RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar
O Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 19/12/2025 | aceito: 22/12/2025 | publicação: 25/12/2025

Eficiência energética e descarbonização de embarcações marítimas e offshore: integração entre projeto, operação e decisão de investimento

Energy efficiency and decarbonization of maritime and offshore vessels: integrating design, operations and investment decisions

Eficiencia energética y descarbonización de buques marítimos y marinos: integrando decisiones de diseño, operaciones e inversión

Eduardo Brandão Tormento

Engenheiro Naval e Oceânico pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), com MBA em Gerenciamento de Projetos e MBA em Finanças pelo IBMEC.

RESUMO

A descarbonização do transporte marítimo exige decisões que ultrapassam a substituição de combustíveis. Este artigo analisa a eficiência energética de embarcações marítimas e offshore como problema integrado de engenharia, operação e investimento. A pesquisa adota abordagem qualitativa e bibliográfico-documental, apoiada na Estratégia da Organização Marítima Internacional de 2023 para redução de gases de efeito estufa, em dados da UNCTAD e em estudos recentes sobre otimização de velocidade, rota, trim, sistemas híbridos e combustíveis alternativos. A análise mostra que medidas operacionais e técnicas podem produzir ganhos relevantes, mas seus resultados dependem do perfil de missão, da curva de carga, das condições ambientais, da disponibilidade energética e do ciclo de vida do ativo. Em embarcações offshore, particularmente aquelas com propulsão diesel-elétrica e posicionamento dinâmico, a elevada variabilidade de potência torna a gestão energética especialmente sensível ao despacho de geradores e ao armazenamento. Propõe-se uma estrutura de decisão que combina desempenho hidrodinâmico, perfil operacional, segurança, CAPEX, OPEX, emissões e risco tecnológico. Conclui-se que a transição de baixo carbono é mais robusta quando eficiência energética, escolha de combustível e estratégia de investimento são avaliadas conjuntamente.

Palavras-chave: engenharia naval; eficiência energética; descarbonização marítima; embarcações offshore; combustíveis alternativos; gestão de energia.

ABSTRACT

The decarbonization of maritime transport requires decisions that go beyond fuel substitution. This article examines vessel energy efficiency as an integrated engineering, operational and investment problem. The study adopts a qualitative bibliographic and documentary approach based on the International Maritime Organization's 2023 GHG Strategy, UNCTAD data and recent research on speed, routing, trim, hybrid power systems and alternative fuels. The analysis indicates that operational and technical measures can provide relevant gains, but their performance depends on mission profile, load curve, environmental conditions, energy availability and asset life cycle. Offshore vessels, particularly diesel-electric units operating with dynamic positioning, present highly variable power demands and therefore require careful generator dispatch and energy-storage assessment. A decision structure combining hydrodynamic performance, operational profile, safety, CAPEX, OPEX, emissions and technology risk is proposed. The article concludes that low-carbon transition strategies are more robust when energy efficiency, fuel choice and investment decisions are assessed jointly.

Keywords: naval engineering; energy efficiency; maritime decarbonization; offshore vessels; alternative fuels; energy management.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 19/12/2025 | aceito: 22/12/2025 | publicação: 25/12/2025

INTRODUÇÃO

Mais de 80% do volume do comércio internacional de mercadorias é transportado por via marítima, o que torna o desempenho da frota mercante parte relevante da infraestrutura econômica global (UNCTAD, 2025). Ao mesmo tempo, o setor enfrenta uma transição regulatória e tecnológica que exige redução progressiva das emissões sem comprometer segurança, disponibilidade e competitividade.

A Estratégia IMO de 2023 estabelece, entre outros níveis de ambição, redução de pelo menos 40% da intensidade de carbono do transporte marítimo internacional até 2030, em comparação com 2008, e a busca por emissões líquidas zero por volta de 2050. A estratégia também introduz checkpoints indicativos para emissões anuais totais de gases de efeito estufa: redução de pelo menos 20%, buscando 30%, até 2030, e de pelo menos 70%, buscando 80%, até 2040 (IMO, 2023).

Essas metas aumentam a pressão sobre decisões de projeto e operação. Uma embarcação construída hoje poderá permanecer em serviço por décadas, atravessando mudanças regulatórias, de preço de energia e de infraestrutura de abastecimento. A escolha de propulsão deixa, portanto, de ser apenas uma decisão de desempenho inicial e passa a envolver exposição a risco tecnológico e regulatório.

Embarcações offshore acrescentam complexidade ao problema. Platform Supply Vessels, Anchor Handling Tug Supply vessels e unidades especializadas podem alternar trânsito, espera, operação em posicionamento dinâmico e picos de demanda. Essa variabilidade faz com que a eficiência não dependa apenas do consumo específico de um motor em um ponto nominal, mas do comportamento do sistema ao longo da missão.

O objetivo deste artigo é analisar como medidas de eficiência energética, sistemas híbridos, otimização operacional e combustíveis alternativos podem ser integrados a uma decisão de engenharia economicamente consistente. O foco não é indicar uma tecnologia universalmente superior, mas identificar variáveis que precisam ser avaliadas em conjunto.

Figura 1. Checkpoints indicativos de redução das emissões anuais totais de GEE do transporte marítimo internacional em relação a 2008. Fonte: elaboração do autor com base na IMO (2023).

2 METODOLOGIA

A pesquisa é qualitativa, exploratória e bibliográfico-documental. Foram priorizadas fontes institucionais e técnicas publicadas até julho de 2025, incluindo a Estratégia IMO 2023, literatura acadêmica sobre eficiência energética e sistemas híbridos e o roadmap do U.S. Department of Energy

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 19/12/2025 | aceito: 22/12/2025 | publicação: 25/12/2025

sobre operação e manutenção de ativos eólicos offshore. A literatura sobre descarbonização e combustíveis alternativos é empregada como fundamentação documental do setor, e não como evidência de experiência profissional específica do autor nesses temas.

A Estratégia IMO 2023 é utilizada como referência regulatória para metas de descarbonização. Para o contexto de integridade e gestão de ativos offshore, o roadmap do U.S. Department of Energy (2024) é utilizado por abordar confiabilidade, manutenção, inspeção, custos, riscos, digitalização, segurança e desempenho. Embora o documento tenha foco em offshore wind, seus princípios de O&M e integridade de ativos oferecem uma referência técnica transferível para a análise de sistemas offshore. Estudos acadêmicos foram selecionados por sua relação direta com variáveis de engenharia, como velocidade, trim, rota, despacho de potência e armazenamento de energia.

Para embarcações offshore, são considerados os trabalhos de Lindstad, Eskeland e Rialland (2017), sobre baterias em offshore support vessels, e estudo publicado em Applied Energy em 2024 sobre otimização de despacho e sistemas de armazenamento em Platform Supply Vessels com dados reais. Esses estudos não são generalizados para toda a frota, mas utilizados para demonstrar mecanismos técnicos relevantes.

A análise de combustíveis alternativos é apresentada como revisão de literatura técnica e regulatória disponível até julho de 2025, com ênfase na Estratégia IMO 2023 e em fontes setoriais anteriores ao limite temporal adotado. Essas fontes são usadas para mapear maturidade, requisitos de segurança, infraestrutura e incerteza tecnológica, sem atribuir ao autor experiência profissional específica em desenvolvimento ou implantação de combustíveis alternativos.

Os resultados são organizados em quatro dimensões: eficiência hidrodinâmica e operacional, arquitetura energética, combustível e infraestrutura, e viabilidade econômico-financeira. A integração dessas dimensões sustenta a estrutura de decisão proposta.

3 EFICIÊNCIA ANTES DA SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEL

A descarbonização pode ser discutida em duas frentes complementares: reduzir a energia necessária para executar uma missão e reduzir a intensidade de emissões da energia consumida. A primeira frente inclui velocidade, rota, trim, condição de casco e propulsor, gestão de potência e planejamento operacional. A segunda envolve combustíveis, eletrificação e novas arquiteturas de propulsão.

Tratar combustível como única variável pode deslocar o problema. Um combustível de menor intensidade de carbono não elimina perdas hidrodinâmicas, operação ineficiente de motores ou dimensionamento inadequado. Quanto menor a demanda energética da embarcação, menor tende a ser a quantidade de combustível ou energia alternativa necessária para cumprir a mesma função.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 19/12/2025 | aceito: 22/12/2025 | publicação: 25/12/2025

Estudos recentes mostram o potencial de otimização operacional. Luo, Yan e Wang (2024) desenvolveram modelo de otimização de velocidade sob condições meteorológicas dinâmicas e reportaram redução de 7,34% no consumo em comparação com um modelo estático de velocidade. O resultado pertence ao navio e às condições estudadas, mas demonstra a relevância de integrar meteorologia à decisão operacional.

Em outra abordagem, Li et al. (2024) combinaram rota, velocidade e trim em um modelo de otimização para eficiência energética e reportaram redução de até 4,54% no consumo no cenário analisado. Já estudos de otimização de trim com CFD e redes neurais mostram como ferramentas computacionais podem converter análises hidrodinâmicas complexas em suporte operacional (ALVAREZ et al., 2024).

Esses resultados não devem ser somados nem tratados como economia garantida. Cada estudo possui navio, rota, condições e hipóteses próprias. O ponto comum é que eficiência operacional mensurável pode ser obtida antes ou paralelamente à mudança de combustível.

4 O PERFIL DE MISSÃO DAS EMBARCAÇÕES OFFSHORE

Em embarcações offshore, a curva de carga costuma ser marcada por forte variabilidade. Operações de trânsito, aproximação, posicionamento dinâmico, movimentação de carga e espera impõem demandas distintas. Sistemas dimensionados para responder com segurança aos picos podem operar durante longos períodos em cargas parciais.

Lindstad, Eskeland e Rialland (2017) observaram que offshore support vessels utilizam múltiplos motores e sistemas avançados de posicionamento dinâmico para manter confiabilidade em diferentes estados de mar. O estudo destaca que a operação de vários motores em baixa carga pode elevar emissões locais e reduzir a eficiência da combustão.

Essa característica explica o interesse em sistemas híbridos. O armazenamento pode absorver variações rápidas, permitir operação de menor número de grupos geradores em faixas mais eficientes e fornecer reserva de potência. A vantagem potencial, entretanto, depende do perfil real de carga e do dimensionamento do sistema.

Um estudo de 2024 em Applied Energy, baseado em dados reais de um Platform Supply Vessel diesel-elétrico, concluiu que a otimização do despacho de potência pode reduzir consumo e CO2, e que a integração de baterias pode produzir ganhos adicionais. O trabalho também observou efeitos distintos sobre poluentes, reforçando que desempenho ambiental não deve ser resumido a uma única variável.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 19/12/2025 | aceito: 22/12/2025 | publicação: 25/12/2025

Para a engenharia, a consequência é metodológica: decisões sobre baterias ou geração não deveriam partir apenas da potência instalada. Séries temporais de carga, duração dos modos operacionais, requisitos de redundância e transientes são informações centrais para avaliar a arquitetura.

5 VELOCIDADE, ROTA, TRIM E CONDIÇÕES AMBIENTAIS

A resistência ao avanço e a potência requerida variam com velocidade, deslocamento, trim, condição de casco, ondas, vento e corrente. Por isso, eficiência operacional exige conexão entre hidrodinâmica e planejamento de viagem.

Weather routing pode buscar menor tempo, menor distância, menor consumo ou combinação desses objetivos. Palma, Giglio e Tei (2024) destacam o potencial do roteamento meteorológico e discutem como padrões de e-navigation e S-100 podem melhorar a informação utilizada no cálculo de rotas.

A otimização de velocidade é igualmente sensível às condições dinâmicas. Modelos que ignoram variação meteorológica podem recomendar perfis diferentes daqueles obtidos quando vento e ondas são incorporados. O trabalho de Luo, Yan e Wang (2024) ilustra essa diferença ao comparar otimização dinâmica e estática.

O trim constitui outra variável de engenharia com potencial operacional. Estudos de otimização conjunta de rota, velocidade e trim mostram que modelos computacionais podem apoiar decisões de eficiência, desde que seus resultados permaneçam vinculados ao navio, aos dados e às condições para os quais foram desenvolvidos. Li et al. (2024), por exemplo, reportaram economia de combustível de até 4,54% no estudo de caso analisado, sem que esse percentual possa ser transferido automaticamente para outras embarcações.

Essas medidas têm uma característica estratégica: muitas podem ser aplicadas sem esperar a maturidade de um novo combustível. Elas também reduzem a energia que futuras soluções de baixo carbono precisarão fornecer.

6 SISTEMAS HÍBRIDOS E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Sistemas híbridos combinam fontes de energia com características distintas. Em embarcações diesel-elétricas, baterias podem atuar em peak shaving, spinning reserve, suporte a transientes e otimização do carregamento dos geradores. O benefício não decorre da presença da bateria em si, mas de como ela altera a operação do conjunto.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 19/12/2025 | aceito: 22/12/2025 | publicação: 25/12/2025

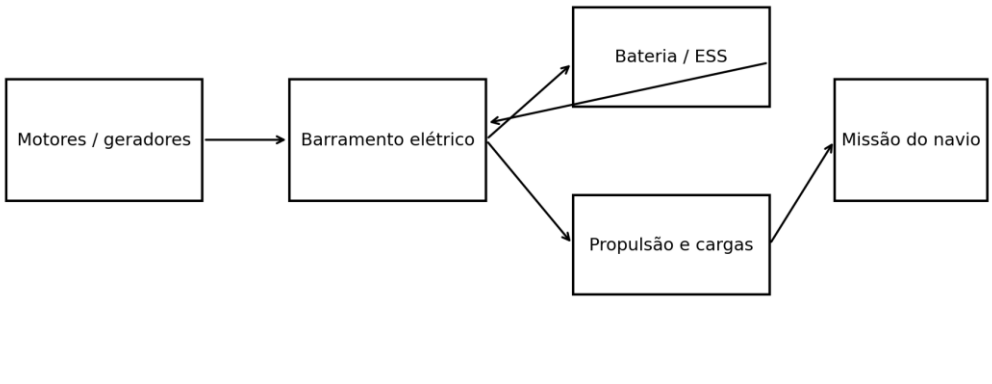

Figura 2. Arquitetura conceitual de um sistema híbrido diesel-elétrico com armazenamento de energia. Fonte: elaboração do autor com base em Lindstad, Eskeland e Rialland (2017) e no estudo de PSV publicado em Applied Energy (2024).

O estudo de Lindstad, Eskeland e Rialland (2017) concluiu que a combinação de baterias e motores de combustão em offshore support vessels poderia reduzir poluição local e impacto climático nas condições analisadas. Naquele contexto econômico, os autores encontraram melhor atratividade para novas embarcações do que para retrofit.

Essa conclusão histórica precisa ser interpretada com cautela porque custos de baterias, combustíveis, regulamentação e tecnologia mudam. Ela continua relevante, porém, ao demonstrar que retrofit e newbuild possuem economias diferentes e não devem ser avaliados pela mesma lógica.

Em projetos novos, integração pode começar no arranjo geral, distribuição elétrica, refrigeração, proteção contra incêndio, peso e estabilidade. Em retrofit, espaço, interfaces existentes, limites estruturais e vida remanescente do ativo podem restringir a solução.

A análise econômica deve, portanto, incorporar não apenas economia de combustível, mas CAPEX, manutenção, substituição de componentes, indisponibilidade, impacto sobre capacidade operacional e eventual valor residual.

7 COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS E INCERTEZA TECNOLÓGICA

A transição energética marítima não apresenta uma única rota consolidada. LNG, biocombustíveis, metanol, amônia, hidrogênio, eletrificação e combinações híbridas possuem níveis diferentes de maturidade, infraestrutura, densidade energética, requisitos de armazenamento e perfil de emissões.

A Estratégia IMO 2023 reconhece que a ampliação de tecnologias, combustíveis e fontes de energia com emissões de GEE zero ou próximas de zero será parte integrante do cumprimento das metas do

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 19/12/2025 | aceito: 22/12/2025 | publicação: 25/12/2025

setor. O documento estabelece como nível de ambição que essas soluções representem pelo menos 5%, buscando 10%, da energia utilizada pelo transporte marítimo internacional até 2030 (IMO, 2023). Essa diretriz regulatória não elimina, contudo, diferenças de maturidade, disponibilidade, custo e infraestrutura entre alternativas.

Para combustíveis emergentes, a avaliação técnica precisa considerar perigos específicos, requisitos de armazenamento, compatibilidade de materiais, infraestrutura e origem da energia. A própria IMO determina que a avaliação climática considere emissões well-to-wake, evitando que a redução em uma etapa da cadeia apenas desloque emissões para outra (IMO, 2023).

Alternativas com maior histórico operacional podem apresentar vantagens de infraestrutura e disponibilidade em determinados mercados, mas isso não elimina a necessidade de avaliar emissões ao longo do ciclo de vida, segurança, conversibilidade e exposição regulatória. O ponto central desta seção é comparar variáveis de decisão descritas na literatura, e não apresentar experiência prática do autor com um combustível específico.

Por isso, fuel readiness não deve significar apenas espaço reservado para um tanque futuro. Uma estratégia robusta examina conversibilidade, compatibilidade de materiais, segurança, disponibilidade regional, preço, regulamentação e impacto no arranjo da embarcação.

8 ECONOMIA DO CICLO DE VIDA E DECISÃO DE INVESTIMENTO

A escolha tecnológica precisa ser conectada ao ciclo de vida econômico do ativo. CAPEX mais elevado pode ser racional quando reduz OPEX ou exposição regulatória durante anos de operação. Da mesma forma, uma solução tecnicamente eficiente pode não se pagar em um ativo próximo do fim de sua vida econômica.

Valor presente líquido, custo total de propriedade e análise de cenários são ferramentas adequadas para comparar alternativas. O desafio está nas premissas: preço de combustível, utilização anual, custo de carbono, disponibilidade de infraestrutura e valor residual podem variar significativamente. Em ambiente de incerteza, uma única projeção central pode esconder risco. Cenários conservador, base e acelerado permitem testar sensibilidade a combustível, regulamentação e utilização. Para ativos marítimos de longa duração, flexibilidade tecnológica pode ter valor econômico mesmo quando não aparece diretamente na eficiência instantânea.

A gestão de projetos também interfere no resultado. Integração tardia de requisitos de combustível, segurança ou sistemas elétricos tende a aumentar retrabalho e interfaces. Decisões de engenharia devem ser tomadas com governança de escopo, risco e mudança compatível com a complexidade do projeto.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 19/12/2025 | aceito: 22/12/2025 | publicação: 25/12/2025

A visão financeira, portanto, não é etapa posterior à engenharia. Ela ajuda a selecionar quais ganhos técnicos possuem valor suficiente para justificar investimento.

9 UMA ESTRUTURA INTEGRADA PARA DECISÃO

Com base na literatura analisada, a decisão pode ser organizada em seis perguntas. Primeiro, qual missão a embarcação precisa cumprir? Segundo, qual é o perfil real de energia dessa missão? Terceiro, quais perdas podem ser reduzidas por medidas operacionais ou hidrodinâmicas? Quarto, qual arquitetura de geração e armazenamento melhor acompanha a curva de carga? Quinto, quais combustíveis são tecnicamente e logisticamente viáveis? Sexto, qual alternativa preserva melhor valor econômico sob diferentes cenários?

A ordem é importante. Começar pelo combustível antes de entender a demanda energética pode produzir superdimensionamento ou escolhas incompatíveis com o perfil de operação. Começar pelo CAPEX isoladamente pode eliminar soluções que apresentam melhor custo total.

Segurança permanece transversal. Novos combustíveis introduzem perigos específicos, enquanto baterias alteram requisitos de proteção e resposta a emergências. Nenhum ganho de emissões justifica redução do nível de segurança.

A estrutura também deve ser iterativa. Uma mudança de rota operacional pode alterar a disponibilidade de combustível; uma nova regulamentação pode alterar o valor de um retrofit; dados reais de consumo podem revelar oportunidade de otimização que não era visível no projeto.

Essa abordagem não produz uma resposta universal. Seu valor está em reduzir decisões fragmentadas e tornar explícitas as dependências entre engenharia, operação e finanças.

10 DISCUSSÃO

A literatura recente converge em um ponto: eficiência marítima é problema multivariável. Estudos de velocidade, rota e trim demonstram ganhos em casos específicos; pesquisas com PSVs mostram o papel de despacho e armazenamento; documentos técnicos sobre combustíveis evidenciam maturidades e barreiras distintas.

Também emerge uma diferença entre eficiência e descarbonização. A primeira se conecta diretamente a decisões de engenharia, operação, confiabilidade e desempenho de ativos; a segunda amplia a análise para um campo regulatório e tecnológico em transformação. Neste artigo, a discussão sobre combustíveis alternativos funciona como contexto técnico-documental para decisões de projeto e investimento, sem pressupor atuação profissional específica do autor na implantação dessas soluções.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 19/12/2025 | aceito: 22/12/2025 | publicação: 25/12/2025

Uma embarcação pode se tornar mais eficiente sem alterar combustível, reduzindo emissões por unidade de serviço. Pode também mudar para energia de menor intensidade de carbono sem corrigir ineficiências operacionais. A estratégia mais robusta combina as duas frentes.

Para o segmento offshore, a variabilidade de carga e a necessidade de confiabilidade tornam essa integração especialmente relevante. A avaliação deve considerar modos de operação, requisitos de posicionamento, reserva, resposta dinâmica e segurança.

Os checkpoints da IMO intensificam a importância de decisões tomadas no presente. Uma embarcação encomendada em meados da década de 2020 poderá operar durante os marcos de 2030 e 2040. Isso transforma risco regulatório em variável de projeto.

Há, contudo, limites importantes. Resultados percentuais de economia encontrados em estudos não devem ser transportados diretamente para outras embarcações. A validade depende de dados, modelo, rota, condição ambiental e arquitetura. Estudos de caso devem orientar hipóteses, não promessas de desempenho.

A principal implicação é a necessidade de engenharia baseada em dados e análise de ciclo de vida. Medir antes de investir, validar modelos e testar cenários são práticas que reduzem risco de decisões tecnicamente atraentes, mas economicamente frágeis.

CONCLUSÃO

A descarbonização marítima não pode ser reduzida à escolha de um novo combustível. Ela começa pela compreensão de quanta energia a embarcação precisa para cumprir sua missão e por que essa energia é consumida.

Medidas operacionais como otimização de velocidade, rota e trim demonstram potencial de redução de consumo em estudos recentes, mas os percentuais são específicos de cada caso e não constituem garantia de desempenho.

Em embarcações offshore, a curva de carga variável torna despacho de potência e armazenamento particularmente relevantes. Estudos com offshore support vessels mostram que sistemas híbridos podem reduzir consumo e emissões quando corretamente dimensionados e operados.

A escolha entre newbuild e retrofit exige lógicas econômicas diferentes. Espaço, integração, vida remanescente e custo de parada podem alterar a atratividade de uma solução.

Combustíveis alternativos acrescentam outra camada de incerteza. Maturidade da tecnologia de bordo não significa disponibilidade de combustível de baixo carbono, e desempenho no escapamento não substitui análise de ciclo de vida.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 19/12/2025 | aceito: 22/12/2025 | publicação: 25/12/2025

A Estratégia IMO 2023 torna essa discussão temporalmente concreta ao estabelecer ambições para 2030, 2040 e aproximadamente 2050. Ativos de longa vida precisam ser avaliados contra esse horizonte.

A integração entre engenharia e finanças é, portanto, necessária. CAPEX, OPEX, disponibilidade, manutenção, risco regulatório e flexibilidade precisam ser avaliados junto com consumo e emissões.

A gestão de projetos também é parte da eficiência. Requisitos de segurança, combustível e arquitetura energética precisam entrar cedo no desenvolvimento para evitar interfaces tardias e retrabalho.

A estrutura proposta neste artigo organiza a decisão a partir da missão, da demanda energética, das oportunidades de eficiência, da arquitetura de potência, do combustível e da análise econômica. Ela é uma síntese conceitual e não um modelo preditivo.

Pesquisas futuras podem aprofundar a integração entre dados operacionais, modelos hidrodinâmicos, previsão meteorológica e otimização de despacho em embarcações offshore, com validação em diferentes perfis de missão.

Também são necessários estudos de ciclo de vida que incorporem preços futuros de energia, emissões upstream e mudanças regulatórias, evitando conclusões baseadas apenas no desempenho de bordo.

Conclui-se que a transição marítima de baixo carbono será mais consistente quando a eficiência energética for tratada como disciplina contínua de projeto e operação, e não como resposta isolada a uma meta regulatória.

REFERÊNCIAS

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). An Operations and Maintenance Roadmap for U.S. Offshore Wind. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2024.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. London: IMO, 2023.

LINDSTAD, Haakon Elizabeth; ESKELAND, Gunnar S.; RIALLAND, Agathe. Batteries in offshore support vessels: pollution, climate impact and economics. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 50, p. 409-417, 2017. DOI: 10.1016/j.trd.2016.11.023.

LI, Zhongwei et al. GA-LSTM and NSGA-III based collaborative optimization of ship energy efficiency for low-carbon shipping. Ocean Engineering, v. 312, art. 119190, 2024. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.119190.

LUO, Xi; YAN, Ran; WANG, Shuaian. Ship sailing speed optimization considering dynamic meteorological conditions. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 167, art. 104827, 2024. DOI: 10.1016/j.trc.2024.104827.

PALMA, Valentino; GIGLIO, Davide; TEI, Alessio. Investigating the influence of e-navigation and S-100 over the computation of the weather route. WMU Journal of Maritime Affairs, v. 23, p. 457-475, 2024. DOI: 10.1007/s13437-024-00344-7.

ASSESSING the impact of power dispatch optimization and energy storage systems in Diesel-electric PSVs: a case study based on real field data. Applied Energy, v. 357, art. 122476, 2024. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.122476.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.