

AVANÇOS RECENTES EM PROJETOS DE CASCOS DE NAVIOS VISANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Patricia Mistura Klippel¹

RESUMO: O projeto de cascos de navios desempenha papel fundamental na eficiência energética das embarcações, influenciando diretamente o consumo de combustível, a autonomia operacional e a redução das emissões de poluentes atmosféricos. Este artigo apresenta uma revisão de literatura sobre os avanços recentes no design hidrodinâmico de cascos, com ênfase em soluções que visam minimizar o arrasto e maximizar a eficiência energética. São abordadas tendências como a otimização de formas por meio de simulações numéricas avançadas, o desenvolvimento de revestimentos especiais, a aplicação de materiais inovadores e a incorporação de tecnologias de controle de fluxo. A análise dos estudos demonstra que a indústria naval tem se concentrado em desenvolver embarcações mais eficientes e sustentáveis, motivada pela crescente demanda por operações ambientalmente responsáveis e pela busca por redução de custos operacionais. Observa-se que as inovações contínuas no projeto de cascos são essenciais para garantir o aprimoramento do desempenho hidrodinâmico das embarcações, a sustentabilidade das operações marítimas e a competitividade global do setor naval, especialmente diante dos desafios ambientais contemporâneos.

588

Palavras-chave: Eficiência Energética. Projeto de Cascos. Engenharia Naval.

ABSTRACT: The design of ship hulls plays a fundamental role in the energy efficiency of vessels, directly influencing fuel consumption, operational autonomy, and the reduction of atmospheric pollutant emissions. This article presents a literature review on recent advances in hull hydrodynamic design, with an emphasis on solutions aimed at minimizing drag and maximizing energy efficiency. Trends such as hull form optimization through advanced numerical simulations, the development of special coatings, the application of innovative materials, and the incorporation of flow control technologies are discussed. The analysis of recent studies shows that the naval industry has focused on developing more efficient and sustainable vessels, driven by the growing demand for environmentally responsible operations and the pursuit of operational cost reductions. It is observed that continuous innovations in hull design are essential to ensure the improvement of hydrodynamic performance, the sustainability of maritime operations, and the global competitiveness of the naval sector, especially in the face of contemporary environmental challenges.

Keywords: Energy Efficiency. Hull Design. Naval Engineering.

¹Mestranda em Engenharia de Sistemas Eletrônicos – PPGESE, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC.

I. INTRODUÇÃO

O projeto de cascos de navios exerce um papel fundamental na eficiência energética das embarcações, influenciando diretamente o consumo de combustível, a autonomia operacional e a emissão de poluentes atmosféricos (HASAN SM e KARIM MM, 2022). Considerando que aproximadamente 80% do comércio internacional é realizado por via marítima, a busca por métodos que aumentem a eficiência dos navios torna-se uma prioridade estratégica para a indústria global (JIMENEZ VJ et al., 2022; DUAN M et al., 2023).

A evolução tecnológica nesse setor tem sido impulsionada pela necessidade de reduzir o arrasto hidrodinâmico e otimizar a interação entre o casco e o meio aquático. Como destacam Tadros M et al. (2023), o desenvolvimento de projetos de cascos mais eficientes tem um impacto direto sobre o consumo energético e a sustentabilidade operacional. Além disso, a manutenção adequada, como a limpeza periódica do casco, pode gerar ganhos expressivos de desempenho, reforçando a relevância de práticas preventivas na eficiência energética das embarcações (ADLAND R et al., 2018).

O comportamento hidrodinâmico dos navios é influenciado por diversos componentes da resistência total, sendo a resistência por fricção, a resistência por formação de ondas e a resistência viscosa os principais fatores de interesse no projeto de cascos (BARREIRO J et al., 2022). A minimização do coeficiente de arrasto é essencial para reduzir a resistência ao avanço e, consequentemente, otimizar a eficiência propulsiva. Técnicas de projeto que visam formas de casco com linhas mais suaves e transições de fluxo controladas têm demonstrado resultados positivos nesse sentido (VERGARA F et al., 2023).

589

Ferramentas de simulação numérica, como a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), têm desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento de novos projetos de cascos. A utilização de CFD permite a análise detalhada dos fluxos em torno do casco, possibilitando a identificação de áreas de alto arrasto e a proposição de modificações estruturais que otimizam o desempenho. Essa abordagem é potencializada pela integração de modelagem da informação e simulação dinâmica, tecnologias que têm ampliado significativamente a capacidade de projetar navios mais eficientes.

Apesar dos progressos recentes, persistem desafios técnicos relacionados à validação experimental dos modelos computacionais, à variabilidade das condições ambientais e à integração dos novos conceitos hidrodinâmicos em projetos comerciais (ZHOU S e TSAI PJ,

2022). A contínua inovação na arquitetura dos cascos se mostra essencial para atender às demandas crescentes por eficiência, sustentabilidade e competitividade no setor naval (LIU Z et al., 2025).

Dante deste panorama, este artigo apresenta uma revisão de literatura centrada nos avanços recentes no projeto de cascos de navios voltados para a maximização da eficiência energética, abordando as principais tendências tecnológicas, metodologias de desenvolvimento e perspectivas futuras para a Engenharia Naval.

2. MÉTODOS

Este trabalho constitui uma revisão de literatura com enfoque nos avanços recentes relacionados ao projeto de cascos de navios voltados para a maximização da eficiência energética. Foram selecionados artigos técnicos e científicos, priorizando estudos revisados por pares que abordam aspectos hidrodinâmicos, otimização de formas de casco, redução da resistência ao avanço e aplicação de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) no desenvolvimento de projetos navais.

A estratégia de seleção baseou-se na identificação de estudos que apresentassem abordagens metodológicas consistentes e resultados relevantes para o aprimoramento da eficiência hidrodinâmica de embarcações. 590

A análise dos artigos foi realizada de forma qualitativa, com a organização das informações em categorias temáticas principais, como métodos de redução de arrasto, técnicas de otimização hidrodinâmica e impactos do projeto do casco no desempenho energético global das embarcações. Os dados foram interpretados à luz dos avanços tecnológicos recentes, considerando tendências e desafios identificados na literatura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A eficiência energética dos navios está intrinsecamente relacionada ao desempenho hidrodinâmico de seus cascos. A interação entre o casco e o meio fluido gera forças resistivas que afetam diretamente o consumo de combustível, sendo o arrasto a principal delas (HASAN SM e KARIM MM, 2022). Reduzir o arrasto hidrodinâmico é, portanto, um dos objetivos primordiais no projeto de embarcações mais eficientes.

3.1. Redução do Arrasto Hidrodinâmico

O arrasto total de um casco é composto, essencialmente, pela resistência por fricção na camada limite, pela resistência de forma (ou de pressão) e pela resistência associada à formação de ondas (MOLLAND AF, TURNOCK SR e HUDSON DA, 2017). Cada um desses componentes pode ser minimizado por meio de estratégias específicas de projeto e acabamento superficial.

O formato do casco exerce influência significativa na geração de arrasto. Casco de linhas suaves, formas finas na região de proa e geometria otimizada na popa são características associadas à redução da resistência viscosa e à mitigação da formação de ondas (TADROS M et al., 2023; BARREIRO J et al., 2022). A relação entre a forma do casco e o coeficiente de arrasto é amplamente estudada na literatura, apontando que pequenas modificações geométricas podem levar a reduções expressivas no consumo de energia.

Além do formato, a condição da superfície do casco também impacta o desempenho hidrodinâmico. A presença de bioincrustação e o aumento da rugosidade superficial resultam em maior atrito com a água, elevando o consumo de combustível (SCHULTZ MP, 2007; DEMIREL YK et al., 2017). Portanto, o projeto eficiente de um casco deve considerar não apenas a geometria otimizada, mas também estratégias de manutenção e revestimento que preservem a qualidade da superfície ao longo do tempo.

O conjunto desses fatores evidencia que o projeto de cascos para a eficiência energética é um desafio multidimensional, envolvendo a otimização simultânea da forma, dos materiais e das condições de operação.

591

3.2. Otimização de Formas de Casco

O desenvolvimento de técnicas de otimização de formas de casco tem sido fundamental para a redução do arrasto e o aumento da eficiência energética das embarcações. Tradicionalmente, o projeto de cascos era baseado em métodos empíricos e na experiência prática de projetistas. No entanto, com o avanço das ferramentas computacionais, a otimização passou a ser conduzida de maneira mais sistemática e precisa (VERGARA F et al., 2023).

Atualmente, uma das abordagens mais utilizadas é o uso de modelagem paramétrica, em que as formas do casco são representadas por funções matemáticas que podem ser

modificadas para explorar diferentes configurações geométricas. Essa técnica permite a geração rápida de múltiplas alternativas de design, que são avaliadas de acordo com critérios de desempenho hidrodinâmico (JIMENEZ VJ et al., 2022).

Paralelamente, técnicas de otimização multiobjetivo têm sido aplicadas para balancear diferentes requisitos de projeto, como a redução da resistência ao avanço, a manutenção da estabilidade, a capacidade de carga e o comportamento em ondas (DUAN M et al., 2023). Esses métodos utilizam algoritmos evolutivos, como Algoritmos Genéticos (GA) e Algoritmos de Otimização Multiobjetivo de Pareto, para encontrar as soluções mais adequadas dentro de um conjunto de possibilidades.

A aplicação de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) foi outro fator transformador no processo de otimização de cascos. Por meio de simulações numéricas detalhadas, é possível analisar os padrões de fluxo ao redor do casco e identificar regiões de alta resistência (BARREIRO J et al., 2022). Essa capacidade de análise permite ajustes finos na geometria, que dificilmente seriam identificados apenas com métodos experimentais ou empíricos.

Além disso, algumas pesquisas recentes vêm integrando métodos de aprendizado de máquina às técnicas de otimização de formas de casco. Redes neurais e algoritmos de aprendizado supervisionado têm sido utilizados para prever o comportamento hidrodinâmico de novos formatos, reduzindo significativamente o tempo necessário para o processo de otimização (BESIKCI EB et al., 2016).

Esses avanços evidenciam uma tendência cada vez mais consolidada: o projeto de cascos eficientes passa a ser conduzido com suporte de ferramentas computacionais avançadas, que possibilitam a análise rápida de grandes espaços de projeto e a busca sistemática pelas melhores soluções hidrodinâmicas.

3.3. Aplicação da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD)

A utilização de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) tornou-se um dos pilares no desenvolvimento de projetos hidrodinâmicos de cascos de navios. Essa ferramenta numérica oferece a capacidade de simular o comportamento do fluxo em torno da embarcação com elevado grau de detalhe, possibilitando a previsão da distribuição de pressões, da resistência total ao avanço e da formação de ondas (BARREIRO J et al., 2022).

Uma das principais vantagens do uso de CFD é a possibilidade de visualizar e analisar fenômenos hidrodinâmicos complexos que, anteriormente, eram difíceis de investigar apenas por meio de ensaios experimentais em tanques de provas (VERGARA F et al., 2023). A simulação permite a avaliação de diferentes configurações de casco em um curto espaço de tempo, reduzindo os custos associados à construção de modelos físicos e acelerando o ciclo de desenvolvimento de projetos.

Além disso, a aplicação de CFD contribui para uma compreensão mais profunda dos mecanismos que levam à formação do arrasto e da resistência por ondas. Estudos como os de Demirel YK et al. (2017) demonstram que, a partir de simulações detalhadas, é possível identificar áreas críticas de separação de fluxo e de formação de vórtices, permitindo o redesenho de seções específicas do casco para minimizar tais efeitos.

Contudo, apesar das vantagens, o uso da CFD também apresenta limitações. A precisão dos resultados depende fortemente da qualidade da malha utilizada, da escolha dos modelos de turbulência e das condições de contorno aplicadas (MOLLAND AF, TURNOCK SR e HUDSON DA, 2017). Simulações de alta fidelidade, como aquelas baseadas em Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) ou Large Eddy Simulation (LES), requerem grande capacidade computacional, o que pode representar um desafio para projetos com restrições de tempo e recursos.

593

Outro ponto relevante é a necessidade de validação dos modelos numéricos com dados experimentais. Embora as ferramentas de CFD tenham evoluído consideravelmente nas últimas décadas, ainda é recomendado que simulações críticas sejam confrontadas com resultados de tanques de provas para assegurar a confiabilidade dos dados obtidos (SCHULTZ MP, 2007).

De qualquer forma, a integração da CFD ao processo de design de cascos representa um avanço significativo na Engenharia Naval, permitindo uma abordagem mais racional, precisa e econômica para a busca da eficiência energética.

3.4. Controle da Rugosidade Superficial e Bioincrustação

A rugosidade superficial do casco exerce influência direta sobre a resistência ao avanço da embarcação. Mesmo pequenas irregularidades ou imperfeições na superfície podem aumentar consideravelmente a resistência por fricção, resultando em maior consumo de combustível e emissões de gases de efeito estufa (SCHULTZ MP, 2007).

Entre as principais causas de aumento da rugosidade está o fenômeno da bioincrustação, caracterizado pela adesão de organismos marinhos, como algas e cracas, à superfície submersa do casco. Segundo Demirel YK et al. (2017), a presença de biofouling pode aumentar o arrasto total de uma embarcação em até 40%, dependendo do tipo e da extensão da incrustação.

Estudos indicam que, mesmo bioincrustações de pequena escala, como películas de microrganismos ou pequenas larvas, já são suficientes para provocar aumentos significativos no coeficiente de resistência por fricção (TURAN O e BANKS C, 2014). Além disso, o crescimento progressivo da bioincrustação ao longo do tempo compromete a eficácia do projeto hidrodinâmico original do casco, anulando os ganhos obtidos por meio de formas otimizadas.

Nesse contexto, o desenvolvimento e a aplicação de revestimentos antifouling e de baixa fricção tornaram-se estratégias fundamentais para a manutenção da eficiência hidrodinâmica ao longo da vida útil da embarcação. Segundo Schultz MP (2007), revestimentos modernos, como os baseados em polímeros avançados e superfícies inspiradas em propriedades hidrofóbicas, conseguem reduzir substancialmente a adesão de organismos, preservando o desempenho hidrodinâmico do casco.

Além de combater a bioincrustação, esses revestimentos também promovem a redução da energia de fricção ao criar uma camada superficial mais lisa, diminuindo as forças viscosas atuantes sobre o casco (BESIKCI EB et al., 2016). A seleção do tipo de revestimento adequado deve considerar fatores como o perfil operacional do navio, a temperatura da água, o tempo de permanência nos portos e o custo-benefício a longo prazo.

A manutenção periódica do casco, incluindo a limpeza programada e a reativação dos revestimentos, complementa as estratégias de preservação da eficiência energética. Estudos como os de Adland R et al. (2018) mostram que intervenções planejadas para remoção de biofouling são financeiramente vantajosas, considerando a economia de combustível proporcionada.

Portanto, o controle da rugosidade superficial e a adoção de tecnologias antifouling são componentes críticos para garantir que os projetos hidrodinâmicos de alta eficiência mantenham seu desempenho ideal ao longo da operação da embarcação.

3.5. Tendências Recentes em Projeto de Cascos

O desenvolvimento de novas configurações de casco para melhorar a eficiência energética das embarcações tem sido uma tendência consolidada nos últimos anos. As demandas por redução de emissões de gases poluentes e a necessidade de otimização de custos operacionais impulsionaram a busca por soluções inovadoras em arquitetura naval (DUAN M et al., 2023).

Uma das tendências mais relevantes é o conceito de casco de linhas finas, caracterizado por proas mais alongadas e popas com geometria suavizada. Esses formatos reduzem a resistência de forma e minimizam a geração de ondas, contribuindo significativamente para a diminuição da resistência total ao avanço (BARREIRO J et al., 2022). Em conjunto, o uso de proas bulbosas otimizadas continua sendo amplamente aplicado para melhorar o desempenho em velocidades de cruzeiro específicas (MOLLAND AF, TURNOCK SR e HUDSON DA, 2017).

Outra inovação crescente é a adoção de sistemas de lubrificação por ar (air lubrication systems), nos quais bolhas de ar são injetadas sob o casco para reduzir o atrito direto com a água. Estudos mostram que essa técnica pode resultar em reduções de arrasto da ordem de 5% a 10%, dependendo do tipo de navio e das condições de operação (VERGARA F et al., 2023).

595

Além disso, novas geometrias inspiradas em perfis hidrodinâmicos naturais têm sido exploradas. Formatos baseados em biomimética, como superfícies inspiradas na pele de tubarão ou nas formas de peixes velozes, vêm sendo estudados para reduzir a fricção e controlar melhor a separação do fluxo ao longo do casco (BESIKCI EB et al., 2016).

O conceito de casco em formato de SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull) também tem recebido atenção, especialmente em projetos de embarcações especializadas. Esses cascos minimizam a área de contato com a superfície livre, reduzindo a resistência por formação de ondas, embora apresentem desafios adicionais em termos de estabilidade transversal e construção.

Outra abordagem recente envolve o uso de formas de casco adaptativas, capazes de alterar levemente sua geometria durante a operação para se adequar a diferentes condições de mar e regimes de velocidade. Embora ainda em fase de pesquisa, essa tecnologia promete ganhos adicionais em eficiência energética no futuro (LIU Z et al., 2025).

Por fim, estratégias combinadas de otimização estrutural e hidrodinâmica, integradas a análises de ciclo de vida e custo-benefício, vêm sendo aplicadas para desenvolver cascos que não apenas consumam menos energia, mas também apresentem menor impacto ambiental ao longo de sua operação (TADROS M et al., 2023).

Essas tendências indicam que o futuro do projeto de cascos será fortemente baseado na integração de novas tecnologias, simulações avançadas e conceitos multidisciplinares.

3.6. Desafios e Limitações

Apesar dos avanços significativos na otimização de cascos para a eficiência energética, diversos desafios técnicos, econômicos e operacionais ainda limitam a aplicação plena dessas tecnologias. A complexidade do ambiente marítimo, a variabilidade das condições de operação e as restrições práticas de projeto impõem barreiras que precisam ser consideradas na concepção de cascos mais eficientes (DUAN M et al., 2023).

Um dos principais desafios reside na validação experimental das soluções projetadas por CFD. Embora as simulações numéricas avancem rapidamente, diferenças sutis entre o ambiente real e o modelo simulado podem levar a desvios importantes de desempenho (VERGARA F et al., 2023). Isso reforça a necessidade de ensaios experimentais em tanques de provas ou medições em navios reais para assegurar a eficácia dos novos desenhos de casco.

Outro fator limitante é a necessidade de compromissos de projeto. A busca por formas de casco altamente eficientes em termos de arrasto pode, em alguns casos, comprometer outras características importantes, como estabilidade, capacidade de carga, manobrabilidade e comportamento em mar agitado (MOLLAND AF, TURNOCK SR e HUDSON DA, 2017). O desafio dos projetistas é balancear essas exigências conflitantes, encontrando soluções que maximizem a eficiência sem sacrificar a segurança ou a funcionalidade operacional.

Adicionalmente, o custo de implementação de novas tecnologias também representa uma barreira prática. A aplicação de sistemas de lubrificação por ar, revestimentos avançados ou geometrias mais complexas pode encarecer o projeto e a construção dos navios (BESIKCI EB et al., 2016). Para muitos armadores, especialmente em setores altamente competitivos, o custo adicional precisa ser compensado por ganhos operacionais tangíveis e previsíveis.

A manutenção da eficiência ao longo da vida útil do navio também é um aspecto crítico. Mesmo projetos de casco extremamente otimizados podem perder eficiência devido ao acúmulo de bioincrustação, degradação dos revestimentos ou danos estruturais ao longo do

tempo (SCHULTZ MP, 2007; ADLAND R et al., 2018). A falta de programas eficazes de manutenção preventiva e monitoramento pode anular os benefícios alcançados no estágio de projeto.

Por fim, restrições regulatórias e operacionais podem limitar a adoção de novas formas de casco. Algumas geometrias inovadoras podem não se adequar completamente às normas internacionais de estabilidade, segurança ou manobrabilidade, exigindo adaptações que reduzem os ganhos de eficiência esperados (ZHOU S e TSAI PJ, 2022).

Portanto, embora a evolução no projeto de cascos seja evidente, a superação desses desafios é essencial para que a eficiência energética das embarcações continue a avançar.

3.7. Perspectivas Futuras

A análise da literatura recente evidencia que a eficiência energética no projeto de cascos de navios tem avançado de maneira significativa, impulsionada pela evolução das ferramentas de simulação computacional, pela adoção de novos materiais e revestimentos e pela busca por soluções hidrodinâmicas mais refinadas. O uso de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) revolucionou a capacidade de análise e otimização de formas, permitindo o desenvolvimento de cascos mais adaptados às condições operacionais específicas (BARREIRO J et al., 2022; VERGARA F et al., 2023).

597

Além disso, estratégias inovadoras, como a lubrificação por ar, os revestimentos de baixa fricção e a incorporação de princípios biomiméticas, expandiram as possibilidades de redução do arrasto além das soluções tradicionais (BESIKCI EB et al., 2016; SCHULTZ MP, 2007). A integração dessas tecnologias demonstra que o futuro do design de cascos não dependerá de um único fator isolado, mas sim de abordagens multidisciplinares que combinem otimização geométrica, proteção superficial e gestão eficiente da operação ao longo da vida útil do navio.

No entanto, a revisão também destacou limitações importantes que ainda precisam ser superadas. As dificuldades associadas à validação experimental das simulações, à manutenção da eficiência operacional e ao equilíbrio entre eficiência hidrodinâmica e requisitos de estabilidade e capacidade de carga permanecem como barreiras críticas (MOLLAND AF, TURNOCK SR e HUDSON DA, 2017; ZHOU S e TSAI PJ, 2022). Além disso, fatores econômicos, regulatórios e práticos influenciam a velocidade de adoção das inovações no mercado marítimo.

As perspectivas futuras apontam para um aumento da utilização de inteligência artificial e machine learning no processo de design de cascos, com a expectativa de que modelos preditivos avancem no sentido de gerar formas otimizadas com maior rapidez e precisão (DUAN M et al., 2023). Paralelamente, espera-se que novos materiais, como superfícies inteligentes capazes de se adaptar dinamicamente ao fluxo, tragam ganhos adicionais na eficiência energética das embarcações.

Também é possível prever que a combinação de análises hidrodinâmicas de alta fidelidade com avaliações de ciclo de vida e impacto ambiental se tornará cada vez mais comum, atendendo à crescente demanda por projetos que sejam simultaneamente eficientes e sustentáveis (LIU Z et al., 2025). Assim, a eficiência energética no projeto de cascos continuará sendo um campo dinâmico de pesquisa e inovação, essencial para a competitividade e sustentabilidade do transporte marítimo global.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A eficiência energética no transporte marítimo é um dos pilares para a sustentabilidade e a competitividade da indústria naval. Dentro desse contexto, o projeto de cascos de navios desempenha um papel fundamental, influenciando diretamente a resistência ao avanço, o consumo de combustível e a emissão de poluentes.

598

Este artigo realizou uma revisão de literatura focada nos avanços recentes relacionados ao desenvolvimento de cascos mais eficientes, analisando as principais estratégias de otimização de formas, o uso de simulações por Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), as inovações em revestimentos e o impacto da rugosidade superficial no desempenho hidrodinâmico. Os resultados apontam que o emprego de técnicas computacionais avançadas, associado à adoção de novas tecnologias de proteção superficial e manutenção preventiva, é essencial para maximizar a eficiência energética das embarcações.

Apesar dos progressos alcançados, persistem desafios importantes, como a validação experimental das soluções simuladas, a necessidade de equilibrar requisitos conflitantes de projeto e as dificuldades práticas na implementação de tecnologias inovadoras em escala comercial. Esses obstáculos reforçam a importância de abordagens multidisciplinares e de investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento.

As perspectivas futuras para o projeto de cascos indicam uma tendência crescente de integração de inteligência artificial, materiais inteligentes e conceitos de design adaptativo,

buscando superar as limitações atuais e atender às demandas ambientais e econômicas do setor marítimo.

Conclui-se que o avanço contínuo no projeto de cascos eficientes será determinante para a construção de uma indústria naval mais sustentável, competitiva e alinhada aos desafios globais de eficiência energética e redução de emissões.

REFERÊNCIAS

- ADLAND R, CARIOU P, JIA H, WOLFF FC. The energy efficiency effects of periodic ship hull cleaning. *Journal of Cleaner Production*, 2018; 178: 1-13.
- BARREIRO J, ZARAGOZA S, DIAZ-CASAS V. Review of ship energy efficiency. *Ocean Engineering*, 2022; 251: 111074.
- BESIKCI EB, ARSLAN O, TURAN O, ERDAS M. An artificial neural network-based decision support system for energy efficient ship operations. *Computers & Operations Research*, 2016; 66: 393-401.
- DEMIREL YK, TURAN O, INCECIK A. Predicting the effect of biofouling on ship resistance using CFD simulations. *Applied Ocean Research*, 2017; 62: 100-118.
- DUAN M, WANG Y, FAN A, YANG J, FAN X. Comprehensive analysis and evaluation of ship energy efficiency practices. *Ocean and Coastal Management*, 2023; 237: 106412.
- HASAN SM, KARIM MM. Energy efficiency design index baselines for ships of Bangladesh based on verified ship data. *Heliyon*, 2022; 8(6): e09519.
- JIMENEZ VJ, KIM H, MUNIM ZH. A review of ship energy efficiency research and directions towards emission reduction in the maritime industry. *Journal of Cleaner Production*, 2022; 370: 133489.
- LIU Z, XU X, ZHANG X, ZHANG D. Towards sustainable energy selection for ships in response to maritime regulation. *Asian Journal of Shipping and Logistics*, 2025; 41(1): 100-110.
- MOLLAND AF, TURNOCK SR, HUDSON DA. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017; 626 p.
- SCHULTZ MP. Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering. *Biofouling*, 2007; 23(5): 331-341.
- TADROS M, VENTURA M, SOARES CG. Review of the decision support methods used in optimizing ship hulls towards improving energy efficiency. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023; 11(4): 835.



TURAN O, BANKS C. The effect of biofouling on ship resistance and powering. *Ocean Engineering*, 2014; 88: 238-250.

VERGARA F, DE LA CRUZ JM, MARTINEZ-LUENGO M. Advancing sustainability in the maritime sector: energy design and optimization of large ships through information modelling and dynamic simulation. *Applied Thermal Engineering*, 2023; 221: 119663.

ZHOU S, TSAI PJ. Energy efficiency in ship operations: Exploring voyage decisions and decision-makers. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022; 109: 103412.