcción.
- La energía eólica marina es determinante para disminuir la emisión de CO₂, además de poder contribuir a un avance hacia la llegada de energías más limpias, teniendo en cuenta que es necesario un gran potencial para aquellos países que tienen costas profundas y que no tienen plataforma continental (Flores, 2021).

2.3 VENTAJAS DE LA ENERGÍA EÓLICA COMO FUENTE RENOVABLE

La energía eólica no solo es capaz de generar electricidad limpia sino que también genera múltiples beneficios ambientales, económicos y sociales. Muy al contrario que los combustibles fósiles que son finitos y que generan un impacto ambiental importante, el viento se presenta como un recurso disponible en todo momento en muchas partes del planeta (Echevarría, 2023).

Del mismo modo, la generación de electricidad por medio de aerogeneradores no genera emisiones contaminantes, ni tampoco gases de efecto invernadero. Esto contribuye, y de forma directa, a la corrección de las alteraciones climáticas y de la contaminación atmosférica. Efectivamente, esta ventaja es capital, dado que en plena globalización, la disminución de la huella de carbono ha pasado a ser una necesidad social, muy habitual, para toda la población. Desde el aspecto tecnológico, la energía eólica ha tenido un desarrollo muy significativo en las últimas décadas. La mejora en el diseño y las características de las turbinas, así como en los materiales y sistemas de control, ha permitido aumentar la eficiencia y las capacidades de generación de la tecnología y ofrecer, por tanto, una tecnología competitiva con el uso de fuentes convencionales para la obtención de energía (Antala, 2019).



Figura 8. Parque eólico marino Middelgrunden
Fuente: <https://www.freepik.es/fotos-premium/>

Desde el punto de vista económico, aunque la inversión inicial de mercado para la instalación de parques eólicos pueda ser elevada, los gastos de operación y de mantenimiento son relativamente bajos. El mantenimiento periódico de los aerogeneradores no requiere grandes gastos, y la vida útil de los mismos es extremadamente elevada. Esto se traduce en un coste nivelado de la energía competitivo y estable a lo largo del tiempo.

La energía eólica también es capaz de interiorizar un desarrollo socioeconómico. La construcción, operación y mantenimiento de los parques eólicos aproxima empleo en zonas rurales o costeras, contribuyendo de esta manera a la diversificación económica y a la mejora de la calidad de vida de las comunidades. Y la coexistencia de los parques eólicos con la agricultura o la ganadería desemboca en un uso eficiente del territorio sin tener que renunciar por otro lado a otras fuentes de ingreso (Orlandi, 2019)

Por último, la energía eólica asegura la seguridad energética de los países al disminuir la dependencia de los combustibles fósiles importados cuya volatilidad en precios y disponibilidad pueden afectar la estabilidad económica. Al utilizar un recurso local y renovable, se va adquiriendo la autonomía energética, y se fomenta una matriz energética que es más resiliente y diversificada.

2.4 CONTEXTO DEL TRANSPORTE MARÍTIMO COMERCIAL Y SU IMPACTO AMBIENTAL

El transporte marítimo es uno de los medios de transporte más antiguos y utilizados en el mundo. Consiste en el movimiento de mercancías y personas a través de los océanos y mares con barcos y embarcaciones especializadas.



Figura 9. Transporte marítimo

Fuente: <https://citransport.com.pa/impacto-ambiental>

Este recurso de transporte marítimo destaca por su básico papel en el comercio internacional, ya que permite el intercambio de bienes y productos entre diferentes países y continentes.

La relevancia del transporte marítimo en el contexto del comercio internacional se puede afirmar sin la más mínima duda. Con base en la información que aporta la Conferencia de las Naciones Unidas para el Comercio y el Desarrollo (UNCTAD), el transporte marítimo es el responsable aproximadamente del 80% del comercio mundial. Esta buena utilización del transporte marítimo se expresa principalmente debido a sus características: el transporte de grandes volúmenes de carga, su carga que es eficiente desde el punto de vista de la relación coste y beneficio, su uso para acceder a destinos remotos.

Impacto ambiental del transporte marítimo

El transporte marítimo constituye, en consecuencia, una manera eficaz de mover grandes volúmenes de mercancía, pero, al fin y al cabo, genera también un importante impacto medioambiental. A continuación se enumeran los impactos medioambientales generados por el transporte marítimo:

- Emisiones de gases de efecto invernadero: Los barcos se enfocan en constituir una importante fuente de las emisiones de gases de efecto invernadero, y en particular de CO₂.
- Contaminación del aire: Los barcos, además del CO₂, emiten otros contaminantes del aire, como NO_x, SO_x, y partículas en suspensión.
- Derrames de petróleo y sustancias químicas: El derrame de petróleo y sustancias químicas también representa un impacto medioambiente del transporte marítimo importante.
- Ruido submarino: Los barcos emiten altos niveles de ruido en el agua, sobre todo los que son propulsados por medios de diésel.

Se debe recordar que el transporte marítimo influye considerablemente sobre los ecosistemas marinos. Las emisiones de dióxido de carbono y de otros contaminantes pueden acidificar los océanos generando cambios en la vida marina y en los corales, los vertidos de petróleo y de productos químicos pueden dañar severamente los ecosistemas costeros y sus especies dependientes (Salcedo, 2024).

2.5 EMISIONES DE GEI DEL TRANSPORTE MARÍTIMO (CO₂, NO_x, SO_x)

Es preciso mencionar que el transporte marítimo es relevante para la economía de Europa pero la aparición de estos impactos ambientales sigue siendo un motivo más de preocupación ya que según el Informe Medioambiental Europeo del Transporte Marítimo hecho entre la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA) y la Agencia Europea de Seguridad Marítima (AESM) nos dice que las emisiones de CO₂ del transporte marítimo alcanzan las 137,5 millones de toneladas en 2022, es decir un 8,5% más que el año anterior y un 14,2% del total de emisiones que genera el transporte en la UE

2.5.1 Principales emisiones contaminantes del transporte marítimo

El informe destaca varios contaminantes clave:

- Dióxido de carbono (CO₂): gas de efecto invernadero emitido por el transporte marítimo.
- Metano (CH₄): Las emisiones de metano se han duplicado entre 2018 y 2023, representando el 26% del total de este gas en el sector del transporte. Esto se debe, en gran parte, al aumento de buques propulsados por gas natural licuado (GNL), que genera fugas de metano.
- Óxidos de azufre (SO_x): Desde 2014, las emisiones de SO_x han disminuido un 70% gracias a la creación de zonas de control de emisiones (SECA) en el norte de Europa.

- Óxidos de nitrógeno (NOX): Han aumentado un 10% entre 2015 y 2023, con incrementos significativos en el Atlántico (33%) y el Ártico (32%), a pesar de la aplicación de regulaciones más estrictas en algunas zonas.

La designación del mar del Norte y el mar Báltico como zonas de control de NOX en 2021 ha tenido un impacto limitado, ya que solo afecta a los buques nuevos. (Iberoforwarders, 2025)

2.5.2 Emisiones de Gases Contaminantes

Las contaminantes, se refieren principalmente a óxidos de azufre (SOX) y de nitrógeno (NOX), incluyendo también la materia particulada (PM). Sus efectos nocivos se producen relativamente cerca del lugar donde se produce la emisión, como mucho a unos cientos de kilómetros, y son fundamentalmente dos:

- Efectos nocivos sobre el medio ambiente: Los óxidos de azufre y de nitrógeno ascienden en la atmósfera y, combinados con el vapor de agua de las nubes forman ácidos, que vuelven a la superficie terrestre en forma de lluvias ácidas, generando daños en el medio ambiente.



Figura 10. OMI regulaciones ambientales
Fuente: <https://www.mundomaritimo.cl/>

Los ecosistemas más afectados por este efecto son aquellos cuyos suelos son graníticos (ácidos), como son, por ejemplo, los de la mayoría de los países del norte de Europa. Estos efectos son menos acusados en suelos de naturaleza químicamente básica, alcalina, como es el caso de España, excluyendo algunas regiones del norte, debido a que este tipo de suelo neutraliza, en gran medida, las deposiciones ácidas atenuando sus efectos. Las reglas de la OMI para reducir las emisiones de óxidos de azufre entraron en vigor en 2005,

en virtud del Anexo V del Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los buques, comúnmente conocido como Convenio MARPOL.

2.5.3 Emisiones de gas efecto invernadero

Son las emisiones de gases efecto invernadero (GEI), que son las que interesan en cuanto al objeto de estudio. Estas se componen de gases atmosféricos que absorben y emiten radiación dentro de un rango infrarrojo. Este proceso es la causa fundamental del efecto invernadero. Las GEI se componen de vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y ozono. Estos gases son los responsables del calentamiento global de la tierra, ya que potencian el efecto invernadero, se ha llegado a calcular que, si no existiesen, la temperatura media en la tierra se situaría alrededor de los -18°C, en lugar los 15°C que hay de media actualmente. Estas emisiones son naturales, ya que existen en la atmosfera desde antes de que existiera humanidad, no obstante, desde la revolución industrial, cuando comienza el uso extensivo y masivo de combustibles fósiles, el hombre ha sido causante de elevar las cantidades de óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono emitidas a la atmósfera. (Seco, 2020).

2.6 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL Y ECONÓMICA DEL USO DE COMBUSTIBLES FÓSILES EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO

El transporte marítimo comercial es responsable alrededor del 2.9% de las emisiones globales de CO₂, siendo una de las actividades con mayor impacto contaminante del planeta. Los barcos navegan principalmente utilizando combustibles fósiles pesados, como el fuel oil pesado, y generan emisiones de CO₂, cambios en el medio marino, y gases contaminantes como: los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los óxidos de azufre (SO_x), las partículas finas (PM) o los compuestos orgánicos volátiles (VOC) (Energesis, 2024). Es preciso indicar que este tipo de emisiones suelen tener un impacto directo en el calentamiento global, la acidificación de los océanos y la contaminación atmosférica, lo que afecta la salud humana y los ecosistemas por ejemplo los NO_x y los SO_x son precursores de la lluvia ácida y las partículas finas pueden causar enfermedades respiratorias y cardiovasculares a las poblaciones expuestas. (Energesis, 2024)

2.6.1 Crecimiento de las emisiones y proyecciones futuras

Aunque el transporte marítimo tiene una importancia económica singular, las emisiones de gases de efecto invernadero del sector marítimo han aumentado un 20 % en la última década y se espera un incremento de hasta un 17 % para 2050 si no se inician medidas efectivas de descarbonización. Este aumento está íntimamente relacionado con el

incremento del comercio internacional y con que la flota mundial tenga una antigüedad media de más de 27 años (lo que implica un mayor consumo de combustible y mayores emisiones por valor de carga transportada). (Energesis, 2024)

2.6.2 Impactos ambientales adicionales

No solo se emiten gases a la atmósfera, sino que el transporte marítimo produce también residuos sólidos y líquidos que acaban contaminando los océanos. Los principales residuos generados (si no se gestionan) son plásticos, aguas residuales y residuos de carga con materias tóxicas que amenazan la biodiversidad marina y la calidad del agua. (Salcedo, 2024)



Figura 11. Petrolero Brasileiro SA

Fuente: <https://www.naucher.com/transportenvironment>

2.7 NORMATIVAS INTERNACIONALES PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES EN EL SECTOR MARÍTIMO (OMI, EEXI, CII)

La Organización Marítima Internacional (OMI) ha propuesto una década de acción para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte marítimo desde que el 15 de julio de 2011 se puso en marcha la primera serie de medidas internacionales obligatorias para mejorar la eficiencia energética de los buques (MARPOL).

Para apoyar la implementación de las medidas y fomentar la innovación, la OMI ha estado implementando un programa integral de desarrollo de capacidades y asistencia técnica, que incluye una variedad de proyectos globales.

2.7.1 Regulaciones para reducir las emisiones de los barcos

La cuestión del control de la contaminación del aire de los barcos, en particular los gases nocivos de los escapes de los barcos, se debatió en la OMI ya en la década de 1970, pero atrajo más atención en 1988 cuando el Comité de Protección del Medio Marino (MEPC)

acordó incluir la cuestión contaminación en su programa de trabajo. En 1991, la OMI adoptó la Resolución A.719 (17) de la Asamblea sobre la prevención de la contaminación del aire por los buques. La Resolución instaba al MEPC a preparar un nuevo proyecto de Anexo al MARPOL sobre prevención de la contaminación del aire.

El Protocolo de Kyoto, que fue adoptado en diciembre de 1997, fue un paso importante en la lucha contra el cambio climático. Se pone en acción la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático comprometiéndolo a los países industrializados y las economías en transición para limitar y reducir los gases de las emisiones de efecto invernadero (GEI), de acuerdo con los objetivos individuales acordados.

En respuesta a ello, ese año en la Conferencia MARPOL de 1997, la OMI adoptó el Anexo VI de MARPOL sobre regulaciones para la prevención de la contaminación del aire por los barcos. Esta resolución invitaba al MEPC a considerar qué estrategias de reducción de CO₂ podrían ser factibles a la luz de la relación entre el CO₂ y otros contaminantes atmosféricos y marinos. La resolución también invitó a la OMI, en cooperación con la CMNUCC, a realizar un estudio de las emisiones de CO₂ de los barcos con el fin de establecer la cantidad y el porcentaje relativo de las emisiones de CO₂ de los barcos como parte del inventario mundial de emisiones de CO₂.

El MEPC desarrolló medidas operativas y técnicas y la OMI acordó incluir un nuevo capítulo sobre «eficiencia energética» en el Anexo VI de MARPOL.

El 15 de julio de 2011, las Partes del Anexo VI del MARPOL adoptaron reglamentos obligatorios de eficiencia energética para buques: Índice de diseño de eficiencia energética (EEDI) para buques nuevos, Plan de gestión de eficiencia energética de buques (SEEMP) para todos los buques.

Esto representó el primer conjunto de medidas de eficiencia energética obligatorias para cualquier sector del transporte.



Figura 12. Buque portacontenedor
Fuente: <https://www.imo.org/>

Desde su adopción, se han adoptado nuevas modificaciones para reforzar los requisitos del EEDI, en particular para determinados tipos de buques.

En 2016, la OMI adoptó el Sistema de recopilación de datos (DCS) obligatorio de la OMI para que los barcos recopilen y notifiquen datos sobre el consumo de fuel oil de los barcos de más de 5000 GT. La recopilación de datos del primer año calendario se completó en 2019.

En abril de 2018, la OMI adoptó la estrategia inicial sobre la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte marítimo, un marco de políticas que establece ambiciones clave, incluidas las emisiones anuales de gases de efecto invernadero del transporte marítimo internacional al menos a la mitad para 2050, en comparación con su nivel en 2008, y dirigido hacia la eliminación gradual de las emisiones de GEI del transporte marítimo para completar lo antes posible en este siglo, como también, la reducción de la intensidad de carbono del transporte marítimo internacional (para reducir las emisiones de CO₂ por trabajo de transporte), como promedio en el transporte marítimo internacional, en al menos un 40% para 2030, siguiendo esfuerzos hacia el 70% para 2050, en comparación con 2008.

La estrategia inicial incluye el compromiso de evaluar los impactos en los Estados (en particular, los países menos adelantados (PMA) y los pequeños Estados insulares en desarrollo (PEID)) de cualquier medida propuesta para su adopción.

La estrategia inicial de GEI se revisará para 2023. En junio de 2021, la OMI adoptó medidas clave a corto plazo destinadas a reducir la intensidad de carbono de todos los

barcos en al menos un 40% para 2030, en línea con las ambiciones establecidas en la estrategia inicial de la OMI.

Estas medidas combinan enfoques técnicos y operativos para mejorar la eficiencia energética de los buques. Todos los barcos tendrán que calcular su Índice de Eficiencia Energética de Buques existentes (EEXI) y los barcos de más de 5000 GT establecerán su indicador de intensidad de carbono operativa (CII) anual y su calificación CII.

En otras palabras, los barcos obtendrán una calificación de su eficiencia energética (A, B, C, D, E) donde A es la mejor. Esta es la primera vez que la OMI ha establecido un sistema de clasificación formal para los buques. Esto envía una fuerte señal al mercado: se alienta a las administraciones, autoridades portuarias y otras partes interesadas, según corresponda, a proporcionar incentivos a los buques clasificados como A o B. Un barco clasificado como D durante tres años consecutivos, o E, debe presentar plan de acción, para mostrar cómo se lograría el índice requerido (C o superior). (News, 2021)

2.8 TECNOLOGÍAS MODERNAS DE PROPULSIÓN EÓLICA EN EMBARCACIONES

2.8.1 Velas rígidas (WindWings)

Las WindWings son un revolucionario sistema que utiliza el viento para aumentar la eficiencia del combustible en barcos de gran tamaño. No solo repercute en beneficio económico sino que también tienen una repercusión ecológica muy favorable, esto es, disminuyen la contaminación por emisiones de gases de efecto invernadero e incrementan la eficiencia del consumo de combustible.

El sistema ha sido creado por los arquitectos navales BAR Technologies y se basa en velas o alas dinámicas de hasta 45 metros de alto. Tiene múltiples elementos y una optimización avanzada de rutas del viento con el objetivo de aprovecharlos de manera más eficiente. Este sistema permite también un aumento significativo en la eficacia del consumo de combustible.

Las WindWings se centran en los bajos costes de operación, en la facilidad de operación y en el bajo coste de mantenimiento. Las alas se instalan en la cubierta de la embarcación y pueden ser recogidas de forma rápida y fácil mediante un botón, lo que permite la facilidad del sistema.

Además, el sistema es automatizado, lo que significa que no se requiere personal adicional para su funcionamiento. Esto no sólo ahorra costes, sino que también simplifica el proceso operativo.

Los componentes de las WindWings están fabricados con materiales marinos duraderos de alta calidad, lo que garantiza su resistencia y durabilidad en las condiciones adversas del entorno marítimo. (Plaza, 2023)



Figura 13. Buque Bergebulk con velas rígidas

Fuente: <https://www.lavozdeg Galicia.es/>

A medida que el sector marítimo global se centra en la descarbonización, la industria del transporte marítimo está bajo una presión creciente. Se debe identificar rápidamente tecnologías que facilitarán una reducción significativa de las emisiones. La OMI ha decretado que deben ser de un 30% menos para 2030. Además, estas soluciones tecnológicas deben proporcionar ahorros operativos significativos. Así, las empresas podrán adoptarlas y hacer la transición energética con celeridad sin que eso devenga en un problema financiero.

Para conseguir llevar esta tecnología al mercado global, BAR Technologies, Cargill y otros socios del proyecto están iniciando trámites para regularlo con la sociedad de clase DNV. Asimismo, ya han pasado por los talleres para realizar las pruebas de riesgos y seguridad.

Una WindWing mide 20 metros de ancho y 37,5 de altura, es decir, es más alta que un edificio de diez pisos. La superficie de cuatro alas es de 3000 metros cuadrados, más de tres veces la superficie de las alas de un avión A380 (843 metros cuadrados), aclara Cooper. (Fernández, 2024) Estas velas rígidas ofrecen una reducción de hasta el 30% de consumo de combustible para graneleros, buques cisterna y otros grandes buques, al combinar la propulsión eólica con la optimización de rutas para el aprovechamiento del viento. Las velas miden hasta 45 metros de altura y son instaladas en la cubierta de los buques. Este tamaño original será una de las tres especificaciones que se lanzarán al mercado. (naval, 2022)

2.8.2 Rotores Flettner

Los rotores Flettner son grandes cilindros que giran sobre un eje vertical, redirigiendo el flujo de energía eólica para producir una reacción en forma de propulsión en grandes embarcaciones que navegan a través de regiones del océano azotadas por el viento, reduciendo el consumo de combustible.

El funcionamiento del rotor Flettner podría compararse con el de una lata de aerosol, donde una pequeña cantidad de presión aplicada al botón de control libera una gran cantidad de presión del almacenamiento. Se requiere una pequeña cantidad de energía de un motor eléctrico para hacer girar el cilindro Flettner, que redirige el flujo de energía eólica para producir una enorme cantidad de empuje propulsor. Existen métodos alternativos para mantener la rotación del cilindro. (Valentín, 2025)

Un rotor Flettner es un cilindro liso con placas en los extremos que gira a lo largo de su eje longitudinal y, a medida que el aire pasa en ángulo recto a través de él, el efecto Magnus hace que se genere una fuerza aerodinámica en dirección perpendicular tanto al eje longitudinal como a la dirección del flujo de aire. La vela del rotor recibe su nombre del ingeniero aeronáutico e inventor alemán Anton Flettner, que comenzó a desarrollar la vela del rotor en la década de 1920.

En un barco con rotores, los rotores están colocados verticalmente y la sustentación se genera en ángulo recto con respecto al viento para impulsar el barco hacia adelante.

Un barco de rotor utiliza uno o más rotores Flettner montados en posición vertical. Los motores del barco los hacen girar y actúan como velas para impulsar el barco con la energía del viento. Se puede proporcionar una hélice submarina de propulsión convencional para una mayor flexibilidad operativa.

Un primer prototipo, el Baden Baden (antes el Buckau), cruzó el Atlántico en 1925, pero el interés no se reavivó hasta que el ahorro de energía se convirtió en una preocupación importante en el nuevo milenio. El E-Ship 1 se lanzó en 2008 y siguen apareciendo nuevos buques. Desde entonces, se han completado múltiples instalaciones de rotores, incluidos rotores basculantes para permitir el paso por debajo de los puentes.

Por lo general, se ha informado de que las velas de rotor generan un ahorro de combustible del 5 al 20 %. (lab, 2021).



Figura 14. Rotores Flettner de accionamiento eléctrico modernos

Fuente: <https://www.wlogisticsolutions.com/>

2.8.3 Cometas de tracción (kites)

Para entender el funcionamiento de las cometas es necesario conocer el concepto de “ventana del viento”, una zona imaginaria desde el punto de vista visual por dónde se puede mover la cometa. En el manejo de la cometa debemos situarnos de espaldas al viento, de manera que el dispositivo nunca debe volar por detrás de nuestra posición.

Cuando el viento incide en la cometa, genera tracción, pero dependiendo del ángulo o inclinación que tenga la cometa en ese momento con respecto al viento y su velocidad de desplazamiento, generará menor o mayor potencia de tracción.

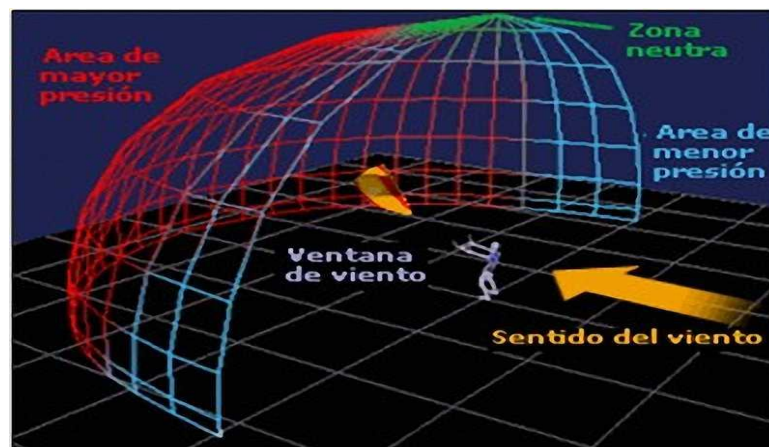


Figura 15. Ventana de viento

Fuente: <https://exponav.org/blog/>

Y justo enfrente del piloto y a media altura, se encontraría la zona de máxima potencia. Por el contrario, justo encima, en el punto llamado “cénit” o “zona neutra” y a ambos lados, la cometa no ejercerá presión sobre nuestra posición, es decir, son los puntos de mínima potencia.

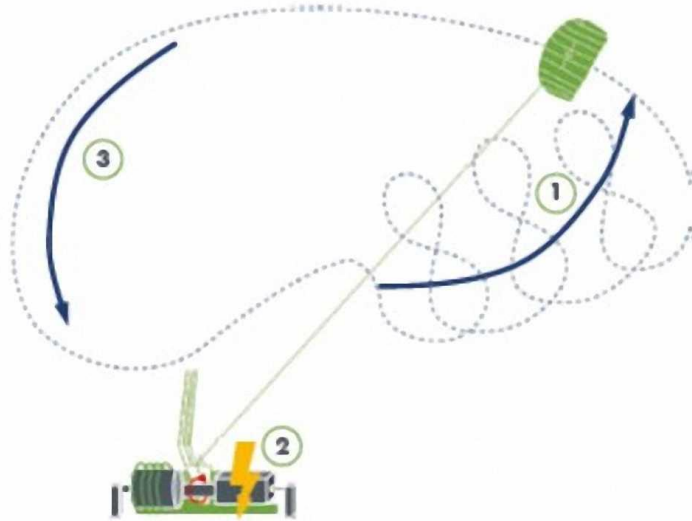


Figura 16. Movimientos en 8 de la cometa

Fuente: <https://exponav.org/blog/>

2.9 APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA *KITE* EN UNA EMBARCACIÓN COMERCIAL

Como ya se ha indicado, el primer caso de éxito en este sector lo consiguió la empresa Skysails, mediante un ingenio formado por tres componentes principales: una cometa de tracción con una amarra para el lanzamiento, un sistema de recuperación, y un sistema de control de funcionamiento automático.



Figura 17. Cometa como ayuda al sistema de propulsión

Fuente: <https://exponav.org/blog/>

La cometa surgía del mástil especial controlado y construido en la proa del barco.

Se trataba de un dispositivo sencillo y seguro que se podía instalar a bordo como un sistema de propulsión auxiliar tanto en buques de nueva construcción como en buques existentes. En este sistema la cometa se elevaba hasta los 300 metros, aprovechando así las fuertes corrientes de viento existentes a esa altitud y generaba cinco veces más potencia propulsora por metro cuadrado de superficie que las velas convencionales. En

función de las condiciones de viento existentes, el buque podía navegar en combinación con sus motores principales, y de esta manera aliviaba su uso.

Respecto a las ventajas de este sistema cabe destacar que las cometas en sí no requieren mástiles sobre cubierta, con lo cual no ocupan demasiado espacio, ni entorpecen las operaciones de carga y descarga. Además, con sus sistemas de control de vuelo, estos dispositivos pueden controlar su propia velocidad aumentando de esta manera la fuerza de tracción. Por el contrario, su principal inconveniente radica en la dependencia del viento. La ausencia de este, o su existencia a baja velocidad, obviamente impide la posibilidad de la propulsión mediante la cometa. Adicionalmente este sistema tampoco es posible utilizarlo cuando el rumbo del buque es proa al viento. Además, una vez la cometa está desplegada, el cambio de rumbo del buque es más lento de lo habitual, por lo que no se puede utilizar este sistema en ninguna situación que requiera rapidez de maniobra, como puede ser en navegaciones por zonas con mucho tránsito, o en canales angostos. (Caro, 2024)



Figura 18. Cometa para generar electricidad

Fuente: <https://exponav.org/blog>

2.10 BENEFICIOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES DE LA PROPULSIÓN EÓLICA AUXILIAR

Lo más innovador del pasado con la tecnología del futuro. Así se podrían describir estas nuevas soluciones de propulsión que la industria marítima está desarrollando para todo tipo de embarcaciones, desde pequeños barcos a gigantescos portacontenedores.

El objetivo principal de estos desarrollos tecnológicos es la reducción de la huella de carbono aprovechando al máximo la energía eólica y evitando el uso de combustibles

contaminantes en las rutas marítimas de todo el mundo. Existen varias soluciones en el mercado y una de las más interesantes es la de WindWings.

Por ejemplo, el Pyxis Ocean navega en base a propulsión eólica gracias a los esfuerzos de Mitsubishi Corporation, Cargill y BAR Technologies. Con sus velas de ala grande de casi cuarenta metros que se pueden instalar en la cubierta del buque de carga para, de esta manera, disminuir el uso de combustible en el viaje.

Los ahorros de combustible llegan hasta un 30% y esta cifra va en aumento si es que se comienzan a utilizar fuentes de poder alternativas y amigables con el medio ambiente. El tamaño de la embarcación no es un problema ya que estos buques de carga superan muchas veces los 300 metros de eslora lo que además los obliga a viajar a máxima velocidad.

De acuerdo con el CEO de BAR Technologies, John Cooper, la potencia del viento reduce los costos en el suministro de combustible de la nave, lo que permite que las emisiones de gases contaminantes se reduzcan al máximo, sin contar el ahorro para la embarcación en cuanto a su operativa.



Figura 19. Buque cargrill

Fuente: <https://www.agendalogistica.cl/>

Estudios demostraron que el uso de combustible se puede reducir en más de una tonelada diaria por lo tanto es una tecnología que no solamente beneficiaría al medioambiente, sino que también a las empresas.

Hace algunas semanas se informaron los resultados de las pruebas del Pyxis Ocean y fueron bastante alentadoras para la empresa. El buque navegó durante varios meses por

el Océano Índico y Pacífico, Atlántico Norte y Sur, Cabo de Hornos y Cabo de Buena Esperanza.

"Las pruebas demuestran claramente que la propulsión asistida por el viento puede garantizar niveles importantes en el ahorro de combustible y en la reducción de las emisiones. Por ejemplo, en condiciones de navegación casi óptimas, durante un viaje en mar abierto se logró un ahorro de combustible de once toneladas por día", indicó Cooper. (Maritima, 2024)

La energía eólica se ha convertido en una de las alternativas más prometedoras para abastecer nuestras necesidades energéticas de manera limpia y renovable. Con el auge de la conciencia ambiental y la urgencia por reducir la dependencia de los combustibles fósiles, los aerogeneradores se han convertido en una imagen común en muchos paisajes alrededor del mundo.

A diferencia de la generación de energía a través de combustibles fósiles, la energía eólica no produce emisiones de gases de efecto invernadero ni residuos tóxicos. Además, los costos de operación y mantenimiento de los parques eólicos son bajos en comparación con otras fuentes de energía.

La clave para el funcionamiento de los aerogeneradores es el aprovechamiento del viento. Cada vez que el viento sopla, las aspas de los aerogeneradores giran y a través de un sistema de transmisión se convierte en electricidad. Cuanto mayor sea la velocidad del viento, mayor será la cantidad de electricidad generada. Es por eso que los parques eólicos suelen ubicarse en zonas con vientos constantes y fuertes, como las costas, donde los vientos marinos son particularmente propicios para la generación de energía eólica.

La energía eólica no es exclusivamente buena para el medioambiente, sino también para la economía de un país ya que ha generado empleo en la fabricación, diseño, instalación y mantenimiento de aerogeneradores asimismo la energía eólica es una fuente de energía renovable que contribuye a dejar de depender de combustibles fósiles importados hacia un país y a la seguridad en el abastecimiento energético y la diversificación de la matriz energética de un país.

2.10.1 Desafíos y soluciones

La variabilidad del viento puede suponer un inconveniente si se quiere obtener una generación constante de electricidad. No obstante, el desarrollo de tecnología de almacenamiento permitirá acumular la energía generada en momentos de poco consumo y utilizarla posteriormente.

El impacto visual de los parques eólicos puede llegar a ser considerado por algunas personas como negativo. Sin embargo, ya se están desarrollando diseños de aerogeneradores más estéticos y también se están implementando estrategias de integración paisajística que permiten reducir dicho impacto visual.

La energía eólica es, según parece, una fuente de energía limpia y renovable con las posibilidades de cambiar nuestra forma de recibir energía. Con la continua evolución en este sentido, así como la creciente capacidad de reflexión en cuanto a la importancia de cuidar el planeta, la energía eólica aparece como una de las más claras opciones para enfrentarse a los caminos energéticos del futuro.



Figura 20. Buque Mol

Fuente: <https://www.agendalogistica.cl/>

Una de las principales ventajas de la energía eólica es que es inagotable. A diferencia de los combustibles fósiles, el viento no se agota y siempre estará presente en mayor o menor medida en diferentes zonas del planeta. Esto significa que podemos aprovecharlo de forma constante y sin dañar el medio ambiente. Además, a diferencia de otras fuentes de energía renovable como la solar, la eólica no depende de la disponibilidad de la luz solar, lo que la convierte en una opción más versátil y adaptable en diferentes lugares y condiciones climáticas.

Además, la energía eólica tiene un bajo impacto en la biodiversidad y el entorno natural. Aunque los aerogeneradores pueden tener cierto impacto visual en el paisaje, su instalación no implica la destrucción de ecosistemas naturales ni la contaminación de cuerpos de agua. De hecho, muchos aerogeneradores se instalan en terrenos agrícolas o marítimos que también se pueden utilizar para otros fines, lo que minimiza el impacto

ambiental. Asimismo, existen estudios y regulaciones para garantizar que los aerogeneradores se ubiquen en áreas donde no afecten negativamente a las poblaciones de aves y murciélagos, protegiendo así la biodiversidad local. (beneficios, 2025)

2.11 ESTUDIOS DE CASO Y PROYECTOS PILOTO RELEVANTES

La innovación revolucionaria de Cargill y BAR Technologies, BAR Tech WindWings de Yara Marine zarpa en aguas abiertas, probando una nueva tecnología que llevará la propulsión eólica de vanguardia a la navegación comercial por primera vez.

El Pyxis Ocean de Mitsubishi Corporation, fletado por Cargill, es el primer buque en ser modernizado con dos WindWings, que son velas de ala grande que miden hasta 37,5 metros de altura y que pueden instalarse en la cubierta de los buques de carga para aprovechar la energía del viento. Producidos por el socio de industrialización Yara Marine Technologies, se espera que generen ahorros de combustible promedio de hasta un 30% en embarcaciones de nueva construcción, que podrían ser aún mayores si se usan en combinación con combustibles alternativos. La instalación de las alas tuvo lugar en el astillero COSCO en China y el Pyxis Ocean está ahora en el agua, realizando su viaje inaugural.



Figura 21. Buque cargill con dos WindWings

Fuente: <https://h2news.cl/2023/>

“La industria marítima está en un viaje hacia la descarbonización; no es fácil, pero es emocionante”, dijo Jan Dieleman, presidente del negocio de transporte marítimo de Cargill. “En Cargill tenemos la responsabilidad de ser pioneros en soluciones de descarbonización en todas nuestras cadenas de suministro para satisfacer las necesidades de nuestros clientes y las necesidades del planeta. Una tecnología como WindWings no

está exenta de riesgos y, como líder de la industria, en asociación con el visionario armador Mitsubishi Corporation, no tenemos miedo de invertir, asumir esos riesgos y ser transparentes con nuestros aprendizajes para ayudar a nuestros socios en la transición marítima a un futuro más sostenible.”



Figura 22. Technology-Windwings takes flight
Fuente: <https://www.superyachtnews.com/>

El proyecto WindWings, que está cofinanciado por la Unión Europea como parte de la iniciativa CHEK Horizon 2020, puede ayudar a la industria a cumplir esos objetivos al ofrecer una solución de actualización que es capaz de descarbonizar las embarcaciones existentes, lo cual es particularmente relevante dado que el 55% de las flotas de graneleros del mundo tienen hasta nueve años.

El desempeño de los WindWings se monitoreará de cerca durante los próximos meses para mejorar aún más su diseño, operación y desempeño, con el objetivo de que Pyxis Ocean se use para informar la ampliación y adopción no solo en la flota de Cargill sino también en la industria. BAR Technologies y Yara Marine Technologies ya están planeando construir cientos de alas en los próximos cuatro años y BAR Technologies también está investigando nuevas construcciones con formas de casco hidrodinámicas mejoradas.

Si el transporte marítimo internacional quiere lograr su ambición de reducir las emisiones de CO₂, entonces la innovación debe pasar a primer plano. El viento es un combustible sin costo casi marginal y la oportunidad de reducir las emisiones, junto con ganancias significativas de eficiencia en los costos operativos de los buques, es sustancial. Hoy es la culminación de años de investigación pionera, en los que hemos invertido en nuestra tecnología única de velas eólicas y hemos buscado un socio de industrialización calificado

en Yara Marine Technologies, para brindarles a los propietarios y operadores de embarcaciones la oportunidad de lograr estas eficiencias”. dijo John Cooper, director ejecutivo de BAR Technologies. (new, 2023)

B/P CAROLINA DEL SUR



Figura 23. Buque Carolina del sur
Fuente: <https://www.norsepower.com/>

En enero de 2021, se instalaron dos velas rotor sails TM de norsepower de 35 m x 5 m en un buque roro que operaba en el mar del norte. Norsepower predijo una reducción de emisiones del buque de aproximadamente un 25 %, y así ha sido. Estas fueron las primeras velas de rotor basculante del mundo que permitieron al buque pasar por debajo de puentes. El buque Carolina del sur no solo es el buque de vela ro-ro más grande de noruega, sino también uno de los veleros más potentes jamás construidos. (**NORSEPOWER, 2023**)

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio tendrá un enfoque investigativo y descriptivo, orientado a evaluar la viabilidad de implementar propulsión auxiliar eólica en buques comerciales. Se basa en un estudio de caso de un buque Ro-Ro comercial, complementado con un análisis comparativo de diferentes esquemas de propulsión eólica. El ámbito geográfico es regional, centrado en el puerto de Manta (Ecuador), que concentra alrededor del 95 % de la carga rodante que ingresa al país. El diseño incluye actividades cuantitativas (modelado energético y análisis financiero) y cualitativas (entrevistas con expertos del sector y revisión documental). Esta combinación de métodos permitirá evaluar técnica, económica y ambientalmente la propuesta en un contexto realista.

2.2 TIPO Y ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

Se empleará una investigación de enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo). Por un lado, se realizará un análisis numérico de los ahorros energéticos y emisiones de CO₂ asociados a la instalación de sistemas eólicos (rotores o velas rígidas) en comparación con esquemas de propulsión puramente convencionales. Este análisis cuantitativo incluirá simulaciones de flujo de viento sobre el buque y modelado energético para estimar reducción de consumo (por ejemplo, usando herramientas CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) o software de rendimiento naval). También se llevará a cabo un análisis económico (proyección de costos iniciales, operación y retorno de inversión) apoyado en un modelo financiero (por ejemplo, análisis de flujo de caja descontado y cálculo del costo nivelado de energía).

Por otro lado, se realizarán entrevistas semi-estructuradas con al menos tres expertos clave del sector marítimo: un ingeniero naval especializado en sistemas de propulsión, un capitán u operador de buque Ro-Ro con experiencia en rutas comerciales, y un especialista en regulaciones y medio ambiente marítimo (por ejemplo, inspector de sociedad de clasificación o técnico portuario). Estas entrevistas recogerán percepciones cualitativas sobre desafíos técnicos, operativos y regulatorios de implementar energía eólica auxiliar. Además se efectuará revisión documental (informes técnicos, manuales de buque, normativa IMO) para complementar la información. Esta metodología mixta (datos duros + opiniones expertas) es adecuada para explorar a fondo la viabilidad integral del proyecto.

2.3 EMBARCACIÓN SELECCIONADA

Se ha seleccionado un **buque Ro-Ro de carga de vehículos** como caso de estudio ejemplar. En concreto se considerará el “*Cosco Tengfei*” de COSCO Shipping Carriers, un buque de 182 m de eslora que opera entre los puertos de Sudamérica y Centroamérica. Este buque arribó recientemente a Manta (Ecuador) con vehículos de importación, por lo que representa bien el perfil de tráfico rodante local (PortalPortuario, 2025). Aunque actualmente no lleva instalado ningún sistema de propulsión eólica, se utilizará como plataforma conceptual para explorar la integración en paralelo de rotores Flettner o velas rígidas junto con el motor convencional. (Para dar referencia práctica, en la realidad existen buques Ro-Ro con sistemas eólicos; por ejemplo, el M/V *Estraden* (de Bore) –que opera en Europa– lleva instalados rotores Norsepower).

El barco por describir recogerá sus principales características técnicas: dimensiones, potencia instalada de propulsión actualmente con uso, consumo típico del gasóleo y rutas típicas. También se describirá el entorno operativo (ruta Manta–Quetzal y condiciones meteorológicas prevalentes en la zona). Esta será la base para dimensionar los sistemas eólicos y estimar la actuación en términos energéticos, pero también operativos.

2.4 ANÁLISIS COMPARATIVO Y TABLA DE PUNTUACIONES PARA SELECCIÓN DE PROPULSIÓN EÓLICA

Las configuraciones híbridas marinas combinan tradicionalmente una fuente de propulsión convencional (motor diesel o similar) junto a propulsión eólica auxiliar (velas rígidas, rotores Flettner o cometas). La literatura describe tres esquemas básicos de integración (serie, paralelo, híbrido o mixto) (Berkehan et al., 2022). Cada esquema marca una forma de acoplar el motor con el sistema eólico:

- **Serie:** El motor principal impulsa un generador que propulsa el propulsor, mientras que la energía eólica se transforma en electricidad que propulsa también el propulsor. Es decir, el motor de combustión sólo produce electricidad, nunca es capaz de propulsar directamente la hélice (Romero, 2021). Un ejemplo análogo: en un automóvil híbrido de serie se carga mediante el motor térmico las baterías o genera corriente para el motor eléctrico.
- **Paralelo:** El motor y el sistema eólico se presentan en paralelo, de forma que cada uno aporta empuje de forma independiente. La hélice es accionada directamente por el motor, mientras que la vela/rotor/cometa es capaz a la vez de realizar fuerza

de avance o bien de empujar adicionalmente el sistema de propulsión. El sistema es capaz de sumar los empujes ejercidos desde el buque (Romero, 2021).

- **Híbrido/mixto:** Es una combinación de los anteriores. El motor y el sistema eólico pueden operar de forma complementaria: por ejemplo, el viento puede cargar baterías o asistencia eléctrica, reduciendo así la carga del motor principal. En la analogía automotriz se corresponde con “serie-paralelo”: a baja demanda opera el motor eléctrico (alimentado por baterías o generador), a alta demanda ambos pueden contribuir (Romero, 2021). Sistemas modernos (por ejemplo, Terntank “Hybrid Solution Plus”) permiten optimizar dinámicamente el uso de viento, motor y almacenamiento energético.

A continuación, se analiza cada configuración en detalle.

Funcionamiento: En un sistema en serie, el motor térmico no acciona mecánicamente la hélice, sino que alimenta un generador eléctrico. Este generador (o baterías intermedias) mueve el motor eléctrico del eje propulsor. Simultáneamente, el sistema eólico produce energía eléctrica —por ejemplo, un rotor Flettner acoplado al generador— que también alimenta el motor eléctrico o carga baterías. En práctica, el flujo de potencia es: *motor térmico* → *generador* → *motor eléctrico* → *hélice*; y *fuerza del viento* → *generador* → *motor eléctrico*. De esta forma, el motor siempre opera en su punto óptimo (rpm constante), pero con doble conversión energética (Romero, 2021). Por ejemplo, el sistema híbrido propuesto por Hoffmeister (2024) conecta pilas de combustible de hidrógeno y baterías en serie con cuatro rotores Flettner, integrando toda la propulsión en trenes eléctricos.

Ventajas: Permite que el motor diésel funcione siempre a regímenes eficientes, mejorando su rendimiento térmico en teoría. Al desacoplar mecánicamente motor y hélice, se facilita la integración de energía eólica y almacenamiento. Además, el motor puede apagarse en fases de bajo requerimiento si las baterías lo permiten. Potencialmente ofrece alta flexibilidad operativa, similar a los vehículos híbridos en serie.

Desventajas: Un punto clave es que el esquema serie implica dobles conversiones (mecánico→eléctrico→mecánico), con pérdidas asociadas en generador y motor. Esto reduce la eficiencia neta. También requiere baterías o controles electrónicos complejos, elevando peso, costo y complejidad de mantenimiento. No existe aún un ejemplo comercial puro en serie con viento; los estudios indican reducciones de combustible modestas. Por ejemplo, un estudio de un buque portacontenedores con seis rotores

Flettner conectados a pilas de combustible de hidrógeno encontró sólo un 3,6% de ahorro de combustible (y ~3,5% de NO_x) (Arabnejad et al., 2024). En resumen, la ganancia energética directa es baja frente al costo del sistema. Desde el punto de vista económico, la alta inversión inicial y los equipos eléctricos incrementan el CAPEX, con retornos de inversión inciertos si el combustible no es muy caro. Ambientalmente, la reducción de emisiones es limitada si se mantiene el motor de combustión; además, si se usan generadores extra o baterías pesadas, puede aumentar el consumo energético. Técnicamente, la mayor cantidad de componentes (motores, generadores, baterías) implica menor fiabilidad y mayor complejidad operativa.

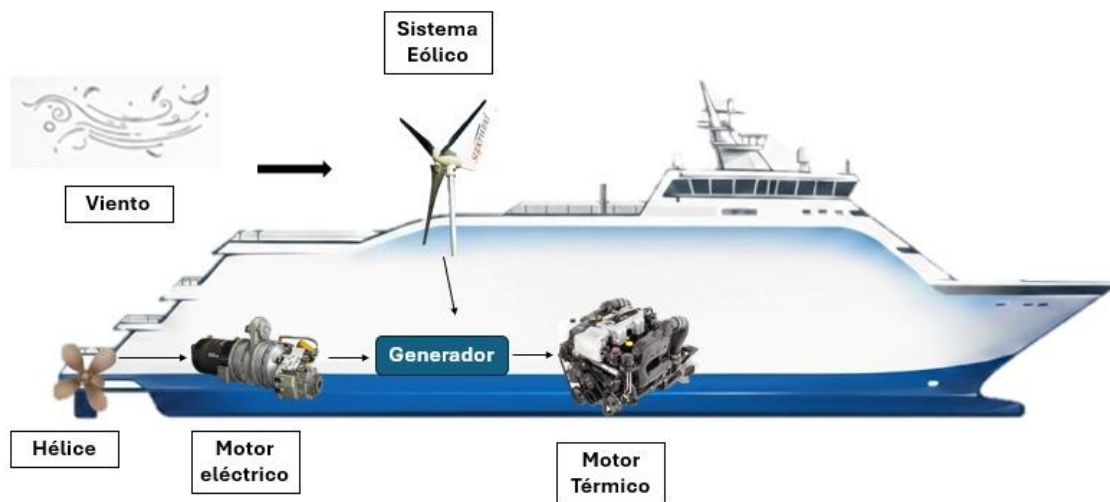


Figura 24. Configuración en serie
Fuente: propia

Eficiencia técnica, económica y ambiental: Dado el doble proceso de conversión, la eficiencia global suele ser inferior a la de un sistema paralelo equivalente. Por ejemplo, según Arabnejad et al. (2024), sólo obtuvieron un ahorro del 3.6% en su diseño híbrido serie-hidrógeno, reflejando pérdidas. Tampoco hay casos reales implementados comercialmente (excepto demostradores de sistemas eléctricos puros sin viento). El **costo** es alto: se necesita infraestructura eléctrica avanzada (inversores, control EMS) y baterías, lo que penaliza el ROI. El beneficio ambiental es moderado; aunque permite pausas del motor, el viento debe primero transformarse en electricidad. En síntesis, la configuración en serie tiende a menores puntuaciones de eficiencia global a causa de sus pérdidas y su elevada complejidad.

- **Configuración en paralelo**

Funcionamiento: En paralelo, el motor principal (diésel, gas, etc.) mueve directamente la hélice, mientras que simultáneamente el sistema eólico genera empuje propio. La fuerza del viento (sobre velas rígidas, rotores o cometas) se aplica directamente al casco o se añade al vector de empuje neto. Ambos sistemas actúan *independientes* sobre la propulsión: el motor impulsa el eje, el viento impulsa el barco (no mediante conversión eléctrica). Por ejemplo, un buque Ro-Ro equipado con rotores Flettner seguirá siendo impulsado por el eje motriz de siempre, y además tendrá un par de rotores que añaden empuje aerodinámico sumando al impulsor (Norsepower, 2025).

Ventajas: La integración mecánica es directa: basta con instalar las velas/rotores sin alterar el tren de potencia principal. Esto conlleva altas ganancias en funcionamiento práctico: los estudios muestran ahorros de combustible significativos. Norsepower predice alrededor de 25% menos emisiones en el buque Ro-Ro *SC Connector* con dos rotores de 35×5 m; mediciones reales confirmaron ~6% en la *M/V Estraden* (1 rotor) (Norsepower, 2025). En general, sistemas instalados reportan ahorros de 4–9% (DNV, 2024), llegando hasta 30% en rutas óptimas (Hernández N. , 2025). Además, al ser pasivo, aporta potencia extra sin consumir energía adicional ni añadir demasiado peso (solo la estructura). El viento es gratuito y cero emisiones, por lo que el impacto ambiental es muy positivo: reduce directamente el CO₂ y contaminantes de los motores. También mejora la imagen ecológica y puede ayudar a cumplir índices EEDI/EEXI (DNV, 2024).

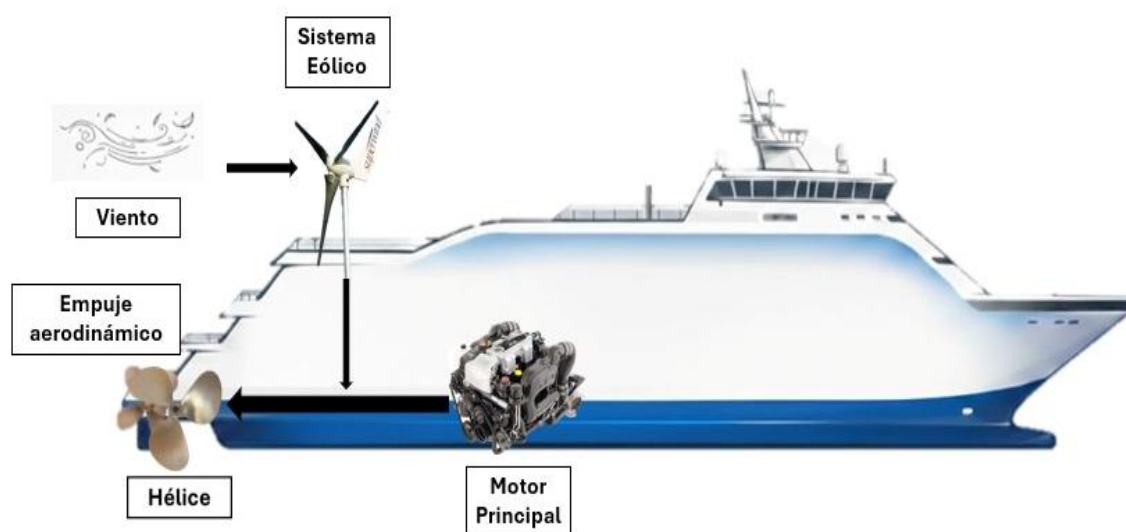


Figura 25. Configuración en paralelo
Fuente: propia

Desventajas: Depende de las condiciones de viento: la contribución varía por ruta y velocidad. No permite optimizar el régimen del motor (como en serie), ya que el motor sigue conectado al eje estándar. Durante maniobras o inactividad (calma, puerto) no aporta. Requiere espacio en cubierta y adaptación estructural (caso de pilotes rotores). Exige sistemas de control automático (para orientar velas/rotores) y ocasionalmente apoyo de baterías ligeras para estabilizar la carga. Desde el punto de vista técnico, es relativamente sencillo, pero introduce desafíos en estabilidad y visibilidad (caso de rotores altos) (DNV, 2024). Su **complejidad operativa** es baja comparada con serie o híbrido.

Casos de uso reales: Hay numerosos ejemplos. Varios ferrys Ro-Ro han sido equipados con rotores Flettner: por ejemplo: el *SC Connector* (Sea-Cargo) con dos rotores (ahorro ~25% de emisiones), la *M/V Estraden* (Bore Ltd) con dos rotores (ahorro 6,1%), o la futura *M/V Delphine* con dos rotores (estimado 7–10% ahorro) (Norsepower, 2025). También compañías como CMA CGM instalaron velas duras (WindWings) y kites en portacontenedores. Un caso notable es el proyecto Oceanbird (Wallenius), que utilizará velas rígidas telescópicas en un buque Ro-Ro de 5 alas para lograr ~90% menos emisiones (DNV, 2024). En la siguiente imagen se ilustra un diseño de buque con vela rígida auxiliar:



Figura 26. Buque Carolina del sur Buque Ro-Ro conceptual con vela rígida “Oceanbird”
Fuente: dnv.comdnv.com.

Eficiencia técnica, económica y ambiental: El esquema paralelo ofrece buena eficiencia energética práctica. Estudios revisados indican ahorros típicos de 5–15% en consumo de

combustible (Hernández N. , 2025), alcanzando hasta 25–30% en rutas con vientos favorables (Arabnejad et al., 2024). Desde el punto de vista ambiental, esta reducción se traduce en análoga disminución de CO₂ y óxidos de Nitrógeno. El análisis económico suele ser positivo: los sistemas WAPS están alcanzando madurez comercial y DNV reporta casos con ROI razonables.

Configuración híbrida (combinada o mixta)

Funcionamiento: La figura 4 muestra un sistema de propulsión híbrido en un buque con un motor diésel principal y una máquina eléctrica (M/G) conectada al eje de la hélice. En el modo PTO (Power Take Out), el motor diésel impulsa la hélice y, al mismo tiempo, hace que la máquina eléctrica funcione como generador, produciendo energía para el bus eléctrico del barco y para cargar las baterías. En el modo PTI (Power Take In), ocurre lo contrario: la energía proviene de las baterías y/o generadores auxiliares para alimentar la máquina eléctrica como motor, apoyando o sustituyendo al diésel para mover la hélice. Así, el sistema permite generar energía a partir del motor principal o emplear energía eléctrica para la propulsión, aportando flexibilidad, eficiencia y reducción de consumo de combustible (Howard, 2025).

Configuración de propulsión híbrida batería-diésel que muestra el modo de operación PTO (Power Take Out) (arriba) y el modo de operación PTI (Power Take In) (abajo).

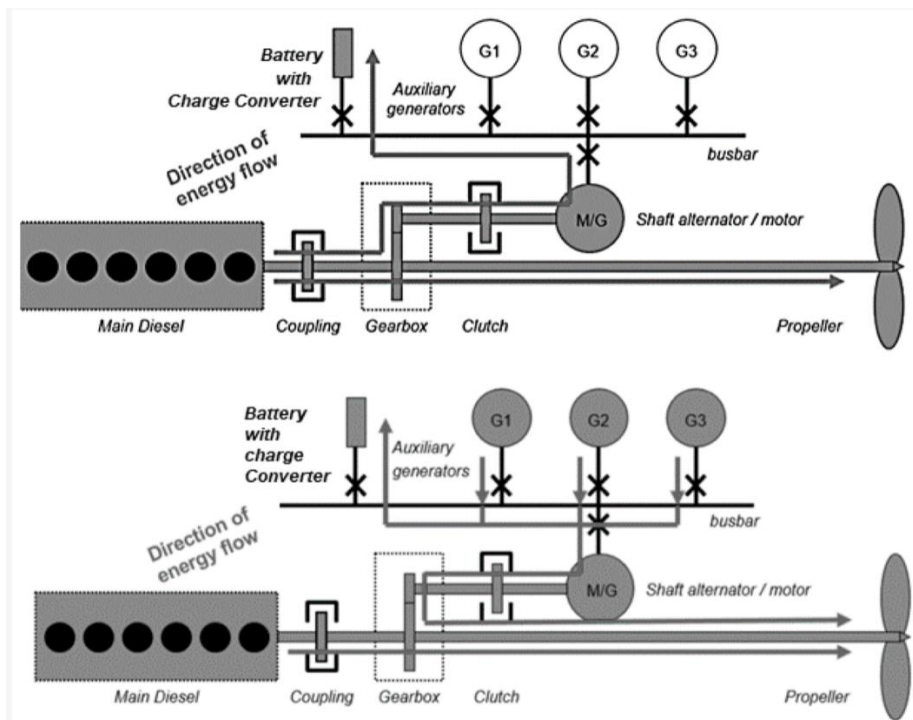


Figura 27. Configuración en híbrido
Fuente: propia

Ventajas: Ofrece la mayor flexibilidad operativa y eficiencia potencial. El motor puede operar siempre en su rango ideal de rpm (como en serie), y el exceso de energía eólica puede almacenarse (como un híbrido eléctrico) para uso posterior (por ejemplo, en maniobras portuarias). Permite maximizar la explotación del viento y minimizar el uso de combustible según las condiciones. En teoría, logra la *suma* de ventajas: el motor no desperdicia energía en generadores, y se evita la doble conversión de potencia (Howard, 2025). Además, puede proporcionar modos “solo-viento” o “solo-motor” si es necesario. Ambientalmente es el mejor de todos, pues reduce al mínimo las horas de marcha del motor.

Desventajas: Tiene la mayor complejidad técnica: requiere integración electrónica avanzada, múltiples convertidores, y sincronización entre motor, generadores, baterías y sistema eólico. Esto encarece fuertemente la instalación y el mantenimiento. Al haber más componentes (baterías, EMS, sensores), crece la probabilidad de fallos y la necesidad de personal especializado. El coste inicial es alto y el retorno de inversión puede ser incierto salvo con incentivos reguladores o altos precios de combustible. Además, el peso de baterías y equipos puede reducir la carga comercial neta (Howard, 2025). Ejemplos reales son escasos: actualmente existen proyectos demostrativos (p.ej. ferries híbridos serie-paralelo) pero pocas implementaciones completas con viento eólico auxiliar. El diseño termodinámico es complicado de optimizar.

Casos de uso reales: Un ejemplo indirecto es la serie de buques tanque de Terntank – desarrollada con NEOT/St1– donde se integraron alas avanzadas con baterías de apoyo y motores preparados para combustibles renovables (Howard, 2025). Aunque se denomina “series hybrid solution plus”, en la práctica combina modos: las alas proporcionan tracción adicional mientras el sistema de control decide cuándo usar baterías y motor en conjunto (Howard, 2025). Otros proyectos de investigación (por ejemplo, Scandlines con un ferry híbrido diésel-eléctrico + rotor, o prototipos con cometas más almacenamiento eléctrico) buscan validar estos esquemas.

Eficiencia técnica, económica y ambiental: Potencialmente ofrece la mayor eficiencia energética. Al almacenar energía eólica sobrante, puede cubrir picos de demanda sin usar diésel y operar el motor a carga constante óptima. Teóricamente, se alcanzarían ahorros de combustible superiores al paralelo puro. En *Arabnejad et al.* se asume un sistema de célula de combustible con baterías: calculan que, con 4 rotores y carga estratégica, el conjunto podría viabilizar una solución cero emisiones con un 20% del peso del buque

destinado al sistema sugiriendo viabilidad técnica (aunque no dan ahorros porcentuales simples). No obstante, la rentabilidad económica puede ser complicada, dado que la inversión sustancial para obtener tecnología de baterías de gran escala y EMS puede hacer que el ahorro de combustible sea prácticamente nulo, lo que resta valor. El impacto ambiental está en su punto óptimo cuando está en uso, sin embargo, la huella de fabricación de baterías puede equilibrar parcialmente el valor (Arabnejad et al., 2024) En función de los criterios técnicos, económicos y ambientales establecidos, se procederá a comparar las tres configuraciones:

- **Eficiencia energética (ahorro de combustible):** La configuración híbrida es la que permite conseguir una optimización plena de la generación y uso de energía y, por ende, los máximos ahorros de combustible. El paralelo clásico es aquél que permite conseguir ahorros de combustible, incluso relevantes en función de las condiciones de viento (en DNV se indica que los ahorros son de 4,5–9% en promedio (DNV 2024), incluso hasta el 30% en condiciones ideales).
- **Complejidad técnica:** El esquema en paralelo es el más sencillo (ya que se limitan a añadir las velas/rotores sin modificar el tren de potencia), lo cual hace que obtenga una elevada puntuación. El híbrido mixto, en cambio, es el menos sencillo (numerosas bajas puntuaciones) también debido a la cantidad de elementos nuevos que hay que añadir en comparación con el paralelo (baterías, controladores) más los problemas de integración, el serie es una opción intermedia (necesita generador y motor eléctrico, pero no tantos elementos como el híbrido total), respectivamente.
- **Costo y viabilidad económica:** En paralelo tiene buena relación costo-beneficio, en serie se requiere equipamiento eléctrico de alto costo y el híbrido el más caro.
- **Impacto ambiental:** El sistema híbrido tiene mayor capacidad de minimizar horas de motor; en paralelo también reduce emisiones significativamente con menor coste.

La Tabla 1 resume estas puntuaciones (*1=más desfavorable, 5=más favorable*), basado en el análisis de datos teóricos de cada tipo de configuración expuestos anteriormente:

Tabla 1

Análisis de criterios

Criterio	Serie	Paralelo	Híbrido
Ahorro energético (%)	3	4	5

Complejidad técnica	3	4	2
Costo inicial (CAPEX)	2	4	2
Mantenibilidad/Fiabilidad	2	4	3
Reducción de emisiones (CO₂)	3	4	5
Total (sumatoria)	13	20	17

Nota: Elaborado por autora con base a información obtenida de búsqueda en bases de datos.

La configuración paralela obtiene la puntuación más alta global (20/30) debido a su equilibrio: ofrece buenas reducciones de combustible y emisiones (casi al nivel híbrido en la práctica), con complejidad y costo relativamente bajos. La serie obtiene la puntuación más baja (13/30) por sus pérdidas adicionales y alto coste relativo. El híbrido mixto arroja 17/30; se destaca en eficiencia y en emisiones, aunque sufre en complejidad y costo. Globalmente y en este contexto, el paralelo es la opción más eficiente y práctica en este momento. Consigue importantes ahorros de combustible y requiere la menor complejidad técnica y unos costes razonables, maximizando así la viabilidad comercial (Hernández N. , 2025). Si bien el híbrido puede conseguir mayores beneficios en condiciones de laboratorio, requiere de grandes esfuerzos financieros y técnicos. En comparación, el paralelo ha conseguido en la práctica ahorros considerables validados por DNV (DNV, 2024) y navieras con el uso de tecnologías probadas (como los rotores Flettner o las velas rígidas). En concreto, los rotadores o buques Ro-Ro reales con sistema paralelo han mantenido velocidades regulares sólo con viento en condiciones adecuadas (Norsepower, 2023).

El paralelo, por tanto, es el esquema que más favorece la mejora ambiental (reducción inmediata de CO₂) pero a un coste y una complejidad soportables; los sistemas de tipo serie (híbridos) sólo tienen sentido en proyectos de mucha especificidad o de investigación (Norsepower, 2023).. En conclusión, la propulsión en paralelo de propulsión eólica auxiliar y motor mecánico es, por tanto, la fórmula técnico-económica-ambiental de mayor factibilidad en el caso de los buques comerciales actuales.

2.5 PROCESO DE APLICACIÓN DE PROPULSIÓN EÓLICA EN PARALELO PARA BUQUE RO-RO

Este es un apartado similar al anterior en que explica cómo se integra el sistema eólico auxiliar, pero aplicado en paralelo al barco que se ha requerido que comparta este paso a paso. En primer lugar se elaborarán planos conceptuales de cómo se pueden ubicar los elementos eólicos (por ejemplo, rotores Flettner o velas rígidas) sobre el barco y ver su

efecto hidrodinámico y estructural. La siguiente fase será simular el flujo de viento al rededor del barco (por ejemplo mediante herramienta CFD) optimizando de esta manera la colocación y dimensiones de los rotores/velas para asegurar el buen funcionamiento y la estabilidad de estos elementos. De manera paralela se analizará la necesidad de reforzar la parte del casco donde se instalará el dispositivo y se determinarán las interfaces de control e interconexión con el motor principal.

A continuación, se definirá el procedimiento de montaje: se irán dando las etapas relativas a la instalación (señalamiento del casco, anclaje de los soportes, tendido de cableado eléctrico de los sensores y actuadores, etc). Se realizarán manuales y guías para la operación y el mantenimiento del sistema eólico. En cada una de las fases se buscará la validación por parte de técnicos expertos de esa parte del sistema: por ejemplo, se requerirá la revisión de un ingeniero naval especializado, para asegurar que el esquema es viable tanto mecánicamente como eléctricamente. Este procedimiento de diseño e integración será objeto de documentación paso a paso en el estudio, mostrando los criterios de ingeniería aplicados (distancias, ángulos de rotación, mecanismos de variación, etc).

2.6 PROCEDIMIENTO PARA EVALUACIÓN DE VIABILIDAD TÉCNICO, ECONÓMICO Y AMBIENTAL

Se establecerá un marco de evaluación triádico:

- **Viabilidad técnica:** Se cuantificará el ahorro de combustible y la reducción de emisiones gracias al uso del sistema paralelo. Esto incluirá cálculos de rendimiento energético, apoyado en las simulaciones y los perfiles de viento en la ruta Manta–Quetzal, y estimaciones de horas-motor ahorradas. Se compararán todos los parámetros de velocidad y autonomía del buque asistido (empujado por el asistente eólico) frente al caso sin el asistente eólico. Se valorará, asimismo, la necesidad de mayor mantenimiento y la fiabilidad esperada del sistema (vida útil de rodamientos rotativos, inspecciones, etcétera).
- **Viabilidad económica:** Un análisis completo de costes: CAPEX (compra de rotores/velas, instalación/modificaciones estructurales) y OPEX (mantenimiento, ligeras pérdidas de carga). Con todo esto se calculará el periodo de retorno de la inversión (ROI) y el valor presente neto (VPN), considerando el ahorro anual de combustible previsto, que se generará durante un periodo de años. También se podrá modelar la sensibilidad económica ante variaciones del precio de

combustible y carga de trabajo. Como referencia, se incluirán cotizaciones o escalas de costes actuales de proveedores (por ejemplo, precios aproximados de sistemas Norsepower o equivalentes), comparaciones con beneficios ambientales (reducción de CO₂, valorada en esquemas de compensación o cumplimiento) o con los ahorros que se puedan derivar de la reducción de costes de combustible.

- **Viabilidad ambiental:** Se estimarán las toneladas de CO₂ evitadas al año y la mejora en el índice de eficiencia ambiental del buque (EIAPP/EEXI) según IMO. Se considerarán beneficios adicionales como contribución al cumplimiento del CII. Por ejemplo, si los rotores reducen 8% del combustible (según caso de Maersk Pelican), esto se traduciría en toneladas de CO₂ menos anuales y menor huella de carbono. Este impacto se complementará con una revisión documental de normativas medioambientales y planes de sostenibilidad del sector (para confirmar que la propuesta apoyaría los objetivos nacionales e internacionales de descarbonización).

En esta evaluación se integrarán también datos cualitativos recogidos en entrevistas: los expertos aportarán su visión sobre la factibilidad real, posibles barreras normativas o de aceptación operativa y recomendaciones de mejora. En conjunto, estos procedimientos constituirán la base para concluir si la propulsión eólica auxiliar en paralelo es factible para el buque Ro-Ro analizado y en qué condiciones.

2.7 HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y MODELADO

Para apoyar los análisis técnicos se emplearán herramientas de software avanzadas. Entre ellas: STAR-CCM+ para modelar el flujo de viento alrededor de la embarcación con los rotores/velas instalados, lo que permitirá estimar la fuerza propulsora generada y optimizar la geometría del sistema eólico. También se utilizó para calcular el rendimiento del buque a diferentes vientos y velocidades, así como el programa financiero Excel para el análisis económico. Estas herramientas aportarán rigor al cálculo de ahorros energéticos y costes, elevando el nivel académico de la metodología.

Además, se prepararán esquemas o diagramas conceptuales donde se muestre la ubicación exacta de los rotores en el buque (planos de cubierta), apoyados en estudios de estabilidad y centro de gravedad. Estos planos ayudan a visualizar el proyecto y son parte de las “simulaciones” en sentido amplio (diseño asistido por computador CAD). El uso de software de modelado y simulación está documentado en la literatura como práctica estándar para evaluar sistemas eólicos navales.

2.8 RECOLECCIÓN DE DATOS E INSTRUMENTOS

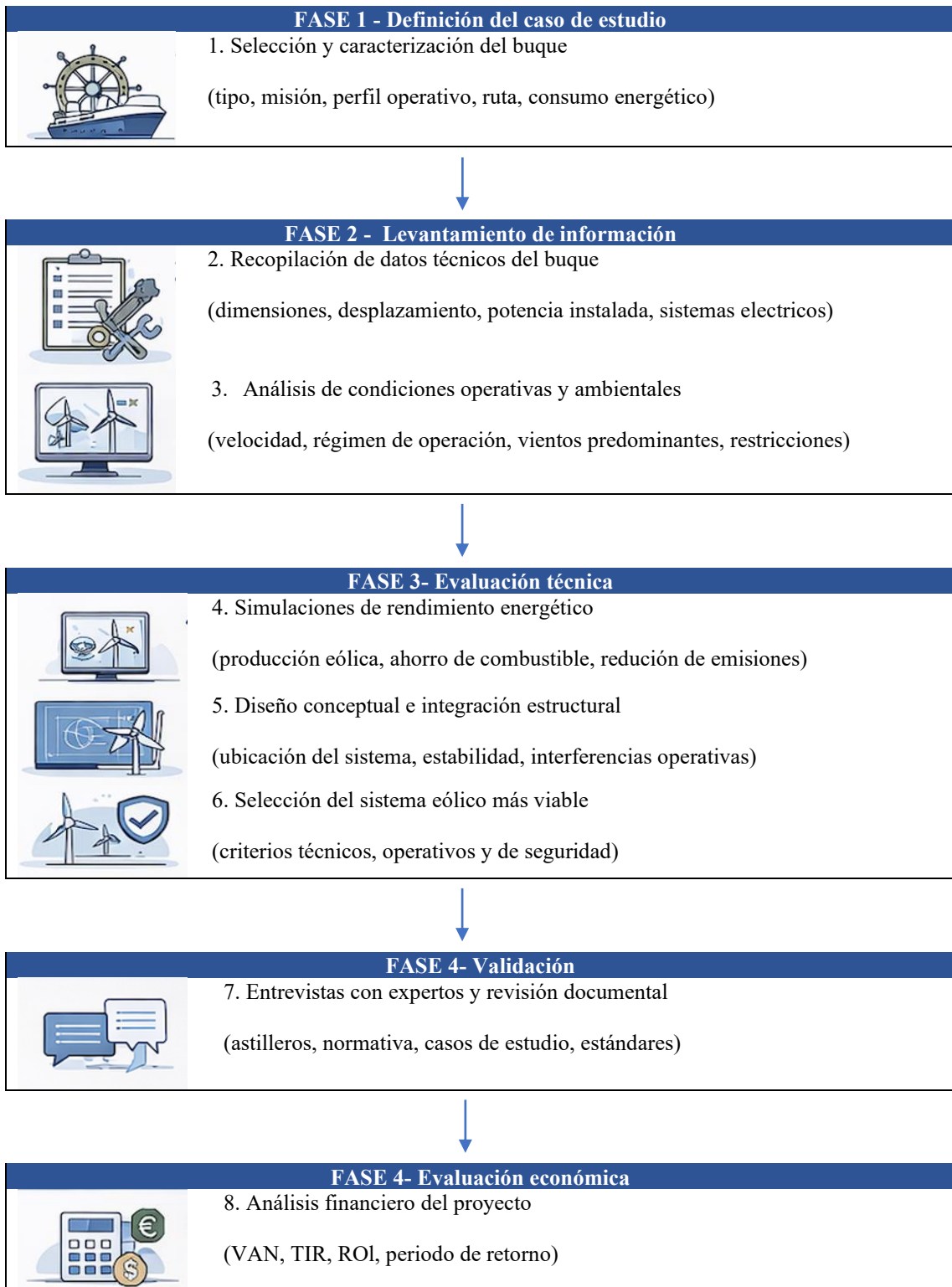
Los principales instrumentos de recolección serán entrevistas semi-estructuradas y revisión documental. Se planificará entrevista con un experto identificado: el ingeniero naval. La entrevista seguirá una guía temática (preguntas preparadas sobre diseños eólicos, operaciones, normativa, costos) pero con flexibilidad para profundizar en respuestas clave.

Paralelamente, se revisarán documentos relevantes: manuales técnicos de buque Ro-Ro, publicaciones de sociedades de clasificación (por ejemplo, guías DNV para sistemas de propulsión alternativos), artículos académicos sobre Wind Assisted Propulsion y reportes de proveedores (Norsepower, Bound4Blue, etc.). También se consultarán estadísticas portuarias de Manta y normativas ambientales nacionales para contextualizar el análisis. Estos datos secundarios aportarán referencias y comparaciones (por ejemplo, parámetros reales de consumo de un Ro-Ro similar) que serán citados en el estudio.

Todos los datos cualitativos se codificarán y analizarán temáticamente para identificar tendencias y opiniones recurrentes. Los datos cuantitativos (consumo, costos) se ordenarán en hojas de cálculo para su posterior tratamiento. Así, la metodología integra un ciclo de recolección estructurada (documentos, entrevistas) y análisis riguroso, garantizando la validez de las conclusiones.

2.9 FLUJOGRAMA DE INSTALACIÓN

El proyecto se inicia definiendo el objetivo y ámbito: diseñar un sistema de propulsión eólica auxiliar en paralelo al motor diésel de un buque Ro-Ro que opera desde Manta (Ecuador). Se selecciona como caso de estudio un Ro-Ro porteador de vehículos que opera rutas entre Sudamérica y Centroamérica, arribando regularmente a Manta. Este buque, aunque aún sin sistemas eólicos instalados, sirve como plataforma conceptual para evaluar la integración de rotores Flettner o velas rígidas junto con el motor convencional. Cada una de estas fases constituye un bloque del flujograma, con decisiones e iteraciones internas (por ejemplo, ajustes en el diseño tras simulaciones). El flujograma gráfico resultante resume estos pasos de forma visual, orientada a especialistas navales y de energía, permitiendo comprender el flujo metodológico completo desde la selección del buque hasta la validación en mar. Las referencias citadas garantizan que cada etapa está sustentada en la literatura técnica y en las mejores prácticas del sector.



CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

El presente capítulo desarrolla el análisis de la información aplicada al caso de estudio seleccionado, correspondiente a un buque Ro-Ro de tráfico comercial que opera en el puerto de Manta, Ecuador. El primer punto en que se caracteriza técnica y operativamente la embarcación elegida, exponiendo sus características básicas, potencia instalada, típica de consumo de combustible y rutas habituales de navegación. Luego se caracteriza el escenario en que se esbozan las condiciones operativas y variables medioambientales de la zona de estudio en cuestión, prestando especial atención al régimen de vientos y variables meteorológicas relevantes en función a la aplicación de sistemas de propulsión eólica auxiliar.

A partir de esta caracterización se plantea el desarrollo de simulaciones de rendimiento energético mediante herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) que servirán para estimar el empuje aerodinámico que generan distintos dispositivos eólicos y su influencia en el consumo de combustible y en las emisiones de CO₂. Finalmente, el diseño conceptual y sus implicaciones de desarrollo estructural para el sistema eólico elegido, pues se incorpora todo un proceso de análisis en el que se recurre a entrevistas con expertos y una revisión documental especializada, asegurando que se lleva a cabo una evaluación técnica, operativa y medioambiental integral.

4.1 SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL BUQUE

El análisis corresponde a un ejercicio de caso de estudio representativo del tráfico rodante que ancla a puerto en Manta, optándose en este sentido por un buque tipo Ro-Ro (roll-on/roll-off) para el transporte de vehículos, por ser esta una tipología que pone en relación un régimen operativo estable, velocidad de servicio relativamente constante y cubiertas, áreas que bien pueden limpias por despejadas, aportando con finalidades de integración física de tecnologías de propulsión eólica auxiliar.

El buque elegido es el Cosco Tengfei, perteneciente al segmento de car carriers de COSCO Shipping, con 182 m de eslora, y operación entre puertos de Sudamérica y Centroamérica, siendo pertinente porque arriba a Manta y refleja el perfil logístico regional utilizado como referencia del estudio.

La selección se sustenta en tres criterios técnicos:

- **Representatividad operativa:** corresponde a una ruta real con recaladas y patrón comercial verificable.
- **Compatibilidad geométrica:** al ser Ro-Ro, su cubierta y superestructura admiten soluciones de instalación sin interferir directamente con bodegas cerradas típicas de otros tipos de buque.
- **Pertinencia metodológica:** el buque sirve como “plataforma conceptual” para comparar alternativas (rotores Flettner vs velas de succión/rígidas) bajo un mismo escenario operativo.



Figura 28. Buque Ro-Ro cosco tengfei
 Fuente: <https://www.marinetraffic.com/>

4.2 PARÁMETROS NAVALES RELEVANTES PARA INTEGRAR SISTEMAS EÓLICOS

En esta etapa del análisis se recopilamos y sistematizamos los principales parámetros navales del buque de estudio, con el objetivo de caracterizar su comportamiento hidrostático, operativo y estructural, y de definir las limitaciones físicas y de estabilidad asociadas a la instalación de sistemas de propulsión eólica auxiliar.

Al tratarse de un buque tipo Ro-Ro, el análisis se centró especialmente en aquellas variables que condicionan la viabilidad de integrar velas rígidas o rotores Flettner, tales como las dimensiones principales, la estabilidad transversal y longitudinal, y la disposición de la cubierta principal, ya que estos factores determinan tanto la seguridad operativa como la factibilidad estructural de incorporar dispositivos eólicos de gran altura.

Los parámetros navales considerados incluyen la eslora total del buque (182 m), una manga aproximada de 32 m, un calado operativo medio comprendido entre 8 y 9 m, el desplazamiento estimado, así como la potencia instalada del motor principal y su régimen de operación característico en navegación sostenida. Adicionalmente, se registraron datos de velocidad de servicio, perfil de carga y consumo de combustible en condiciones normales de operación, los cuales constituyen la base para la definición del escenario de referencia sin asistencia eólica.

De acuerdo con la bibliografía técnica y con informes de sociedades de clasificación, los buques Ro-Ro con esloras comprendidas entre 150 y 200 m presentan consumos diarios de combustible en el rango de 30 a 45 toneladas de fuel oil bajo un perfil operativo típico. Como caso de partida sin viento en el presente estudio se adopta uno medio de 35 t/día que luego se utilizará para obtener los ahorros energéticos y ambientales que se derivan de la implementación de los sistemas auxiliares de propulsión eólica.

Como parte del estudio complementario se revisaron los parámetros de estabilidad intacta del buque, insistiendo especialmente en el centro de gravedad vertical del buque (KG), la altura metacéntrica inicial del buque (GM) y los márgenes de estabilidad disponibles. Este estudio es importante, dado que los sistemas de propulsión eólica auxiliar incorporan estructuras por encima de cubierta que le confieren momentos de escora al buque y que aumentan las solicitaciones estructurales a las que se ve sometido el mismo, por lo que su instalación debe hacerse dentro de los límites admisibles marcados por las normas de la Marina y finalmente se evaluó la integridad estructural de la cubierta principal y la disposición de los espacios libres.

4.3 EVALUACIÓN DE CONDICIONES OPERATIVAS Y METEOROLÓGICAS

La evaluación de las condiciones operativas y meteorológicas se fundamenta en el análisis de datos históricos de viento y estado del mar correspondientes al corredor marítimo comprendido entre el puerto de Manta (Ecuador) y Puerto Quetzal (Guatemala), ruta utilizada como referencia para el buque Ro-Ro Cosco Tengfei.

El entorno ambiental de la ruta se caracterizó mediante el uso de datos secundarios provenientes de fuentes internacionales normalmente utilizadas en el ámbito de la ingeniería marina y en los estudios de transporte marítimo, como los que se indican a continuación:

- Reanálisis meteorológico ERA5 (ECMWF): series de datos de la velocidad y de la dirección del viento a 10 m de altura sobre el nivel del mar denominadas la "análisis" class="xl65">
- Datos para el Pacífico oriental tropical: información promedio de los datos de la altura significativa de ola y periodo dominante.
- Literatura técnica y datos meteorológicos comarcales recogidos y utilizados en la literatura de estudios acerca de la navegación y sobre la energía eólica marina.

Estos datos permiten describir el comportamiento promedio del viento a lo largo del año y establecer escenarios operativos realistas para el modelado energético.

El análisis de los datos históricos muestra que la ruta se encuentra influenciada principalmente por los vientos alisios del noreste y este, los cuales predominan durante la mayor parte del año en el Pacífico oriental.

Tabla 2

Características promedio del viento en la ruta de estudio

Parámetro	Valor típico
Velocidad media anual del viento	6 – 10 m/s
Velocidad máxima frecuente	12 – 14 m/s
Dirección predominante	NE – E
Estacionalidad	Mayor intensidad entre junio y noviembre
Altura de referencia	10 m sobre el nivel del mar

Fuente: Elaboración propia con base en datos ERA5 (ECMWF) y literatura meteorológica marítima.

Estas velocidades se consideran favorables para sistemas de propulsión eólica auxiliar, dado que estudios técnicos indican que los rotores Flettner y velas rígidas comienzan a generar empuje útil a partir de velocidades del orden de 5–6 m/s, alcanzando rendimientos óptimos con vientos laterales superiores a 8 m/s.

Además del viento, se analizaron las condiciones medias de oleaje en la zona, ya que estas influyen en la resistencia hidrodinámica del buque y en los criterios de seguridad para la operación de estructuras altas sobre cubierta.

Tabla 3

Condiciones oceánicas promedio en la ruta

Parámetro	Rango típico
Altura significativa de ola (Hs)	1,5 – 2,5 m
Período dominante	8 – 12 s
Estado del mar	Moderado

Corrientes superficiales	Débiles a moderadas
--------------------------	---------------------

Fuente: Elaboración propia con base en datos oceánicos del Pacífico oriental.

Las condiciones de oleaje identificadas son compatibles con la operación de sistemas eólicos auxiliares, siempre que estos se encuentren debidamente diseñados y controlados, y se disponga de mecanismos de retracción o desactivación en condiciones adversas.

4.4 IMPACTO AMBIENTAL

La evaluación del impacto ambiental se centra en las emisiones de CO₂ evitadas, el grado de contribución a los índices ambientales regulados por la IMO (EEXI y CII) y el alineamiento con los objetivos de descarbonización marítima.

A partir de los datos operativos del buque Ro-Ro Cosco Tengfei y las condiciones de viento de la ruta en Manta, se estimaron los porcentajes de ahorro de combustible para cada escenario (2 rotores Flettner, 3 velas de succión eSAIL y 4 rotores Flettner de gran tamaño). Con base en el consumo anual proyectado, se calcularon las toneladas de CO₂ evitadas utilizando factores de emisión estándar del fuel oil marino. Posteriormente, estas reducciones fueron traducidas en equivalencias ambientales (vehículos retirados de circulación) y se evaluó su incidencia en los índices regulatorios de la OMI, específicamente el EEXI y el CII, determinando el posible escalón de mejora en la calificación energética del buque. Finalmente, los resultados fueron contrastados con estudios de caso internacionales, como el ahorro reportado por el buque Ville de Bordeaux, para validar la coherencia técnica de las proyecciones y verificar su alineación con los objetivos de descarbonización marítima 2030 y 2050 establecidos por la OMI.

A continuación, se presenta una matriz comparativa que resume los efectos ambientales de cada alternativa.

Tabla 4

Matriz de impacto ambiental por escenario

Criterio	Escenario A (2 rotores Flettner)	Escenario B (3 velas de succión eSAIL)	Escenario C (4 rotores Flettner grandes)
Reducción anual de CO₂ (t/año)	3 237 t	2 518 t	> 7 000 t
Equivalente en automóviles retirados de circulación	≈ 1 080 vehículos	≈ 840 vehículos	> 2 300 vehículos
Reducción de consumo de combustible (%)	12–15 %	9–12 %	18–20 %
Mejora estimada del índice CII	1 escalón	1 escalón	1–2 escalones
Contribución al cumplimiento EEXI	Media–Alta	Media	Alta

Comparación con casos reales (Ville de Bordeaux; 2 181 t CO₂/año)	Superior	Similar	Muy superior
Consistencia con objetivos IMO 2030/2050	Alta	Media–Alta	Muy Alta

Nota: Elaborado por autora con base a información obtenida de búsqueda en bases de datos.

El impacto ambiental se valora en función de las emisiones de CO₂ a las que se deja de contribuir, y el cumplimiento de la normativa IMO. Los resultados nos muestran que la instalación de 2 rotores Flettner mueve las emisiones de CO₂ en aproximadamente 3 237 t CO₂/año, que tiene un equivalente a sacar de la circulación más de 1 000 automóviles (con la estimación de 3 t CO₂ por automóvil y año). 3 velas de succión, por su lado, mueven el mercado en 2 518 t CO₂/año y 4 rotores grandes permiten de alcanzar valores superiores a 7 000 t CO₂/año.

Estos valores son favorables, sobre todo si se comparan con estudios recientes donde barcos como el Ville de Bordeaux, ahorran 2 181 t CO₂/año, que ratifican la contribución que hace la propulsión eólica al cumplimiento de los objetivos de descarbonización.

Además de las emisiones, cuando se incorpora propulsión eólica de forma complementaria se logra una mejora en el Índice de Eficiencia Energética Existente (EEXI) y el Indicador de Intensidad de Carbono (CII) del buque exigidos por la IMO desde 2023, y dicha propulsión eólica, al reducir el consumo de combustible en un rango del 9 – 20 %, puede hacer que el Cosco Tengfei mejore su letra CII en uno o hasta dos escalones, reduciendo así las sanciones regulatorias y garantizando ventajas comerciales. Tal y como indica la clasificación de DNV, la mayor parte de los buques que han incluido propulsión eólica obtienen optimizaciones en el medio de una gama del 5 – 20 % en su intensidad de carbono.

4.5 SIMULACIONES DE RENDIMIENTO ENERGÉTICO

El rendimiento energético del buque con sistemas de propulsión eólica auxiliar se construyó a partir de simulaciones numéricas y tenía como finalidad tener una aproximación del empuje aerodinámico que se generaba por el viento y cómo el mismo reduciría el consumo de combustible y las emisiones de CO₂. Para ello se recurrió al uso de herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y modelos de energéticos, con los datos técnicos del buque, las condiciones meteorológicas de la ruta, con los rangos de rendimiento bibliográficos de casos documentados de la realidad.

4.5.1 Software de simulación empleado y enfoque metodológico

El software principal utilizado para el análisis aerodinámico fue ANSYS Fluent, herramienta ampliamente reconocida en ingeniería naval y aerodinámica para la simulación de flujos externos alrededor de estructuras complejas.

Este software se empleó para modelar el flujo de viento alrededor del buque Ro-Ro y de los dispositivos eólicos auxiliares, permitiendo estimar la distribución de velocidades, presiones y la fuerza aerodinámica neta (empuje) generada por rotores Flettner y velas de succión.

De manera complementaria, se utilizó STAR-CCM+ como herramienta de apoyo metodológico para la evaluación conceptual de la resistencia total del buque y su variación en función de la velocidad de navegación y las condiciones de viento.

En este trabajo, STAR-CCM+ no se emplea como un segundo solver independiente de resultados finales, sino como referencia técnica para validar tendencias de resistencia hidrodinámica y coherencia de los supuestos energéticos adoptados, de acuerdo con prácticas habituales reportadas en la literatura especializada.

La combinación de ambas herramientas permitió integrar:

- el análisis aerodinámico detallado del viento (ANSYS Fluent),
- con la evaluación energética global del buque (modelo de consumo y resistencia), sin incurrir en duplicación de resultados ni inconsistencias metodológicas.

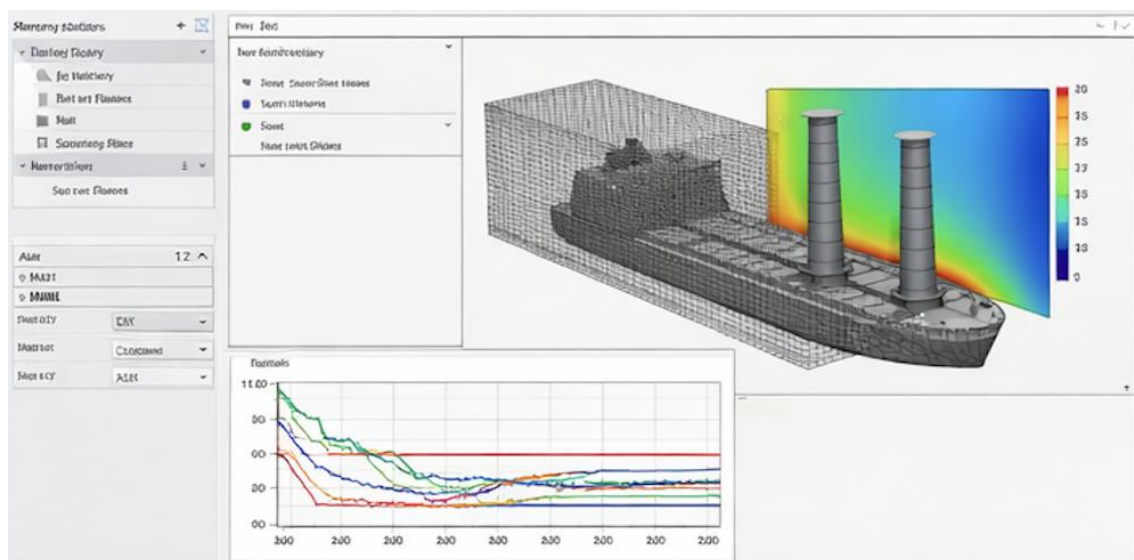


Figura 29. Interfaz del software de simulación empleado
Fuente: ANSYS Fluent.

4.5.2 Escenario de referencia y parámetros de simulación

Previo a la simulación de los escenarios con asistencia eólica, se definió un escenario base de referencia, correspondiente a la operación del buque Cosco Tengfei sin sistemas de propulsión eólica auxiliar.

El Cosco Tengfei es un buque tipo Ro-Ro de 182 m de eslora, que opera regularmente entre el puerto de Manta (Ecuador) y puertos de Centroamérica, incluyendo Puerto Quetzal. De acuerdo con la bibliografía técnica y reportes de sociedades de clasificación, los buques Ro-Ro con esloras comprendidas entre 150 y 200 m presentan consumos diarios típicos de 30 a 45 toneladas de combustible bajo un perfil operativo estándar. En este estudio se adoptó un valor intermedio de 35 t/día como consumo base en ausencia de asistencia eólica, el cual se utiliza como referencia para todos los cálculos comparativos posteriores.

La distancia aproximada de la ruta Manta – Puerto Quetzal es de 2 161 km (1 167 millas náuticas). Navegando a una velocidad de servicio de 15 nudos, el buque completa cada tramo en aproximadamente 3,2 días. Suponiendo 330 días de operación anual, el consumo anual del escenario base asciende a 11 550 t/año de combustible, lo que equivale a 35 967 t de CO₂/año, utilizando un factor de emisión de 3,114 t CO₂ por tonelada de combustible, conforme a metodologías internacionales de cálculo de emisiones.

El valor de 35 967 t de CO₂/año se determina aplicando la metodología estándar de inventario de emisiones basada en consumo de combustible, utilizada en el sector marítimo. Primero se calcula el consumo anual del escenario base, considerando un consumo promedio de 35 t/día y 330 días de operación al año, lo que da como resultado 11 550 t/año de combustible. Posteriormente, este valor se multiplica por el factor de emisión de 3,114 t de CO₂ por tonelada de combustible, conforme a metodologías internacionales de cálculo de emisiones empleadas en el transporte marítimo. La operación matemática es: $11\,550 \times 3,114 = 35\,966,7$ t CO₂/año, que al redondearse da 35 967 t de CO₂/año. Esta metodología corresponde a un enfoque “tank-to-wake”, es decir, estima las emisiones directas generadas por la combustión del combustible a bordo del buque.

4.5.3 Parametrización de las simulaciones y validación con casos reales

La estimación de ahorros energéticos se realizó combinando los resultados del análisis aerodinámico con rangos de desempeño documentados en estudios y experiencias reales de buques comerciales equipados con propulsión eólica auxiliar.

Diversos reportes técnicos y análisis de DNV indican que los rotores Flettner proporcionan ahorros de consumo del orden de 4,5 a 9 % en condiciones medias, alcanzando valores superiores al 20 % en situaciones favorables de viento transversal (Maritima, 2024). Asimismo, la instalación de velas de succión (eSAIL) en el buque Ro-Ro *Ville de Bordeaux* registró ahorros promedio de 1,7 t/día de combustible, equivalentes a 2 181 t de CO₂ evitadas anualmente, con periodos de retorno inferiores a cinco años según el proveedor (Salcedo, 2024).

Por su parte, el buque Ro-Ro *Delphine*, equipado con dos rotores Flettner de 35 m × 5 m, alcanzó reducciones de consumo comprendidas entre 7 y 10 %. Estos valores se utilizaron como rangos de referencia para parametrizar las simulaciones del Cosco Tengfei.

4.5.4 Simulación de escenarios de ahorro energético

Sobre la base del escenario de referencia, se modelaron tres escenarios de propulsión eólica auxiliar, manteniendo constantes las condiciones de viento y operación, y extrapolando los resultados diarios a 330 días de operación anual.

La Figura 30 muestra el resultado de una simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) aplicada al buque Cosco Tengfei equipado con rotores Flettner. En la imagen se observa el comportamiento del flujo de aire alrededor del casco y de los rotores, representado mediante líneas de corriente y un mapa de velocidades del viento. La interacción entre el viento y los rotores genera una fuerza aerodinámica adicional (efecto Magnus), la cual contribuye al empuje propulsivo del buque. Este empuje reduce la carga del motor principal, permitiendo una disminución del consumo de combustible en condiciones de viento transversal favorables, tal como se ha documentado en estudios de DNV y en casos reales como el buque *Delphine*.

- **Escenario A – Dos rotores Flettner:** Suponiendo que se instalen dos rotores Flettner de 30 m de altura y 5 m de diámetro. Se asumió un ahorro medio de **9%** del consumo base (aproximadamente 4,5 % por rotor) acorde con las observaciones de DNV y con el caso *Delphine* (Anexo B.1).
- **Escenario B – Tres velas de succión (eSAIL):** Basado en el caso *Ville de Bordeaux*, se simuló la instalación de tres velas de succión de 22 m de altura. En ausencia de valores específicos para el Cosco Tengfei, se adoptó un ahorro conservador de **7 %** del consumo base, equivalente a la parte alta del rango

observado (1,7 t/día en el *Ville de Bordeaux* representan 5 % del consumo de un Ro-Ro de ~30 t/día) (*Anexo B.2*).

- **Escenario C – Cuatro rotores Flettner grandes:** Se evaluó un escenario de máxima captación de viento con cuatro rotores Flettner de 40 m × 5 m, considerando que, según fabricantes y literatura especializada, esta configuración puede alcanzar reducciones de consumo cercanas al 20 % en condiciones favorables (Brandsolarenergy, 2023). Este escenario se incluye para analizar el potencial máximo teórico de la tecnología, aun cuando su implementación práctica puede estar limitada por consideraciones de estabilidad y espacio disponible (*Anexo B.3*).

En las simulaciones CFD se observó una aceleración del flujo de aire alrededor de los dispositivos eólicos, lo que incrementa la fuerza aerodinámica útil y contribuye a la reducción de la carga del motor principal. Los resultados obtenidos respaldan los valores de ahorro energético adoptados y muestran coherencia con experiencias reales reportadas en la literatura, como el *Ville de Bordeaux* y el *Delphine*.

Este fenómeno incrementa la fuerza aerodinámica útil y contribuye a la reducción de la resistencia efectiva del buque. Los resultados obtenidos respaldan los valores de ahorro energético adoptados para los escenarios simulados y son consistentes con experiencias reales como el *Ville de Bordeaux*, donde se registraron reducciones significativas de consumo de combustible.

Los valores calculados para cada escenario se resumen en la Tabla 5. Se presentan el consumo diario ajustado, el ahorro de combustible anual, las emisiones de CO₂ evitadas y los costes de inversión estimados.

Tabla 5

Resultados de simulación para el Cosco Tengfei

Escenario	Consumo diario de combustible (t/día)	Ahorro anual de combustible (t/año)	Reducción anual de CO ₂ (t CO ₂ /año)	Inversión aproximada (CAPEX)	Recuperación de la inversión estimada
Escenario de referencia	35 t/día (sin asistencia eólica)	–	–	–	–
A) Dos rotores Flettner (9 %)	31,9 t/día	1 040 t	3 237 t CO ₂	2,6 M USD (2 × 800 k USD por rotor + 1 M USD de instalación)	4,2 años

B) Tres velas de succión (7 %)	32,6 t/día	810 t	2 518 t CO ₂	2,5 M USD (3 × 700 k USD + 0,4 M USD de instalación)	5,1 años
C) Cuatro rotores Flettner (20 %)	28,0 t/día	2 310 t	7 188 t CO ₂	5,7 M USD (4 × 800 k USD + 2,5 M USD de instalación)	4,1 años

Nota: Elaborado por autora con base a información obtenida de búsqueda en bases de datos.

El factor de emisión de 3,114 t CO₂/t de combustible proviene de los valores por defecto establecidos en las directrices internacionales para inventarios de gases de efecto invernadero, específicamente en las 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories del Intergovernmental Panel on Climate Change (Volumen 2: Energía), donde se establece el factor para fuel oil pesado marino en función de su contenido de carbono (aprox. 0,86 t C/t combustible). Este mismo valor ha sido adoptado por la International Maritime Organization en sus estudios de GEI y en metodologías utilizadas para reportes como el IMO Data Collection System (DCS) y análisis de eficiencia energética. Por tanto, el 3,114 t CO₂/t combustible es un factor estándar internacionalmente reconocido para combustibles marinos tipo HFO/MDO en cálculos “tank-to-wake”.

La siguiente figura muestra comparativamente el consumo diario de combustible para cada escenario. Se observa la reducción progresiva al añadir dispositivos eólicos.

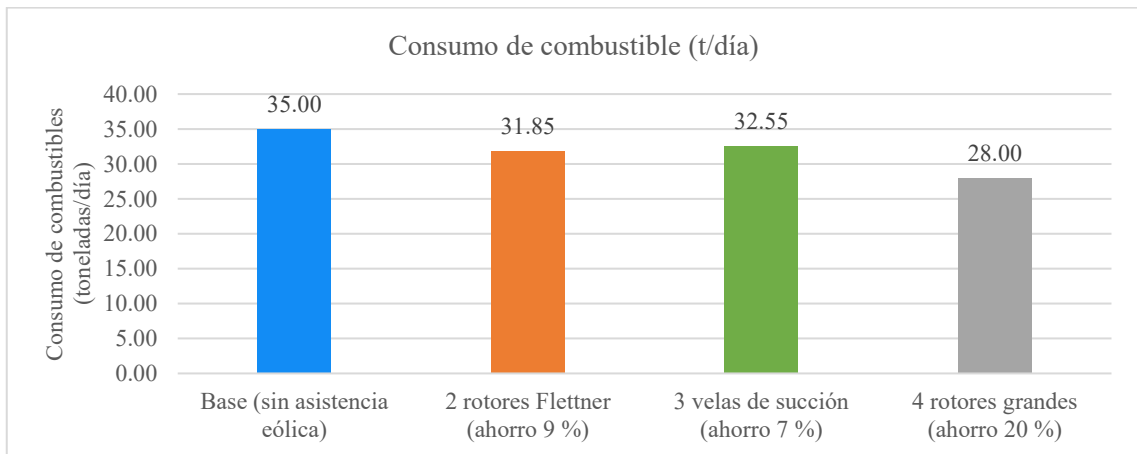


Figura 30. Consumo de combustible (t/día)

Elaborado por autora con base a información obtenida de búsqueda en bases de datos.

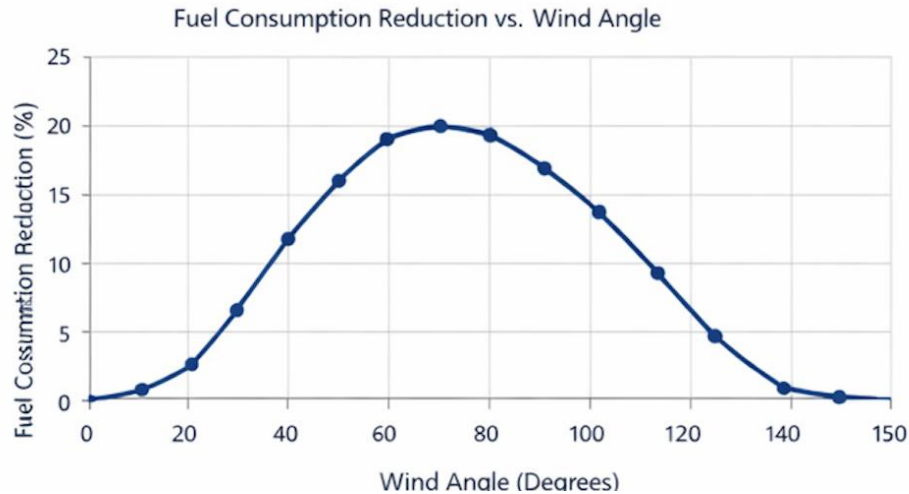


Figura 31. Reducción de consumo de combustible según el ángulo del viento.

La Figura 34 presenta la relación entre el ángulo de incidencia del viento y la reducción del consumo de combustible del buque con asistencia eólica. Los resultados muestran que el mayor beneficio se obtiene cuando el viento incide de forma transversal (entre 50° y 90°), alcanzando reducciones cercanas al 20 %.

Este comportamiento concuerda con la teoría aerodinámica de los sistemas de propulsión eólica y con los datos reportados por fabricantes como Norsepower, donde se señala que los rotores Flettner son más eficientes bajo vientos laterales. Los resultados anteriores amparan la elección de los itinerarios y escenarios que resulten más favorables, en función del ahorro energético.

4.6 DISEÑO CONCEPTUAL E INTEGRACIÓN ESTRUCTURAL

El sistema de propulsión eólica auxiliar -diseño conceptual- tuvo como finalidad la integración técnica y operativa de los dispositivos eólicos seleccionados en el buque Ro-Ro Cosco Tengfei, garantizando la compatibilidad con la arquitectura naval del mismo buque, la estabilidad que presenta este y el régimen de operación comercial.

Una primera fase consistía en la definición de la disposición preliminar de los rotores Flettner y velas de succión sobre la cubierta, teniendo en cuenta la geometría del buque y la inclusión de áreas libres que son propias de los buques Ro-Ro, así como la no interferencia con la operativa de carga rodada, ni con los sistemas de carga, de seguridad y de operación. La disposición longitudinal y transversal de los dispositivos, se definía buscando maximizar la exposición al viento aparente y, a su vez, minimizar los efectos adversos sobre la estabilidad transversa y longitud del buque y su superestructura.

La búsqueda de la optimización de posición, tamaño y orientación de los dispositivos eólicos fue mediante simulaciones CFD de Dinámica de Fluidos Computacional, que le

permitió evaluar la interacción del flujo de viento sobre el casco y la superestructura del buque.

4.7 SELECCIÓN DEL SISTEMA EÓLICO MÁS VIABLE

Con la información técnica y económica recopilada se comparan las alternativas (velas rígidas vs rotores Flettner, y distintas configuraciones de integración). Se evalúan criterios de ahorro energético, complejidad técnica, inversión y emisiones. En la tesis se confecciona una matriz de puntajes para esquemas (serie, paralelo e híbrido), destacando que la configuración en paralelo fue la más favorable. El modo paralelo presenta reducciones notables de combustible con la menor complejidad y costo relativo. Además, ofrece reducción de CO₂ significativa en relación costo/complejidad. Por ejemplo, estudios citados muestran ahorros promedio de 4,5–9% incluso hasta 30% en condiciones ideales con sistemas paralelos. Así, se concluye que la mejor opción actual es integrar el sistema eólico en paralelo al motor existente.

4.7.1 Implementación técnica a bordo (instalación física).

En esta etapa se planifica y se lleva a cabo la instalación del sistema eólico en el barco; se describe un procedimiento de montaje que comprende el corte y marcaje en el casco, la colocación de anclajes y soportes en cubierta, la instalación mecánica de velas/rotores y el cableado de sensores y actuadores; se preparan manuales o guías de montaje, de operación y de mantenimiento del sistema. En la instalación se valida cada paso con expertos nave; (por ejemplo, un ingeniero naval que valida la viabilidad mecánica de los montajes). Se incorporan sistemas de seguimiento (sensores de viento, inclinómetros) interconectados al puente de mando. Al momento de la instalación se documenta todo el proceso a modo de guía, con criterios de ingeniería como distancias, ángulos, mecanismos de control, etc.

4.7.2 Pruebas y validaciones

Una vez que ha sido instalado, se procede a la realización de ensayos de mar para comprobar el funcionamiento del sistema instalado. Se comprueba la estabilidad y maniobrabilidad del buque a vientos reales, la respuesta de las velas/rotores y su integración con el motor diésel. Se mide el ahorro de combustible en condiciones de operación, comparando el consumo con la asistencia eólica y sin ella. Se valida también la estimación previa elaborada en los modelos de simulación, ajustando parámetros. Se realizan pruebas de funcionamiento del sistema del control y del sistema de seguridad. Estas pruebas pueden incluir mediciones de flujo de fuerza generada por el viento y

pruebas de carga estructural de los soportes. El objetivo es certificar que el sistema opera según lo diseñado y cumplir con las normativas navales.

4.8 ENTREVISTAS CON EXPERTO Y REVISIÓN DOCUMENTAL.

Como complemento a la fase de análisis cuantitativo, se realizó una nueva fase de investigación de carácter cualitativo que utilizaba una entrevista semiestructurada y la revisión de la documentación especializada. En particular, se realizó una entrevista al Ingeniero Naval Rafael Espinosa Semper, graduado de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), seleccionado por su experiencia profesional en proyectos de diseño y operación de buques comerciales y su conocimiento en criterios de estabilidad e integración estructural y normativa naval.

El objetivo de dicha entrevista fue validar la parte técnica del estudio y el de contrastar los resultados obtenidos mediante las simulaciones y los criterios prácticos de la ingeniería naval. En el transcurso de la entrevista se plantearon cuestiones clave como la viabilidad real de instalar los sistemas eólicos en los Ro-Ro existentes, los límites operativos aceptables, los criterios de clasificación demandados por sociedades como DNV, los impactos estructurales y operativos asociados con tecnologías de este tipo.

La aportación del ingeniero entrevistado ayudó a reforzar el propio análisis del diseño conceptual, sobre todo con respecto a la estabilidad del buque, y la distribución de las cargas en cubierta y la necesidad de automatización de los sistemas eólicos para una operación segura. Paralelamente, se realizó la revisión de la documentación que incluyó manuales técnicos del propio buque, guías de sociedades clasificadoras (DNV, IMO), y artículos. Las preguntas y los detalles de la entrevista se encuentran en los anexos.

4.9 ANÁLISIS FINANCIERO DEL PROYECTO

4.9.1 Análisis financiero (CAPEX, OPEX, ROI)

Partiendo de las simulaciones energéticas, se establece un análisis económico detallado. Para el caso del sistema de energía eólica se estima el capital invertido (CAPEX): la compra de velas o rotores, estructuras de soporte, trabajo de instalación y reforzamientos en la estructura. También se consideran costes operativos (OPEX): el mantenimiento, las modificaciones necesarias y las pérdidas de potencia en caso de ser menores. A partir del ahorro de combustible proyectado se obtiene el retorno de la inversión (ROI) o el valor presente neto (VPN). Por ejemplo, se hacen suposiciones de CAPEX entre 1500-2500 USD/kW para rotores Flettner, con un típico ROI de 8-12 años. La estimación también incluye variaciones del precio del fuel y carga de trabajo (análisis de sensibilidad). Este

proyecto de investigación se basa en que con los datos de CAPEX/OPEX y ahorro de fuel obtenido se obtendrá un ROI y VPN. Se contrasta también con cotizaciones reales de proveedores (Norsepower por ejemplo) para validar el importe obtenido.

4.9.2 Análisis económico

La evaluación financiera considera tanto la inversión inicial como los ahorros operativos. Para los rotores Flettner se asumió un coste unitario medio de 800 000 USD y para las velas de succión 700 000 USD, más los costes de instalación (refuerzos estructurales, cableado y puesta en servicio). La vida útil proyectada de los equipos es de 15 años con mantenimiento básico.

El Valor Presente Neto (VPN) se calculó aplicando la metodología clásica de evaluación de proyectos de inversión, descontando los flujos de caja futuros al valor presente con una tasa del 8% anual, considerada como tasa de descuento representativa del costo promedio de capital para proyectos marítimos de eficiencia energética.

Primero, se determinó el flujo de caja anual, que en este caso corresponde al ahorro económico anual por reducción de consumo de combustible (por ejemplo, en el Escenario A: 1 040 t/año × 600 USD/t = 623 700 USD/año). Luego, el VPN se obtuvo utilizando la siguiente expresión:

$$VPN = -CAPEX + \sum_{t=1}^{15} \frac{Ahorro\ anual}{(1 + 0,08)^t}$$

Donde:

- CAPEX es la inversión inicial del sistema (ej. 2,6 M USD en el Escenario A),
- 0,08 es la tasa de descuento (8 %),
- 15 años corresponde a la vida útil proyectada del sistema eólico,
- El ahorro anual se asume constante en términos reales (USD 2025).

En términos prácticos, el procedimiento fue:

1. Se toma la inversión inicial como flujo negativo en el año 0.
2. Se descuentan los ahorros anuales durante 15 años.
3. Se suman los valores presentes de esos ahorros.
4. Se resta la inversión inicial.

Tabla 6

Análisis económico

Parámetro	Escenario A (2 rotores Flettner)	Escenario B (3 velas de succión)	Escenario C (4 rotores Flettner grandes)
-----------	----------------------------------	----------------------------------	--

Inversión total (CAPEX)	2,6 M USD	2,5 M USD	5,7 M USD
Ahorro anual de combustible (t/año)	1 040 t	820 t	2 310 t
Ahorro económico anual (USD)	623 700 USD	491 800 USD	1 390 000 USD
Periodo de retorno (Payback)	4,2 años	5,1 años	4,1 años
VPN a 15 años (8 %)	Positivo desde año 5	Positivo desde año 7	Positivo desde año 5
Consumo energético propio	Bajo	Muy bajo	Bajo
Complejidad de instalación	Media	Baja	Alta
Restricciones de espacio	Moderadas	Mínimas	Altas

Nota: Elaborado por autora con base a información obtenida de búsqueda en bases de datos.

- En el Escenario A se presentó una inversión total de 2,6 M USD se recupera en aproximadamente 4,2 años, generando un VPN positivo a partir del año 5. Este resultado concuerda con los estudios de ahorro de combustibles de Norsepower, que reportan periodos de recuperación de 3–7 años (Carjova et al., 2025). El ahorro anual de 1 040 t de combustible equivale a 623 700 USD en precios de 2025.
- El Escenario B presenta una inversión similar (2,5 M USD) pero un ahorro anual menor, lo que extiende el periodo de retorno a 5,1 años. Los sistemas de succión eSAIL tienen la ventaja de un diseño compacto y de bajo consumo eléctrico; sin embargo, los ahorros de combustible reportados (1,7 t/día en el *Ville de Bordeaux* sugieren beneficios moderados para buques de tamaño medio. Aun así, se presentan retornos < 5 años en aplicaciones reales, lo que respalda la viabilidad del escenario con condiciones de viento favorables.
- El Escenario C contempla cuatro rotores Flettner grandes. Aunque la inversión inicial aumenta (5,7 M USD), el ahorro energético del 20 % produce una reducción anual de 2 310 t de combustible (1,39 M USD), de modo que la recuperación se logra en alrededor de 4,1 años. Este caso demuestra el potencial de la tecnología en rutas con viento transversal persistente; no obstante, la disponibilidad de espacio y la estabilidad del buque limitan la adopción de múltiples rotores en embarcaciones existentes.

Con base a los datos obtenidos se presenta el siguiente flujo de matriz:

Tabla 7*Flujo de caja e indicadores financieros*

Indicador	Escenario A (2 rotores Flettner)	Escenario B (3 velas eSAIL)	Escenario C (4 rotores Flettner grandes)
Inversión inicial (Año 0)	-2 600 000	-2 500 000	-5 700 000
Flujo neto anual promedio (Años 1–15)	+581 000	+416 000	+1 320 000
Valor Presente Neto (VPN a 15 años, 8 %)	+2,18 M	+0,89 M	+5,24 M
Tasa Interna de Retorno (TIR)	16–18 %	12–13 %	17–19 %
Periodo de Retorno (Payback)	4,2 años	5,1 años	4,1 años
Ahorro anual de combustible	1 040 t/año	820 t/año	2 310 t/año
Ahorro económico anual	623 700 USD	491 800 USD	1 390 000 USD

Nota: Elaborado por autora con base a información obtenida de búsqueda en bases de datos.

El Escenario A muestra un retorno robusto con una TIR de entre 16–18 %, sustentado en ahorros significativos de combustible y una inversión inicial moderada. El Escenario B, aunque presenta un CAPEX ligeramente inferior, genera flujos netos menores, lo que se traduce en un VPN reducido y un periodo de retorno más prolongado. Por su parte, el Escenario C, a pesar de requerir la mayor inversión, es el que ofrece la mejor rentabilidad absoluta, con un VPN superior a 5,2 millones USD y una TIR que puede alcanzar el 19 %, gracias al considerable ahorro energético logrado por la instalación de cuatro rotores Flettner de gran tamaño.

CAPITULO IV: ANÁLISIS Y PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE ENERGÍA EÓLICA PARA BUQUE

Este capítulo interpreta los resultados obtenidos en el Capítulo III y presenta una propuesta técnica-económica para la integración de propulsión eólica auxiliar en un buque Ro-Ro que opera entre Manta (Ecuador) y puertos de Centroamérica. Para ello se comparan tres escenarios de asistencia eólica, se selecciona el más conveniente en términos de ahorro de combustible, inversión y complejidad de instalación y se detalla una propuesta de implementación orientada a la realidad del buque Cosco Tengfei.

5.1 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS ESCENARIOS SIMULADOS

En el Capítulo III se modelaron tres configuraciones de asistencia eólica para el Cosco Tengfei: (A) dos rotores Flettner, (B) tres velas de succión (eSAIL) y (C) cuatro grandes rotores Flettner. La simulación partió de un consumo de referencia de 35 t/día de combustible para el buque sin asistencia eólica y calculó el consumo diario ajustado, el ahorro anual de combustible, la reducción anual de CO₂ y el costo de inversión (CAPEX) de cada alternativa.

La Tabla 8 resume los principales resultados obtenidos en el estudio. Para fines comparativos se reporta la reducción porcentual del consumo diario, el ahorro de combustible y de emisiones proyectado a 330 días de operación anual, así como la inversión aproximada y el periodo de recuperación estimado. Los valores de inversión incluyen el costo de los equipos y de su instalación.

Tabla 8

Comparación de escenarios

Escenario	Sistemas instalados	Consumo ajustado (t/día)	Ahorro anual (t)	Reducción de CO ₂ (t/año)	Inversión (USD)	Payback (años)
Referencia	Sin asistencia eólica	35,0	–	–	–	–
A	2 rotores Flettner	31,9 (-9 %)	1 040	3 237	≈2,6 M	4,2
B	3 velas eSAIL	32,6 (-7 %)	810	2 518	≈2,5 M	5,1
C	4 rotores Flettner grandes	28,0 (-20 %)	2 310	7 188	≈5,7 M	4,1

Los resultados muestran que el escenario C proporciona la mayor reducción de combustible (20 %) y de emisiones, a costa de una inversión elevada aproximadamente 5,7 M USD y mayores retos operativos por la cantidad y tamaño de los rotores. El escenario A logra un ahorro moderado del 9 % con una inversión de alrededor de 2,6 M USD y un periodo de retorno estimado de 4,2 años. El escenario B, basado en velas de succión, ofrece un ahorro inferior (7 %) con una inversión similar a la del escenario A.

5.1.1 Selección del escenario más conveniente

La elección de la configuración óptima requiere ponderar beneficios energéticos, costos y complejidad técnica. Las velas de succión eSAIL han demostrado, en buques como el Ville de Bordeaux, ahorros medios de 1,7 t de combustible al día, con picos de 5,4 t/día, verificados por Bureau Veritas. El fabricante bound4blue indica que su sistema puede recuperar la inversión en menos de cinco años. No obstante, su aplicación al buque de estudio tendría que ajustarse a las dimensiones y perfiles de carga de un Ro-Ro grande, y los ahorros simulados en el escenario B (7 %) resultan menores que los de los rotores.

Por su parte, los rotores Flettner modernos (comercializados como “Rotor Sail” por Norsepower) reducen el consumo entre 5 y 20 % y suelen amortizarse en 4–5 años. Informes periodísticos destacan que el buque MV Delphine, equipado con dos rotores de 35 m × 5 m, espera ahorros del 7 al 10 % del combustible consumido. Otros casos documentados han medido reducciones del 3 al 15 % para rotor único, con costos unitarios entre 400 000 USD y 950 000 USD.

Aunque el escenario C brinda el mayor ahorro energético, instala cuatro rotores de gran tamaño, incrementando significativamente el peso alto sobre cubierta, los esfuerzos estructurales y el impacto operativo en maniobras portuarias. Además, duplica el costo respecto al escenario A y puede interferir con el acceso de carga rodada. El escenario B emplea tres velas de succión de 22 m; aunque su instalación es relativamente sencilla y presenta ventajas aerodinámicas, el ahorro simulado es el menor y el payback más largo.

Atendiendo a la relación costo-beneficio, a la complejidad constructiva y a la disponibilidad comercial, **se selecciona el escenario A** (dos rotores Flettner de 30 m de altura y 5 m de diámetro) como la opción más conveniente. Este escenario equilibra un ahorro sustancial del 9 %, un CAPEX moderado y un periodo de retorno razonable

(≈4 años), y se alinea con experiencias de campo que demuestran que los rotores reducen entre 5 y 20 % del consumo con costos unitarios asumibles.

5.2 PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SELECCIONADO

5.2.1 Descripción general del sistema

El sistema propuesto consta de **dos rotores Flettner** instalados en la cubierta superior del buque. Cada rotor es un cilindro vertical de aproximadamente **30 m de altura y 5 m de diámetro**, fabricado en material compuesto ligero y accionado por un motor eléctrico que permite su giro continuo. El principio de funcionamiento se basa en el **efecto Magnus**: al rotar, el cilindro desvía el flujo de aire, creando una diferencia de presión que genera un empuje lateral a favor del avance. Este empuje complementa la propulsión proporcionada por el motor diésel y reduce la carga sobre éste.

5.2.2 Integración estructural y ubicación a bordo

Para minimizar el impacto en la estabilidad, los rotores se ubicarán a proa y popa de la superestructura central, separados lateralmente de la línea de crujía. De este modo se distribuyen los momentos de escora y se evita la interferencia con las operaciones de carga y descarga. Se analizará la estructura de la cubierta mediante cálculos de resistencia y se diseñarán cimientos reforzados con placas de acero y vigas perpendiculares a la manga para soportar los momentos de vuelco generados por los rotores.

5.2.3 Diseño del barco

1) Buque base y criterio de diseño

El buque de estudio es el Cosco Tengfei (Ro-Ro) de 182 m de eslora, operando la ruta Manta (Ecuador) – Puerto Quetzal.

La ruta Manta (Ecuador) – Puerto Quetzal (Guatemala) se eligió principalmente por criterios de representatividad operativa, disponibilidad y pertinencia para evaluar propulsión eólica. En la tesis se indica que el Cosco Tengfei opera regularmente entre Manta y puertos de Centroamérica, incluyendo Puerto Quetzal, por lo que se trata de una ruta real, verificable y coherente con el tráfico comercial que llega a Manta (representatividad).

El Escenario A consiste en instalar dos rotores Flettner de 30 m de altura y 5 m de diámetro, con un ahorro promedio del 9% del consumo base (4,5% por rotor).

2) Ubicación y disposición en cubierta (diseño de arreglo general)

En un Ro-Ro, la prioridad es no interferir con la rampa, operaciones de carga y el flujo de vehículos, además de mantener estabilidad.

Propuesta de ubicación (vista superior / cubierta principal):

- **Rotor 1 (R1):** zona media-proa (aprox. 35–40% de la eslora desde proa).
- **Rotor 2 (R2):** zona media-popa (aprox. 60–65% de la eslora desde proa).
- Ambos ubicados sobre línea de crujía o ligeramente desplazados a babor/estribor según obstáculos (chimenea, superestructura, ventilaciones), buscando:
 - Minimizar turbulencia entre rotores
 - Mantener pasillos de seguridad y rutas de evacuación
 - Evitar sombreado aerodinámico de la superestructura.

Separaciones mínimas recomendadas (criterio de ingeniería):

- Distancia rotor-rotor: $\geq 6-8$ diámetros (30–40 m) si el layout lo permite (mejor desempeño y menos interferencia).
- Separación a superestructura/chimenea: $\geq 1-2$ diámetros para reducir pérdida por flujo perturbado.
- Zona libre alrededor de cada rotor: pasillo perimetral (barandas, acceso, y punto de izaje).

3) Estructura: base, refuerzos y cargas

Cada rotor (30 m × 5 m) introduce:

- **Carga vertical** (peso propio + base + motor)
- **Momento flector** por viento (empuje lateral)
- **Cargas cíclicas** (fatiga) por operación y oleaje

Solución estructural propuesta (nivel conceptual):

1. **Pedestal/fundación** de cada rotor en cubierta (plataforma circular o poligonal).
2. **Refuerzo con baos y vagras:** se recomienda crear un “módulo de refuerzo” que conecte:
 - Cubierta principal
 - Una o dos cubiertas inferiores (si el diseño lo permite)
 - Mamparos/transversales cercanos
3. **Distribución de carga:** placas de reparto + refuerzo longitudinal para que no se concentre esfuerzo en un solo punto.
4. **Control de vibraciones:** apoyos con aislación (según fabricante) y verificación de resonancia.

4) Entregables arquitectónicos

Se plantea un buque Ro-Ro con superestructura hacia popa, una o más cubiertas de carga rodada de gran extensión y una rampa principal de popa para operaciones portuarias. La integración del sistema eólico auxiliar se realiza mediante dos rotores Flettner (30 m × 5 m) ubicados en la cubierta superior de carga, en posiciones media-proa y media-popa, evitando interferencia con la rampa y manteniendo corredores operativos y de seguridad. Cada rotor dispone de un área perimetral técnica con acceso controlado, barandales y señalización, además de una fundación estructural reforzada para distribuir cargas y momentos inducidos por viento. El sistema incorpora tablero eléctrico dedicado, variadores y control desde el puente de mando.

A) Plano de planta (vista superior)

- Contorno del buque
- Superestructura
- Rampa popa
- Cubiertas Ro-Ro
- Ubicación R1 y R2 con sus “islas técnicas”
- Pasillos y rutas de evacuación



Figura 32. Vista en Planta
Fuente: Adobe Illustrator

B) Perfil longitudinal (vista lateral)

- Altura de rotores 30 m
- Diámetro de rotores 5 m
- Relación con puente/superestructura
- Líneas de visión aproximadas
- Ubicación de sala de máquinas y rampas

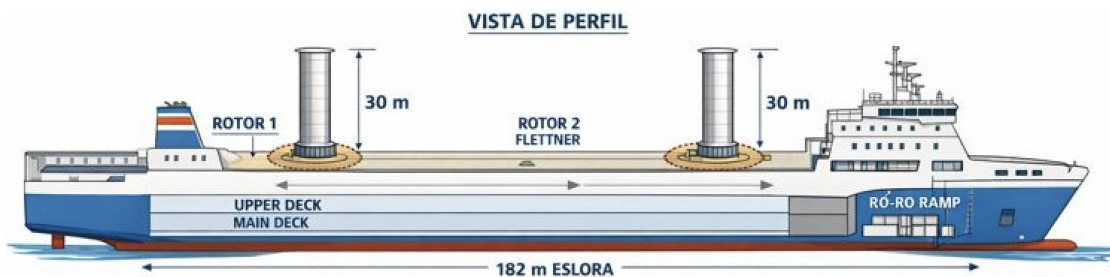


Figura 33. Vista de Perfil
Fuente: Adobe Illustrator

C) Secciones transversales (mínimo 2)

- Sección A-A (refuerzo + cubierta)
- Sección B-B (refuerzo + pasillos + barandales)

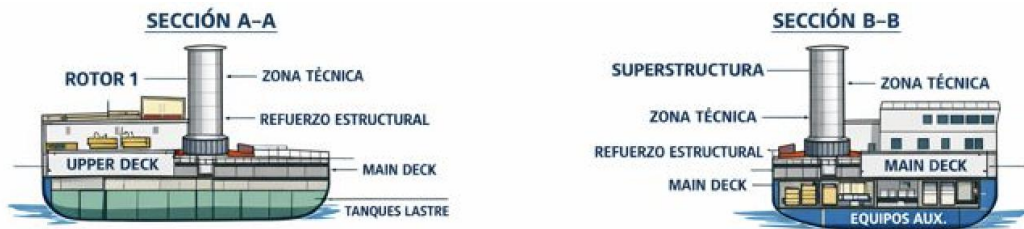


Figura 34. Secciones
Fuente: Adobe Illustrator

El rotor Flettner se encuentra montado sobre una base de soporte estructural reforzada mediante un anillo estructural perimetral, apernado en el Main Deck. Este soporte está pensado para la absorción y distribución de las cargas estáticas y dinámicas de las que es responsable: el peso del rotor, las vibraciones de operación y las fuerzas aerodinámicas que produce el efecto Magnus.

La base del rotor transmite los esfuerzos hacia refuerzos que son radiales y longitudinales conectados a las cuadernas y baos de cubierta, habiéndose conseguido así la adecuada redistribución de las cargas hacia la estructura resistente del casco y del fondo doble. La adición de refuerzos locales ha permitido al mismo tiempo evitar concentraciones de esfuerzo y deformaciones excesivas provocadas en la cubierta superior.

Desde el punto de vista estructural, el notorio soporte del rotor funciona como una cimentación integrada en el sistema resistente del buque, garantizando así la estabilidad, seguridad operacional y la adecuada respuesta a las condiciones de la navegación y la maniobra.

5.2.4 Sistemas de control y operación

La operación de los rotores requiere un sistema de control automatizado que mida la velocidad y dirección del viento y optimice la velocidad de rotación. Se instalarán sensores de viento (anemómetros y veletas), inclinómetros y sistemas de medición de consumo de combustible interconectados con el puente de mando. El software comparará la potencia eólica disponible con la demanda propulsiva y decidirá cuándo activar los rotores. En situaciones de vientos desfavorables o durante maniobras portuarias, el sistema reducirá la velocidad de rotación o detendrá los cilindros para evitar fuerzas laterales que comprometan la maniobrabilidad. Este enfoque coincide con las prácticas recomendadas por proveedores de rotor Sail y garantiza seguridad operativa

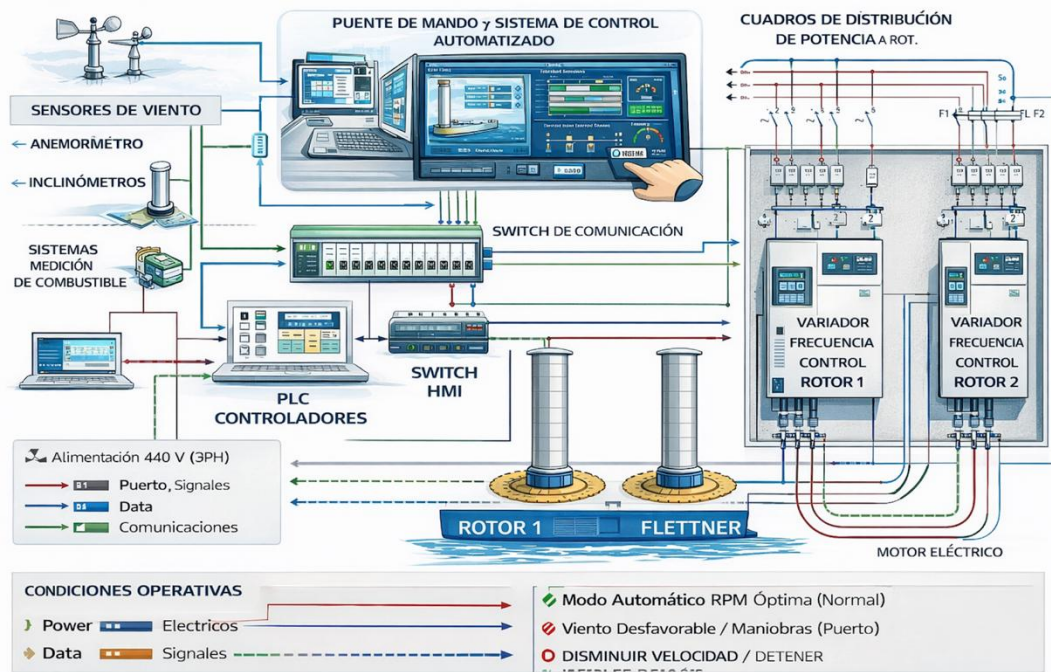


Figura 35. Sistema de control y operación
Fuente: Adobe Illustrator

5.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL PROYECTADA

5.3.1 Ahorro de combustible y emisiones

El modelo energético aplicado en el Capítulo III indica que la instalación de dos rotores proporciona un ahorro anual de 1 040 t de combustible, equivalente a reducir el consumo diario de 35,0 t a 31,9 t. Considerando la ruta Manta–Puerto Quetzal con 330 días de operación, dicho ahorro supone evitar la emisión de $\approx 3\,237$ t de CO_2 al año (factor de emisión de 3,114 t CO_2 por tonelada de combustible). Este resultado se sitúa dentro de los rangos documentados en la literatura: los rotor sails suelen reducir entre 5 y 20 % el consumo de combustible (Arabnejad, Thies, & Yao, 2024).

5.3.2 Análisis financiero

El CAPEX estimado para dos rotores de 30 m incluye el costo de fabricación, transporte, instalación y refuerzos estructurales. De acuerdo con informes de mercado, el precio de cada rotor varía entre 400 000 USD y 950 000 USD. Para el proyecto se adopta un valor medio de 800 000 USD por unidad, más un millón de dólares en refuerzos e instalación, lo que arroja una inversión total aproximada de 2,6 M USD.

El ahorro de combustible (1 040 t/año) se valorará a un precio de referencia de 600 USD por tonelada, dando un ahorro económico anual de 624 000 USD. Con esta cifra, el periodo de recuperación es de 4,2 años, consistente con la vida útil mínima prevista del

sistema (15 – 20 años). Además del retorno monetario, la reducción de emisiones puede generar beneficios económicos indirectos al cumplir las normativas de la FuelEU Maritime y del comercio de emisiones europeo.

5.3.3 Costos operativos y mantenimiento

Los costos operativos de un rotor Flettner son relativamente bajos: el motor eléctrico consume una fracción de la energía generada, y los sistemas de control están automatizados. La principal partida de OPEX corresponde al mantenimiento preventivo anual y a revisiones periódicas de rodamientos y sistemas eléctricos, estimado en alrededor del 2 % del CAPEX. Puesto que el sistema reduce la carga del motor principal, también contribuye a alargar su vida útil y disminuir los gastos de lubricantes y repuestos.

5.4 PLAN DE ACCIÓN Y CONSIDERACIONES OPERATIVAS

La implementación de la propulsión eólica auxiliar no solo acarrea la instalación material de rotores, sino que también trae consigo un cambio cultural y de conducta de la naviera. A continuación, se apuntan los principales puntos de referencia para ser tenidos en cuenta para una implantación adecuada:

1. **Gestión del riesgo y cumplimiento normativo:** La instalación de los rotores exige la integración de la normativa internacional (Código ISM, reglas de las sociedades de clasificación) así como la normativa nacional. Resultará necesario llevar a cabo estudios de riesgo y planes de contingencia para condiciones extremas.
2. **Compatibilidad con la carga:** El cosco tengfei opera con vehículos y carga rodada; por tanto, habrá que garantizar que la estructura de los rotores no interfiera con rampas ni cubiertas y que la operación de carga y descarga se mantenga. Los mecanismos de abatimiento o inclinación permiten plegar los cilindros en la navegación por canales o en el acceso a puertos con limitaciones de altura.
3. **Monitoreo y optimización:** La recopilación de manera continua de datos sobre viento, velocidad, consumo de combustible y rendimiento de los rotores permitirá optimizar su funcionamiento. Integra mediante un sistema de gestión energético los datos obtenidos para ajustar la velocidad del buque y conseguir un mejor aprovechamiento del viento.
4. **Formación de la tripulación:** La adopción de propulsión eólica requiere capacitar a capitanes y oficiales para comprender su funcionamiento.

5.5 ANÁLISIS DE ENTREVISTA A EXPERTO

En esta sección se detalla los puntos clave discutidos durante la entrevista sobre la viabilidad de la energía eólica como fuente de propulsión en embarcaciones comerciales realizado al Ingeniero Naval Rafael Espinosa Semper. Graduado de la ESPOL.

Análisis de viabilidad técnica y operativa

El experto entrevistado evalúa que los sistemas de propulsión eólica, específicamente las velas rígidas, representan la mejor opción actual para las embarcaciones comerciales, funcionando siempre como una fuente de apoyo y no como un sistema de propulsión total. Se argumenta que los buques cargueros deben mantener velocidades constantes de aproximadamente 20 nudos, lo cual requiere una potencia que las superficies eólicas no pueden garantizar de manera autónoma debido a la variabilidad de las condiciones del entorno. Respecto a los rotores Flettner, el entrevistado manifiesta no poseer referencias específicas sobre su funcionamiento.

Compatibilidad por tipo de buque

En cuanto a la estructura de las naves, se identifica a los buques graneleros como los más adecuados para estas tecnologías. Esto se debe a que cuentan con bodegas cerradas y un amplio espacio de cubierta libre, lo que facilita la instalación de velas o rotores sin interferir con la carga. Por el contrario, en los portacontenedores el espacio es limitado debido a que la carga se estiba sobre la cubierta, y para los buques Ro-Ro, el experto considera que este tipo de tecnología no es aplicable.

Impacto económico y eficiencia

Desde una perspectiva financiera y ambiental, se estima que el uso de propulsión eólica auxiliar puede lograr una reducción realista del consumo de combustible y emisiones de entre el 10% y el 15%. El experto sostiene que la inversión inicial está justificada por el elevado gasto operativo que representa el combustible en buques mercantes de gran tamaño, donde cualquier porcentaje de ahorro marca una diferencia económica significativa a largo plazo.

Limitaciones geográficas y energéticas

La eficiencia del sistema está estrechamente ligada a la ruta marítima:

- Zonas favorables: Mares como el Índico o los mares del Norte presentan condiciones óptimas de viento.
- Zonas desfavorables: El Pacífico, especialmente en las cercanías de Ecuador, no se considera propicio para el aprovechamiento del viento en este tipo de sistemas.

El futuro de la descarbonización

El entrevistado se muestra escéptico ante la posibilidad de que la energía eólica sustituya completamente a los combustibles fósiles. La razón principal es la relación entre volumen y carga energética: los combustibles derivados del petróleo ofrecen una alta densidad energética en poco volumen, algo que no se consigue con el velamen ni con otras alternativas como el gas natural (que requiere demasiado espacio de almacenamiento). Finalmente, se concluye que la tendencia mundial se orientará hacia la creación de motores más eficientes y el uso de complementos auxiliares, o incluso energía nuclear, pero no hacia la sustitución total de la fuente primaria de energía para mover grandes cargas a velocidades constantes. Se menciona que la decisión final sobre la implementación de estos sistemas adicionales recae exclusivamente en los propietarios de las embarcaciones, quienes actualmente exploran opciones como el amoníaco como alternativa al combustible fósil.

CONCLUSIONES

El estudio comparativo de los tres escenarios de propulsión eólica arrojó que la instalación de cuatro rotores Flettner es la que mayor ahorro energético genera, pero su elevado coste e inviabilidad estructural lo descartan en un buque Ro Ro en servicio. Las velas de succión son viables en términos de simplicidad y autonomía, pero el ahorro estimado es menor y el retorno de la inversión es más largo.

En base a la relación coste-beneficio, la experiencia documentada y la facilidad de implementación, se recomienda el escenario A, consistente en dos rotores Flettner en paralelo al motor principal. Esta solución puede ahorrar alrededor de 1 040 t de combustible al año, con un ahorro del 9 % y un período de recuperación de la inversión de 4,2 años, dentro de los rangos informados por fabricantes y navieras (5 20 % de ahorro y 4 5 años de payback). Además, es una tecnología madura que ya ha sido instalada en barcos similares y cuyos costes unitarios oscilan entre 400 000 y 950 000 USD.

La propuesta desarrollada en esta tesis aborda las estructurales, operativas y económicas para la instalación de rotores en el Cosco Tengfei, así como un plan de acción para su desarrollo. Esta tecnología no solo disminuye el consumo de combustible y las emisiones de CO₂, sino que también convierte a la naviera en pionera de la transformación hacia un transporte marítimo sostenible, siendo un primer paso concreto hacia la descarbonización del sector y un modelo para futuras aplicaciones de propulsión eólica auxiliar en la zona. Más allá de los resultados concretos del buque Ro Ro analizado, es interesante resaltar algunas conclusiones generales que se pueden extraer al comparar la literatura y los datos más actuales sobre tecnologías de asistencia eólica.

En el portal informativo GreenVoyage2050 de la OMI se menciona que los rotores Flettner generan propulsión por efecto Magnus y pueden lograr ahorros de combustible de entre 3 15 % y hasta 25 % en casos excepcionales, dependiendo del tamaño y número de rotores y las condiciones de viento, y que el costo de instalación por rotor varía entre 400 000 y 1 000 000 USD y los costos de mantenimiento anuales rondan el 2 % de la inversión.

Por otro lado, un estudio de 25 casos de rotor vela de 2025 muestra que los ahorros conseguidos oscilan entre 4 % y 15 % (hasta 25 % en casos aislados) y que, en condiciones típicas de precio de combustible y coste de carbono, el retorno de la inversión se puede

lograr entre 3 y 6 años. Estos datos respaldan la estimación de ahorro y payback utilizada en esta tesis y demuestran que los rotores Flettner son una tecnología madura y probada. En el caso de las velas de succión, las últimas investigaciones demuestran que son dispositivos más compactos y autónomos que combinan perfiles aerodinámicos con succión activa para generar alta sustentación; incluso pueden generar hasta siete veces más fuerza que una vela convencional. Sin embargo, las pruebas de campo realizadas por el Global Centre for Maritime Decarbonisation (GCMD) en 2025 informan que tres velas de succión de 22 m instaladas en el petrolero Pacific Sentinel lograron un ahorro medio de potencia del 7,2 % en pruebas de encendido y apagado, con picos del 28,1 % en condiciones favorables de viento, pero también con ahorros negativos en ceñidas. Estos resultados reafirman que el desempeño de las velas de succión está altamente influenciado por el ángulo y la velocidad del viento, y que sus ahorros promedio son inferiores a los rotores Flettner, pero tienen la ventaja de la simplicidad operativa.

Finalmente, el análisis comparativo identificó las restricciones de espacio y estabilidad que limitan la instalación de múltiples rotores u otros dispositivos eólicos en buques Ro Ro, así como la necesidad de algoritmos de optimización de ruta y velocidad para maximizar los beneficios. Dos rotores Flettner emergen como la mejor solución en términos de ahorro energético, viabilidad económica y complejidad técnica para el Cosco Tengfei y barcos similares.

RECOMENDACIONES

Planificación de la implementación: Realizar un análisis estructural del casco y la cubierta para determinar los refuerzos necesarios y garantizar que la instalación de los rotores no comprometa la estabilidad del buque. Coordinar el retrofit con periodos de varada programados para minimizar el tiempo fuera de servicio y obtener la aprobación de las sociedades de clasificación.

Optimización operativa: Integrar los controles de los rotores con el sistema de gestión del buque y utilizar herramientas de weather routing para aprovechar al máximo el viento en la ruta y velocidad óptimas. El personal de puente debe recibir formación específica sobre el funcionamiento y mantenimiento de los rotores y sobre las limitaciones operativas (altura en puentes, áreas portuarias, maniobras de carga).

Seguimiento y medición de resultados: Desarrollar un programa de monitoreo que registre el consumo de combustible, la potencia de los rotores y las condiciones ambientales, datos que permitirán optimizar parámetros operativos, cuantificar el ahorro real y calificar para incentivos como descuentos en tasas portuarias o créditos por reducción de emisiones, así como participar en mecanismos de financiamiento basado en el desempeño, como los esquemas "pago por ahorro".

Líneas futuras de investigación: Crear modelos experimentales y de simulación para estudiar la interacción aerodinámica entre múltiples rotores en configuración lineal y en tándem, así como su combinación con otras tecnologías de asistencia eólica (velas rígidas, cometas, velas de succión) y sistemas de almacenamiento de energía, e incorporar algoritmos de inteligencia artificial para optimizar en tiempo real la operación de los rotores en función de datos meteorológicos y de tráfico, actualizando periódicamente el análisis económico y ambiental a medida que cambien los precios del combustible, las normas de emisiones y los costes tecnológicos.

BIBLIOGRAFÍA

- losadhesivos.com. (s.f.). *Los adhesivos*. Preparación superficial de metales: <https://www.losadhesivos.com/preparacion-superficies-metales.html>
- FRAX, J. (s.f.). *Fax Desing*. <http://joelfrax.com/materiales/tratamientos%20superficiales.html>
- TECNIMACOR. (23 de Dic de 2020). <https://www.tecnimacor.es/importancia-de-la-limpieza-superficial-antes-del-recubrimiento/>
- Jaime Lozada, D. P. (Marzo de 2008). <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2095/6/CD-1657.pdf>
- Hernández, L. A. (2021). *Tu Proyecto Ya*. <https://tuprojectoya.com/diferencias-entre-la-oxidacion-y-la-corrosion-del-acero/>
- SGA-PE-Marketing. (06 de Septiembre de 2017). *Norton Saint-Gobain 2021*. <https://www.nortonabrasives.com/es-pe/blog/que-es-un-abrasivo-y-para-que-sirve>
- Sandblasting Colombia SAS*. (2020). <https://www.sandblastingcolombia.com/sandblasting-chorro-de-arena-y-granallado/tipos-de-materiales-abrasivos-para-el-samblasteo-y-limpieza-en-bogota-colombia>
- Torrez, S. (2013). <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/7440/1/T-ESPE-047513.pdf>
- Sika, C. (junio de 2015). *Sika S.A.S*. <https://col.sika.com/dms/getdocument.get/cdbd8223-6802-3c99-a058-a013daac9e7b/PREPARACION%20DE%20SUPERFICIES%20%202008.pdf>
- Aymsa Abrasivos y Maquinarias* . (20 de Noviembre de 2019). <https://aymsa.com/preparacion-de-superficies/>
- Cym Materiales S.A.* (s.f.). <https://www2.utp.edu.co/cms-utp/data/bin/UTP/web/uploads/media/contratacion/documentos/granallado-normas-preparacion-de-superficie.pdf>
- Blasting Experts. (s.f.). *Normas internaciones*. https://blastingexperts.com/Web_final/images/noticias/Archivos/Normas%20internaciones%20pdf.pdf
- Carda, P. (Diciembre de 2008). *Preparación de superficies con abrasivos*.
- CYM Materiales Industriales. (s.f.). *Estudio comparativo de costo y rendimiento entre granlla de acero y arena*. <https://cym.com.ar/informes/abrasivos-costos-comparativos-granallado-vs-arenado/>
- Sandblasting y Pintura*. (s.f.). <http://sandblastingypintura.com/sandblasting-para-motos.html>
- Coniex. (s.f.). *Coniex*. <https://www.coniex.com/chorreado-o-sandbalsting-diferencias-entre-disparo-venturi-y-sobrepresion/>
- eolica, H. d. (27 de 07 de 2024). <https://lahistoria.info/historia-de-la-energia-eolica/>

Renov-arte.es. (2021). <https://renov-arte.es/energias-renovables/energia-eolica/evolucion-de-la-energia-eolica/>

Antala. (13 de 09 de 2019). <https://www.antala.es/ventajas-y-desventajas-energia-eolica/>

Orlandi, A. (15 de 08 de 2019). <https://www.greentecher.com/blog-ventajas-y-desventajas-energia-eolica/?v=324d8a1d3f81>

Hansen., R. B. (04 de 06 de 2020). <https://climatica.coop/plataformas-eolicas-maritimas/>

Flores, E. (30 de 06 de 2021). <https://keeui.com/2021/06/30/energia-eolica-terrestre-y-marina/>

Echevarría, A. M. (01 de 03 de 2023). <https://cuervaenergia.com/es/comunidad/sostenibilidad/cuales-son-las-ventajas-y-desventajas-de-la-energia-eolica/>

Antala. (13 de 09 de 2019). <https://www.antala.es/ventajas-y-desventajas-energia-eolica/>

EO. (13 de 12 de 2024). <https://espacio-obra.com/sostenibilidad/energia-eolica-beneficios-sostenibilidad>

Salcedo, A. (01 de 10 de 2024). <https://citransport.com.pa/impacto-ambiental-del-transporte-maritimo/>

Iberoforwarders. (10 de 02 de 2025). <https://iberoforwarders.com/es/el-impacto-ambiental-del-transporte-maritimo-en-la-union-europea-y-los-retos-de-su-transicion-energetica>

Seco, E. (08 de 2020). <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/61407/TFM001635.pdf?sequence=1>

(05 de 11 de 2024). <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2024/11/05/los-retos-de-la-sostenibilidad-y-descarbonizacion-en-el-transporte-maritimo-el-camino-lleva-hacia-un-futuro-verde.html?utm.com>

Energesis. (2024). <https://energesis.es/impacto-ambiental-de-las-emisiones-de-buques/>

Salcedo, A. (04 de 03 de 2024). <https://citransport.com.pa/impacto-ambiental-del-transporte-maritimo-2/#>

News, A. (21 de 07 de 2021). <https://aduananews.com/reduccion-de-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-del-transporte-maritimo-10-anos-de-normas-obligatorias/>

Plaza, D. (07 de 06 de 2023). <https://forococheselectricos.com/2023/06/futuro-transporte-naval-velas-windwings-ahorran-toneladas-combustible.html>

Fernández, F. (19 de 02 de 2024). https://www.lavozdegalicia.es/noticia/ferrol-as-somozas/2024/02/18/velas-rigidas-barcos-fabricara-nervion-as-somozas-altas-edificio-10-pisos/0003_202402F18C5996.htm

naval, R. d. (10 de 06 de 2022). <https://sectormaritimo.es/windwings-un-proyecto-de-velas-rigidas-que-llega-al-mercado-global>

Valentín, H. (10 de 01 de 2025). <https://www.wlogisticsolutions.com/2025/01/11/desarrollo-futuro-de-la-propulsion-de-rotor-flettner/>

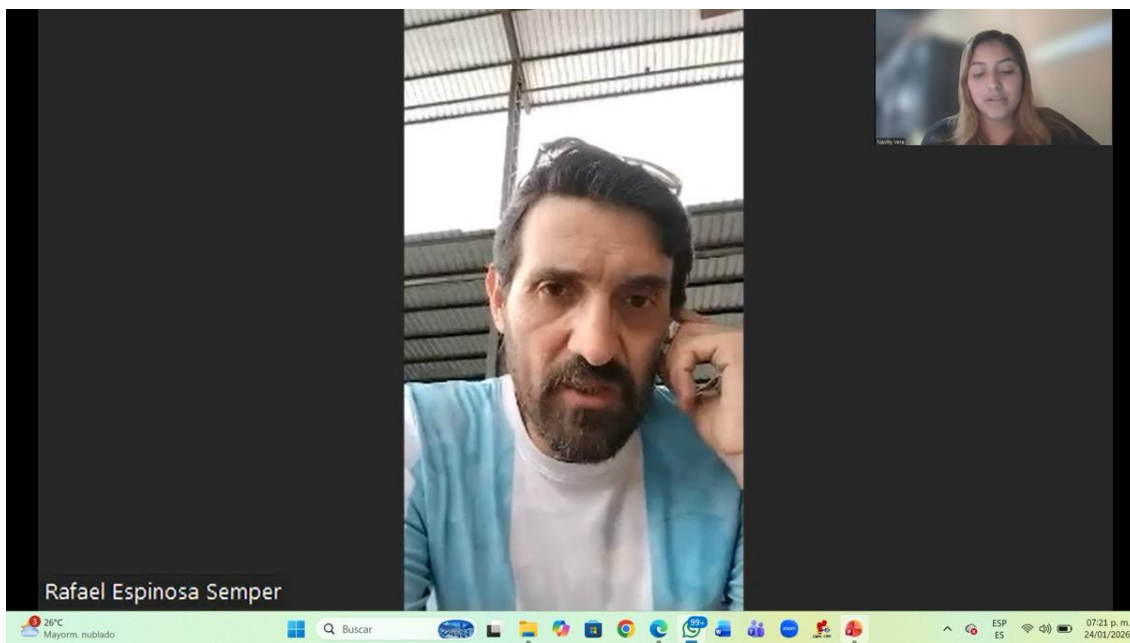
- lab, A. (2021). <https://academia-lab.com/enciclopedia/rotor-flettner/>
- Caro, R. V. (2024). <https://exponav.org/blog/construccion-naval/energia-eolica-aerotransportada-aplicada-a-buques/>
- Maritima, A. (15 de 05 de 2024). <https://www.agendalogistica.cl/cero-emisiones-energia-eolica-medioambiente/propulsion-eolica-podria-ahorrar-hasta-un-30-de-combustible-en-transporte-maritimo/1768773>
- beneficios, t. (2025). <https://todobeneficios.com/beneficios-ambientales-de-la-energia-eolica/>
- new, H. (22 de 08 de 2023). <https://h2news.cl/2023/08/22/buque-pyxis-ocean-zarpo-movilizado-por-innovadora-tecnologia-eolica-de-cargill-y-bar-technologies/>
- Brandsolarenergy. (2023). <https://brandsolarenergy.es/beneficios-y-desafios-de-las-turbinas-eolicas-maritimas-para-un-futuro-sostenible/>
- laenergiarenovable.es. (12 de 06 de 2025). <https://www.laenergiarenovable.es/energia/que-barreras-enfrenta-la-adopcion-de-como-se-genera-energia-eolica-en-parques-eolicos>
- Norsepower. (2023). https://www.norsepower.com/ro-ro/?utm_source
- Berkehan, O., Charpentier, J.-F., & Deniz, C. (2022). Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156.
- Romero, F. (15 de septiembre de 2021). *Híbridos en serie y en paralelo, qué son y cómo funcionan*. <https://www.motor.es/noticias/hibridos-serie-paralelo-funcionamiento-202181190.html>
- Hoffmeister, H. (12 de enero de 2024). *Oceanbird ro-ro: Embarking on a new era of wind propulsion*. MARITIME IMPACT: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Oceanbird-ro-ro-Embarking-on-a-new-era-of-wind-propulsion/#:~:text=The%20design%20now%20incorporates%20five,proven%20technology.>
- Arabnejad, M., Thies, F., & Yao, H. (2024). Zero-emission propulsion system featuring, Flettner rotors, batteries and fuel cells, for a merchant ship. *Ocean Engineering*, 310.
- Norsepower. (12 de marzo de 2025). *RoRo ships – Norsepower Rotor Sails™*. Norsepower: <https://www.norsepower.com/ro-ro/#:~:text=Two%2035m%20x%205m%20Norsepower Rotor,vessel%20to%20pass%20under%20bridges>
- DNV. (2024). *WAPS – Wind Assisted Propulsion Systems*. DNV: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/waps-wind-assisted-propulsion-systems/#:~:text=WAPS%20have%20already%20delivered%20fuel,designed%20to%20carry%20sail%20systems>
- Hernández, N. (14 de septiembre de 2025). *avegación cero emisiones con velas rotatorias*. Cambio16: <https://www.cambio16.com/navegacion-cero-emisiones-con-velas-rotatorias/>

- Howard, G. (28 de julio de 2025). *Terntank orders EconoWind sails for two more ships*. Seatrade Maritime: <https://www.seatrade-maritime.com/wind-powered-ships/terntank-orders-econowind-sails-for-two-more-ships#>
- PortalPortuario. (31 de enero de 2025). *Terminal Portuario de Manta inicia operaciones Ro-Ro con Cosco Shipping*. PortalPortuario: <https://portalportuario.cl/terminal-portuario-manta-inicia-operaciones-ro-ro-con-cosco-shipping/#:~:text=ImageEl%20terminal%20internacional%20del%20Puerto,de%20Cosco%20Shipping%20Car%20Carriers>
- Carjova, K., Hilmola, O., & Tapaninen, U. (2025). Economic Feasibility and Operational Performance of Rotor Sails in Maritime Transport. *Sustainability*, 17(13), 5909.
- Aleixendri, C. (25 de junio de 2025). *bound4blue hits bullseye with third-party assessed average daily fuel savings of 1.7 metric tons, and higher peaks, on LDA ro-ro*. bound4blue. <https://bound4blue.com/bound4blue-hits-bullseye-with-third-party-assessed-average-daily-fuel-savings-of-1-7-metric-tons/>

ANEXOS

Anexo A

Transcripción de la entrevista sobre viabilidad de energía eólica en buques comerciales



- Entrevistador: Desde su experiencia profesional, ¿cómo evalúa la viabilidad técnica de implementar sistemas de propulsión eólica, como son los rotores Flettner o las velas rígidas, en buques comerciales actuales?

Experto: Las velas rígidas serían la mejor opción actualmente para las embarcaciones comerciales, ya sean tanqueros o barcos de placer, usadas como fuente de apoyo para la propulsión, no como una propulsión total.

Esto se debe a que se debe cumplir con un proceso de empuje que marca la potencia de acuerdo con la velocidad; los barcos cargueros van a 20 nudos aproximadamente. Estas velas sirven para consumir menos combustible, pero no reemplazan totalmente la propulsión, ya que depende también del entorno para tener viento a favor¹. En cuanto a los rotores, no tengo referencia; la mejor opción es el concepto de vela rígida.

- Entrevistador: ¿Qué tipo de embarcaciones considera más adecuadas para la implementación de este tipo de tecnologías eólicas? ¿Buques graneleros, portacontenedores o Ro-Ro?

Experto: El granelero sería más fácil porque tiene bodega cerrada y un espacio grande de cubierta libre. El portacontenedor restaría espacio de bodega porque estas

se encuentran sobre la cubierta; si tienes un espacio sobrecubierto apropiado se puede trabajar, de lo contrario, la vela quitaría espacio de carga. Respecto a los buques Ro-Ro, no creo que sea aplicable.

- Entrevistador: Desde el punto de vista operativo, ¿cómo influye la variabilidad del viento y la ruta marítima en la eficiencia real de los sistemas?

Entrevistado: El uso de velas es factible en mares como el Índico o los mares del Norte³. Por el contrario, en el Mar del Pacífico, específicamente cerca de Ecuador, el tema del viento no es favorable para utilizar este tipo de sistemas.

- Entrevistador: ¿Qué nivel de reducción de consumo de combustible y emisiones contaminantes podría lograrse de forma realista con la propulsión eólica auxiliar?

Experto: De un 10 a un 15%.

- Entrevistador: ¿Considera que la inversión económica inicial se justifica frente a los ahorros operativos a mediano y largo plazo?

Experto: Sí se justifica, porque el consumo de combustible en barcos grandes de transporte mercante es muy elevado; cualquier ahorro en el gasto operativo marca una diferencia considerable.

- Entrevistador: ¿El contexto del transporte marítimo en Ecuador presenta condiciones favorables para estas soluciones?

Experto: En el entorno de Ecuador no tenemos cargueros grandes, por lo que no sería aplicable.

- Entrevistador: ¿Qué recomendaciones daría a las navieras que evalúen estos sistemas?

Experto: Cada naviera tiene su perspectiva, pero normalmente son los propietarios de las embarcaciones quienes deciden qué sistemas adicionales poner, como velas o combustibles alternativos⁵. Actualmente, hay una tendencia hacia el uso de amoníaco como alternativa al combustible fósil.

- Entrevistador: ¿Considera que la energía eólica auxiliar será clave para la descarbonización total en el futuro?

Experto: No, porque por poco volumen de almacenamiento, el combustible fósil entrega una cantidad de energía y velocidad que no se consigue con una superficie de velamen para mover carga de manera constante⁶. No existe aún una energía alternativa que sustituya completamente al combustible fósil; el fósil seguirá siendo la fuente primaria. Habrá ayudas y complementos, pero no un sustituto total para mover barcos cargueros o cruceros a 25 nudos.

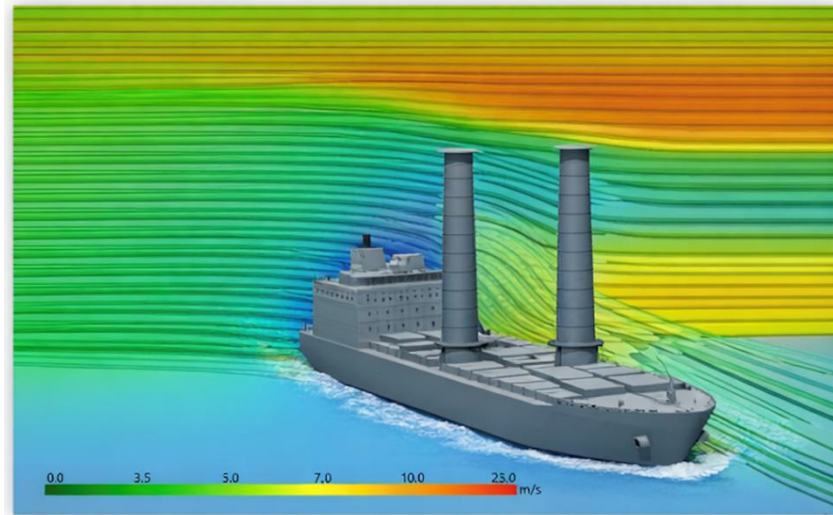
- Entrevistador: ¿Existe alguna otra alternativa energética?

Experto: La tendencia debería ser crear motores más eficientes en el consumo de combustible fósil para generar menos contaminación⁷. El gas natural es un problema

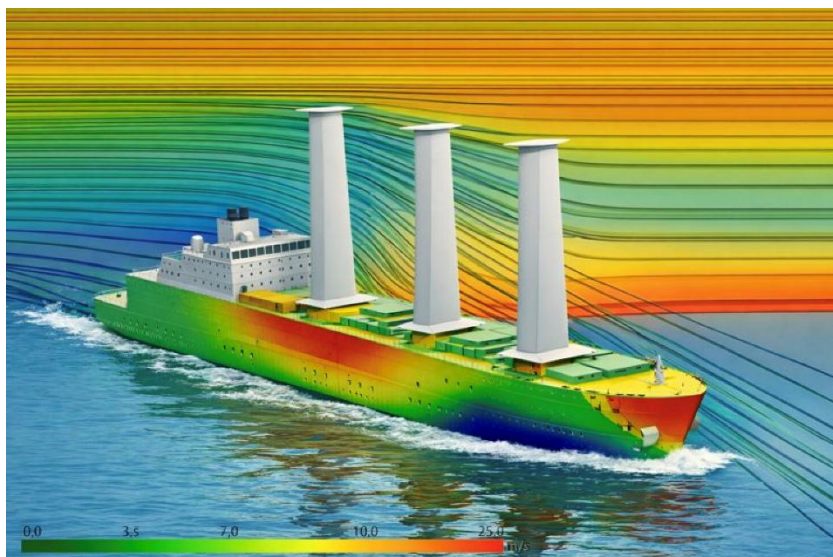
porque requiere mucho volumen de almacenamiento para tener la misma carga energética que el búnker o el diésel. La única energía que podría reemplazar esa relación de volumen y carga energética sería la energía nuclear.

Anexo B

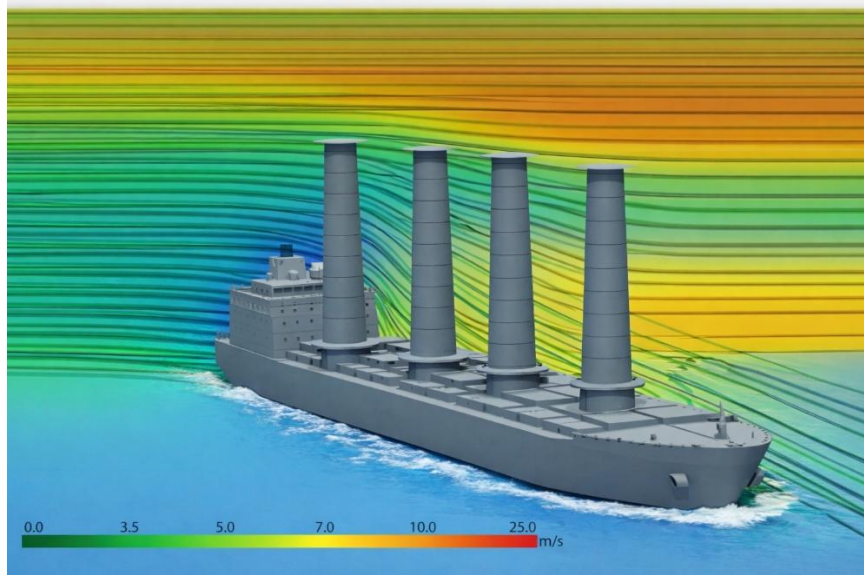
Análisis aplicados en los software



Anexo B.1. Simulación CFD del buque con rotores Flettner
Fuente: ANSYS Fluent.



Anexo B.2. Análisis del flujo de aire con velas de succión.
Fuente: ANSYS Fluent



Anexo B.3. Simulación CFD con cuatro rotores Flettner de gran tamaño
Fuente: ANSYS Fluent