BENEFÍCIOS E DESAFIOS DA PROPULSÃO HÍBRIDA ALOCADA A EMBARCAÇÕES DE VARIADOS PORTES E SEGMENTAÇÕES

Heron Mandelli Gomes[1], Felipe Gatti Constantino[1], Lukas da Silva Meireles[1], Roger da Silva Rodrigues[2]

[1]Acadêmicos do curso de Engenharia Mecânica
[2]Mestre em Engenharia Mecânica – Professor Multivix – Serra

RESUMO

O presente estudo teve por objetivo analisar a propulsão híbrida, elucidando os benefícios e desafios dessa quando alocada a embarcações de variados portes e segmentações. Como metodologia foi utilizada revisão sistemática, quantitativa de base técnica descritivo-exploratória, a qual inclui análise detalhada e crítica e interpretação científico - literária de conteúdos textuais ligados ao tema “Benefícios e desafios da propulsão híbrida alocada a embarcações de variados portes e segmentações”. Conclui-se que os principais benefícios propulsão híbrida quando alocada a embarcações de variados portes e segmentações seguem ligados a maior economia de combustível, menor ruído de cavitação, maior carga média do motor, custos de manutenção mais baixos, maior sustentabilidade (redução da emissão de NOx e CO2), maior confiabilidade operacional e maior tempo de atividade. No que se refere aos desafios, tem-se que o principal deles tange sobre equilibrar, adequadamente, no projeto os requisitos funcionais com as estratégias de troca entre o motor elétrico e o mecânico, o que, na prática, não é simples de ser realizado em embarcações ativas nem em prospectos de embarcações futuras.

Palavras-chave: Sistemas de propulsão. Propulsão mecânica e elétrica. Propulsão híbrida. Embarcações.

1 INTRODUÇÃO

De um modo amplo pode ser dito que a propulsão é o impulso ou avanço dado a um referido objeto estacionário. Assim, é verdadeiro indicar que um sistema de propulsão é o que se utiliza de motores a gerar impulso ou avanço mecânico a um objeto estático. Em segmentação naval sistemas de propulsão são compreendidos como sendo os meios empregados a dispor impulso a hélices para movimentar embarcações por sob as águas (MOLLAND et al., 2011; BARCELLOS, 2013; SOUZA, 2015).

> O artigo 2, inciso V, da Lei 9.537/97 conceitua embarcação como qualquer flutuante – inclusive as plataformas flutuantes e, quando rebocadas, as fixas – sujeito à inscrição na autoridade marítima e suscetível de se locomover na água, por meios próprios ou não, transportando pessoas ou cargas ...[...]... Da amplitude do conceito de navio e embarcação e com base na nova visão da indústria *shipping*, a doutrina brasileira vem consolidando a teoria contemporânea ao considerar embarcação o gênero do qual o navio é a espécie (MARTINS, 2013, p 124).

Sob tal foco é vital indicar que, atualmente, a maioria das embarcações alcançam sua propulsão através de energia a qual pode ser gerada por motores elétricos ou mecânicos; no entanto, embarcações mais “modernas” podem se utilizar ainda de sistemas híbridos de propulsão, os quais detém a energia necessária a gerar propulsão de um ou mais “tipos” de motores, os quais podem ser utilizados juntos ou alternadamente, conforme a necessidade, podendo esses elevar a eficiência energética bem como a “pegada sustentável” da embarcação como um todo (MOLLAND et al., 2011; SOUZA, 2015; BARELLI et al., 2018; JAFARZADEH; SCHIOBERG, 2018; LITWIN et al., 2019; NGUYEN et al. 2020).

Nesse contexto cabe destacar que a propulsão híbrida de embarcações segue o princípio básico de que diferentes motores funcionam melhor em diferentes velocidades; sendo que o motor elétrico se mostra mais eficiente a gerar torque e/ ou potência de rotação, e o motor mecânico se mostra melhor a manter alta a velocidade de cruzeiro. Por isso, mudar de um “tipo” de motor para o outro em momentos apropriados/ oportunos pode gerar ganhos operacionais, significativos, tornando as embarcações mais eficientes e versáteis (SOUZA, 2015; BARELLI et al., 2018).

O fato é que mesmo existindo indicações técnicas de que os sistemas de propulsão híbridos podem ser mais eficientes e versáteis, ainda existem muitas dúvidas acerca de quais seriam seus reais benéficos e desafios quando empregados em embarcações de variados portes e segmentações, o que pode explicar, mesmo que em parte, por que muitos Engenheiros atuantes na segmentação naval ainda se mostram receosos em sequer levantar a hipótese de seu uso, junto a realidade operacional de embarcações que seguem sob sua

tutela operacional (SOUZA, 2015; JAFARZADEH; SCHIOBERG, 2018; LITWIN et al., 2019; NGUYEN et al., 2020).

Diante do supradescrito surgiu o problema de pesquisa: “Quais os principais benefícios e desafios dos sistemas de propulsão híbrida em embarcações?”.

O objetivo do presente trabalho foi analisar a propulsão híbrida, elucidando os benefícios e desafios dessa quando alocada a embarcações de variados portes e segmentações. Afim de enriquecer o estudo foi somado ao mesmo os seguintes objetivos específicos: (1) Compreender sistemas de propulsão híbrida, com foco em embarcações, (2) Analisar aplicações de sistemas de propulsão híbrida, no que tange as embarcações offshore e de patrulha da Marinha, e (3) Elucidar os principais benefícios e desafios que seguem envoltos ao uso de sistemas de propulsão híbrida em embarcações.

O presente artigo está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta o desenvolvimento do estudo em si, sendo que, na seção 2.1 são compreendidos os sistemas de propulsão híbrida, com foco em embarcações, na seção 2.2 são analisadas as aplicações de sistemas de propulsão híbrida, no que tangem as embarcações offshore e de patrulha da Marinha; na seção 2.3 são elucidados e descritos os principais benefícios e desafios que seguem envoltos ao uso de sistemas de propulsão híbrida em embarcações.; na seção 3 segue disposta a Metodologia; na seção 4 segue alocada a Discussão do estudo; na seção 5 se apresenta a Conclusão.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

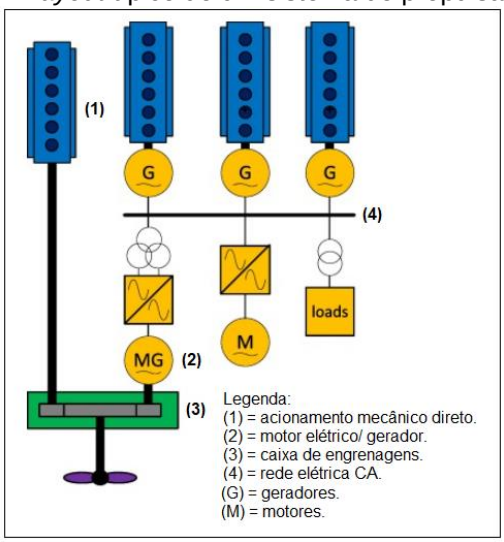
2.1 Sistemas de propulsão híbrida

Um sistema de propulsão híbrida utiliza-se de motores mecânicos e elétricos trabalhando juntos para fornecer energia para propulsão, otimizando a eficiência de combustível de embarcações com uma demanda de energia flexível. Cabe ser dito ainda que referidos sistemas, quando alocados em aplicações marítimas, buscam otimizar a operação e reduzir as emissões

nocivas ao meio ambiente do motor (BARCELLOS, 2013; BARELLI et al., 2018; AMY, 2019; LITWIN et al., 2019; KIM et al., 2020; NGUYEN et al. 2020).

Na propulsão híbrida, um acionamento mecânico direto (1) fornece propulsão para altas velocidades e alta eficiência. Além disso, um motor elétrico (2), que é acoplado ao mesmo eixo através de uma caixa de engrenagens (3) ou diretamente ao eixo que aciona a hélice, fornece propulsão a baixas velocidades, evitando assim o funcionamento do motor principal de forma ineficiente em carga parcial. Este motor também poderia ser usado como gerador de cargas elétricas na rede elétrica de serviços de navios (4). Um *layout* típico para um sistema de propulsão híbrido é apresentado na Figura 1 (MOLLAND et al, 2011; SOUZA, 2015; BARELLI et al., 2018).

Figura 1 – *Layout* típico de um sistema de propulsão híbrida



Fonte: Baseado em Molland e colaboradores (2011), Souza (2015) e Barelli e colaboradores (2018).

É interessante destacar que quando o motor de acionamento mecânico está funcionando, esse sistema permite gerar capacidade a partir do gerador elétrico ou dos grupos geradores. Normalmente, o controle baseado em regras ou o operador determina a capacidade de geração (BARCELLOS, 2013; ZAHEDI; NORUM, 2013; BARELLI et al., 2018).

2.2 Aplicações da propulsão híbrida em embarcações

Aplicações típicas de sistemas híbridos de propulsão e potência são fragatas e navios de reboque, no entanto, são esses efetivamente mais aplicáveis a embarcações *offshore* e embarcações de patrulha da Marinha (CASTLES; BENDRE, 2009; SULLIGOI et al., 2012; BARCELLOS, 2013; LITWIN et al., 2017; BARELLI et al., 2018; NGUYEN et al. 2020).

2.2.1 Embarcações *Offshore*

Nesse contexto é pertinente indicar que Embarcações de Suporte *Offshore* (internacionalmente conhecidas pela sigla OSV) ou AHTS (*Anchor Handling Tug Supply*) são bons exemplos de embarcações com alta demanda de energia flexível e, por consequência, diferentes modos de operação e velocidades de navegação (MOLLAND et al., 2011; SOUZA, 2015; BARELLI et al., 2018).

Segundo Barcelos (2013), Amy (2019) e Litwin et al. (2019), vale lembrar que:

- O perfil da operação de embarcações *offshore*, geralmente, é dividido em duas “partes”: uma com alta demanda de energia de propulsão para trânsito e navegação livre e outra com uma demanda de energia, significativamente, menor ao operar a embarcação no modo de posicionamento dinâmico e manutenção da estação.
- Uma instalação de sistemas propulsores típica de tais embarcações detém de dois propulsores principais em salas de máquinas separadas a garantir redundância e flexibilidade no sistema. Além disso, se for necessária energia extra, por exemplo, para operação de tração de amarração, isso pode ser fornecido pelo motor elétrico.
- Para embarcações com uma ampla gama de atividades, um sistema híbrido oferece um consumo de combustível significativamente menor, manobrabilidade aprimorada e emissões mais baixas de

gases tóxicos no meio ambiente quando comparado a outros sistemas propulsores existentes.

- Os níveis de ruído e vibração também são reduzidos, proporcionando conforto à tripulação.

2.2.2 Embarcações de Patrulha da Marinha

De um modo amplo é verdadeiro indicar que as embarcações de patrulha da Marinha são as que mais necessitam deter a possibilidade de acelerar à velocidade máxima em um curto período (MOLLAND et al., 2011; SOUZA, 2015; BARELLI et al., 2018).

Por isso, segundo Molland et al. (2011), Souza (2015), Barelli et al. (2018) e Litwin et al. (2019), pode ser dito que um sistema de propulsão híbrido em referidas embarcações pode ser positivo, visto que o mesmo:

- Viabiliza à embarcação alta flexibilidade propulsora, permitindo que a embarcação se mostre positiva tanto a navegar em baixa velocidade (com motor elétrico) como em alta velocidade (com o motor mecânico – principal) quando necessário;
- É apto a “caber” no espaço reduzido que, comumente, é destinado à casa das máquinas de tais embarcações;
- Fornece a energia excedente necessária no modo de potência total;
- Oferta baixa emissão de ruído e cavitação da hélice quando operando em boas condições hidrodinâmicas, o que permite abordagens marítimas sorrateiras junto a outras embarcações.

2.3 Benefícios e desafios da propulsão híbrida

Como a propulsão híbrida é uma combinação de propulsão elétrica e mecânica, ela pode dispor de benefícios bem como desafios de ambas (MOLLAND et al., 2011; SOUZA, 2015; BARELLI et al., 2018).

No que afeta os desafios da propulsão híbrida, é verdadeiro indicar que o principal deles tange sob o projeto, visto que esse precisa apresentar um equilíbrio adequado entre os requisitos funcionais e as estratégias de troca entre o motor elétrico e o mecânico (MOLLAND et al., 2011; BARELLI et al., 2018; LITWIN et al., 2019).

Por isso, pode ser dito que para se alcançar benefícios com a propulsão híbrida faz-se necessário que já tenham sido superados seus desafios de projeto; o que, na prática, não é simples nem tão pouco fácil de ser alcançado quer seja junto a prospectos de embarcações ou a embarcações já em uso (MOLLAND et al., 2011; SOUZA, 2015).

Segundo Molland et al. (2011), Souza (2015), Barelli et al. (2018) e Litwin et al. (2019), os principais benefícios de sistemas propulsores híbridos a embarcações são:

- Positiva capacidade operacional para embarcações que detêm alta demanda variável de energia flexível, o que pode proporcionar a essas respostas rápidas do sistema e uma alta flexibilidade produtiva;
- Sistema propulsão altamente redundante e confiável visto que a hélice pode ser acionada tanto pelo motor mecânico como pelo motor elétrico.
- Maior estabilidade de frequência e tensão, visto que em referido sistema a hélice pode operar com RPM (Rotação Por Minuto) variável;
- Maior eficiência com um menor consumo de óleo combustível; o que ainda reduz (vide a ocorrência de uma menor combustão incompleta) a emissão de gases poluentes, como NOx e CO_2, no meio ambiente;
- Maior flexibilidade; embora a otimização mecânica seja, geralmente, determinada por um ou alguns modos operacionais, a capacidade do acionamento elétrico aumenta tremendamente a flexibilidade geral da embarcação;
- Menor ruído e cavitação na hélice, o que decorre do fato de nesse sistema:

  - Poder ser conferida uma ótima relação velocidade/ inclinação;
  - A velocidade e o passo da hélice podem ser controlados independentemente;
- Dependendo dos modos operacionais da embarcação, os motores principais e os auxiliares funcionam menos horas por ano e, quando em operação, com cargas mais altas. Ambos levam a menos manutenção necessária.

3 METODOLOGIA E MÉTODO DA PESQUISA

No estudo apresentado, utilizou-se o método de revisão sistemática quantitativa com base na técnica de exploração descritiva, que inclui análise detalhada e crítica e interpretação científica e literária do conteúdo do texto que se refere ao tema “Benefícios e desafios da propulsão híbrida alocada a embarcações de variados portes e segmentações”.

O conteúdo foi diretamente extraído de anuários, livros, e periódicos de publicações nacionais e oriundas de outras nações, editados entre 2010 e 2020. Os periódicos foram retirados de acervos público digitais de *websites* como Scielo, se utilizando das seguintes palavras-chave: Sistemas de propulsão. Propulsão mecânica e elétrica. Propulsão híbrida. Embarcações.

4 DISCUSSÕES SOBRE RESULTADOS ENCONTRADOS NA LITERATURA

Em 2009 Castles e Bendre publicaram um estudo denominado “Benefícios econômicos da propulsão híbrida para navios de guerra (tradução livre)”, onde ditaram que o perfil operacional típico para contratorpedeiros e outras embarcações marítimas inclui uma quantidade, significativa, de tempo ocioso (posicionamento dinâmico) ou outra atividade de baixa velocidade; sendo que a operação em baixa velocidade é acompanhada pela ineficiência do sistema de propulsão, visto que as turbinas de propulsão estão operando fora do projeto. Tal ato, torna ideal existirem embarcações que se mantém por longos

períodos, em posicionamento dinâmico a serem utilizados sistemas de propulsão híbridos com a parte elétrica a complementar a propulsão mecânica e as instalações elétricas existentes no navio. Em tais casos a energia elétrica gerada pelos geradores de turbina de serviço do navio (SSTGs) será usada para acionar grandes motores de ímã permanente e os motores então acionam os eixos da hélice durante a operação em baixa velocidade, o que permitirá que as turbinas de propulsão sejam desligadas e os SSTGs funcionem mais perto do ponto de projeto, resultando em economia de combustível (sustentabilidade operacional). Referidos autores destacam ainda que economias adicionais podem ser também alcançadas em sistemas hidrodos em altas velocidades ao serem os motores operados no modo de geração, o que permite ser o SSTG desligado a otimizar o desempenho da turbina de propulsão.

Segundo Barcellos (2013) com a exploração de petróleo *offshore* se afastando da costa, os projetistas de embarcações de apoio *offshore* (OSV) tem enfrentando novos desafios, já que essas embarcações devem agora ser capazes de navegar com eficiência mais longe em altas velocidades e também permanecer em posicionamento dinâmico por períodos mais longos em mares mais agressivos. Historicamente, o sistema de propulsão é otimizado para uma dessas condições - navegação livre e posicionamento dinâmico - enquanto o desempenho na condição restante é consequente; temos, então, OSVs sendo equipados com um dos dois principais sistemas de propulsão amplamente conhecidos no mercado: (1) mecânico ou (2) diesel-elétrico, o primeiro sendo ideal para navegação livre ou tração (*bollard-pull*) e o último sendo a escolha preferida para embarcações que devem permanecer em posicionamento dinâmico por longos períodos de tempo. No entanto, os novos campos *offshore* distantes complicaram este cenário fixo, pois os navios equipados com propulsão mecânica estão agora em condição de posicionamento dinâmico por períodos mais longos, enquanto os navios diesel-elétricos são obrigados a vapor em altas velocidades por distâncias que ficam mais longas a cada dia. Em ambos os casos, seus sistemas de propulsão estão operando longe de seu ponto ideal durante longos períodos de tempo, o que causa um consumo excessivo de combustível e aumenta o desgaste do equipamento. Este último pode ser um

grande problema em regiões onde estaleiros de reparo e docas secas são escassos. Referido autor destaca que o denominado “sistema de propulsão híbrido” ainda é um tanto desconhecido e tem relativamente poucas aplicações no transporte marítimo comercial quando comparado aos sistemas de propulsão mais utilizados - os já mencionados sistemas mecânico e diesel-elétrico. Também conhecido como Diesel-Elétrico- Mecânico (ou pela sigla DEM) este sistema pode se mostrar uma alternativa bastante boa para embarcações com um perfil operacional que alterna entre alta e baixa demanda de potência propulsiva, para embarcações que precisam de redundância muito alta no sistema de propulsão, mas não se beneficiariam de propulsão totalmente diesel-elétrica, e para embarcações que podem ter mais de um perfil operacional.

Sob mesma tematica em findo 2017 eis que surge Litwin e colaboradores com o estudo intitulado “Conversão híbrida com eficiência energética e ecologicamente correta de embarcações de passageiros terrestres”, onde relatam que o desenvolvimento e a crescente disponibilidade de tecnologias modernas, juntamente com padrões de proteção ambiental cada vez mais severos, que frequentemente assumem a forma de regulamentações legais, são a razão pela qual são feitas tentativas para encontrar um sistema de propulsão silencioso e econômico não apenas para unidades de embarcações recém-construídas, como também para modernizar as já existentes. Referidos pesquisadores salientam que a seleção correta do sistema de propulsão e abastecimento para uma determinada embarcação afeta, significativamente, não apenas a eficiência energética do sistema de propulsão, mas também o ambiente, tendo visto que essa seleção é crucial para os níveis de emissão (NOx, CO_2 e ruídos) e exaustão. Tais atos direcionaram os pesquisadores, em referido estudo, a dispor resultados de exames experimentais da demanda de energia realizado em um navio de passageiros histórico de 25m de comprimento. Duas variantes, referidas como sistemas de propulsão híbrida serial e paralela, foram examinadas no que diz respeito ao comprimento máximo da rota de um dia coberto pelo navio. As demandas de energia registradas e o impacto ambiental foram comparados com aqueles característicos do sistema de propulsão convencional já instalado. Levando em consideração um alto nível de

segurança que se espera garantir em um navio de passageiros, o sistema híbrido serial foi baseado em dois motores elétricos trabalhando em paralelo e alimentados por dois conjuntos separados de baterias; esta solução garante maior confiabilidade, juntamente com eficiência energética relativamente alta. Os resultados dos exames realizados revelaram que o sistema de propulsão serial é o menos prejudicial ao meio ambiente, mas seu custo de investimento é o mais alto; nesse contexto, a solução ótima para o armador “parece” mesmo ser um sistema híbrido paralelo do tipo diesel-elétrico.

Também em 2018 Jafarzadeh e Schioberg publica estudo intitulado “Perfis operacionais de navios em águas norueguesas: uma abordagem baseada em atividades para avaliar os benefícios da propulsão”, onde os pesquisadores salientam que, nos ultimos anos, vários regulamentos vem sendo impostos ao transporte marítimo, em especial pela Organização Marítima Internacional (OMI), a aumentar a eficiência energética e reduzir os impactos ambientais das embarcações, independentemente, da segmentação usal dessas. Combustíveis alternativos e sistemas de energia inovadores estão entre as soluções mais analisadas a fazer cumprir as exigencias/ regulamentações. Com base nisso, pesquisadores buscaram, em referido estudo, analisar a atividade e “big data” do Sistema de Identificação Automática (internacionalmente conhecido pela sigla AIS) no perfil operacional de oito “tipos” de navios que operaram nas águas norueguesas no ano de 2016, buscando com isso identificar os “tipos” de navios que mais poderiam se beneficiar com a propulsão híbrida a operacionar. Percebeu-se que navios que operam próximo da costa detém perfis operacionais muito semelhantes, passando a maioria desses grande parte do tempo com cargas baixas; sendo que, conforme a distância operacional dos navios se afasta da costa se elevam os “tipos” de perfis operacionais, detendo cada um sua propria tendências. Entre os “tipos” de navios considerados no estudo, destacaram-se: (1) os *reef* foram – sendo esses os que passam mais tempo operacional perto da costa, em modo operacional de esperae/ ou de carga baixa se utilizando esses de motor diesel, e (2) os *offshore* e de passageiros – sendo esses os que apresentam os perfis operacionais mais dinâmicos e passam grande parte do seu tempo operacional com carga parcial

se utilizando esses, corriqueiramente, de motores diesel. Ao fim do estudo pesquisadores aferiram que todos os “tipos” de navios avaliados (*reef*, *offshore* e de passageiros) podem se beneficiar com a propulsão hibridização, sendo uma opção a esses reduzir o tamanho dos motores a diesel a deter uma melhor operação, enquanto as células de combustível e as baterias fornecem cargas de pico e parciais.

Em 2018 Barelli e colaboradores publicaram o estudo de tema “Modelagem Dinâmica de um Sistema de Propulsão Híbrido para Barco Turístico (tradução livre)”, onde indicaram que o interesse em projetar navios mais eficientes, sustentáveis e versáteis vem de encontro a novas exigências/ regulamentações, as quais se mostram, cada vez mais, rigorosas, em especial no que tangem as emissões, junto aos mesmos; pondedo ser uma possível solução a superar tais problemáticas substituir os sistemas de propulsão marítima baseados em motores a diesel por arquiteturas híbridas. Tal ato direcionaou os pesquisadores a analisar a dinâmica de um sistema de propulsão marítima híbrido (internacionalmente conhecido pela sigla HPS), o qual consiste em um Motor de Combustão Interna (MCI) e um motor elétrico acoplado a uma bateria, sendo a esse disposta uma simulação dinâmica de um ciclo de trabalho diário com base em uma demanda de carga real de uma embarcação turística (a mesma era utilizada a levar turístas a uma determinada caverna marítima). Como resultado pesquisadores relataram que, especificamente, o modelo MCI permitiu verificar se o modelo escolhido é adequado para sustentar as cargas do ciclo durante as fases de cruzeiro e alta velocidade, respeitando a curva de velocidade atribuída. O modelo da bateria foi, em vez disso, usado para verificar o estado de carga do sistema de baterias de armazenamento híbridos (internacionalmente conhecido pela sigla ESS) durante o ciclo de trabalho diário e para autonomia suficiente de recarga externa. A partir dos resultados da simulação, fez-se possível afirmar que o sistema híbrido é capaz de oferecer navegação em baixa velocidade e emissão zero durante visitas a cavernas e manobras em portos e áreas protegidas. No que diz respeito aos dois tipos de baterias testadas, pode-se concluir que a bateria de 10,8 kWh com módulos de 40 Ah é a escolha ideal em termos de peso e custos e, além disso, garante um

alcance de 6 ciclos de missão consecutivos sem recarga externa; em vez disso, a bateria de 18 kWh (módulos de 60 Ah) é capaz de fornecer maiores potências de partida e a possibilidade de evitar a recarga necessária durante os tempos de acoplamento, mas, por outro lado, esta solução é mais cara e pesada. Do ponto de vista energético, a adoção de uma arquitetura híbrida levou a uma melhoria na eficiência geral do sistema de propulsão na rota considerada. No que se refere ao consumo específico, a adoção do HPS permite-nos diminuí-lo em cerca de 2% no caso da bateria de 10,8 kWh no que diz respeito ao caso em que apenas o motor diesel se destina a cobrir todo o percurso.

Corroborando com Barelli (2018) em 2019 retorna a cena Litwin e colaboradores, indicando que os crescentes requisitos normativos/ regulatórios voltados a limitar o impacto negativo de todos os modos de transporte no ambiente natural tem “forçado” o desenvolviemnto de tecnologias limpas, as quais tem se tornando, mais e mais, importantes em todo o mundo; como a tendência global da e-mobilidade (transportes sustentáveis) também se aplica ao transporte marítimo e fluvial, pesquisadores buscaram em seus estudo apresentar resultado de testes experimentais realizados em um sistema de propulsão híbrido diesel-elétrico paralelo em tamanho real. Para tanto os pesquisadores analisaram a eficiência do sistema de propulsão para dois modos de operação (elétrico e diesel) e para diferentes velocidades e cargas do motor. A análise do impacto do uso de um sistema de propulsão híbrido no consumo de combustível foi realizada em uma embarcação de estudo de caso e para seis viagens reais. O uso de propulsão híbrida no modo "emissão zero" permitiu eficiência energética até quatro vezes maior quando comparada a uma unidade convencional, enquanto reduz as emissões de CO_2 e poluição do ar para zero, bem como uma redução de cem vezes nas emissões de ruído. A alta flexibilidade na operação de tal acionamento permitiu o uso de tecnologia de controle inteligente de potência (propulsão inteligente). Tais resultados levaram os pesquisadores a concluir que o uso da propulsão híbrida reduz ao mínimo o impacto negativo no meio ambiente e permite uma redução, significativa, nos custos operacionais das embarcações, tanto em posicionamento dinamico como em artividade plena de navegação.

Nesse contexto faz-se pertinente destacar o estudo de Amy (2019), onde é destacado que o transporte marítimo polui o ar e a água, sendo que só no período de 2007 a 2012, foi esse responsável por 2,6% das emissões de CO_2 no planeta. Embora, quando comparado ao transporte aéreo, o transporte marítimo se mostre mais vantajoso em face do peso que é transportado (melhor custo X benefício), tal modalidade é menos vantajosa no que se refere às emissões (NOx e CO_2). Ainda de acordo com Amy (2019), (1) a demanda por transporte marítimo está projetada para aumentar em até 250% até 2050, o que resultará em um aumento correspondente nas emissões (NOx e CO_2), a menos que alternativas sejam ofertadas e empregadas ao segmento naval, (2) existem mais de 100.000 navios de transporte, sendo que desses mais de 6.000 são de grande porte, comportando até 22.000 contêineres cada, (3) o transporte marítimo não é apenas um dos principais contribuintes para as mudanças climáticas, mas também um dos mais difíceis de se descarbonizar, e (4) os navios deveriam investir na utilização de meios mais sustentaveis a angariar energia, sendo interessante se valerem os mesmos de, por exemplo, propulsores hibridos a mitigar seu impacto no meio ambiente.

Sob tal temática é pertinente indicar o estudo disposto por Nguyen e colaboradores (2020), onde é indicado que selecionar e otimizar a arquitetura de propulsão é um dos objetivos mais práticos e uma das decisões mais difíceis de serem dispostas em um projeto de navio comercial moderno; visto que a esse seguem elencados vários desafios, os quais comumente seguem ligados as emissões de gases com efeito de estufa decorrentes do consumo de combustíveis fósseis, ao rigoroso sistema jurídico internacional da Organização Marítima Internacional (OMI) sobre a prevenção da poluição ambiental e as novas normas de eficiência energética para a conceção e gestão de frotas comerciais. Com a disponibilização, nos últimos anos, de sistemas híbridos, diversos equipamentos inovadores de fornecimento de energia se fizerem possíveis de serem alocados a atender embarcações/ transporte marítimo; o que trouxe vários benefícios aos armadores, incluindo a viabilidade desses de alcançar uma maior flexibilidade, automação e confiabilidade construtiva atrelada a uma maior capacidade de atenderem os mesmos as leis

internacionais com um menor custos (produtivo e operacional). No entanto, os benefícios introduzidos na arquitetura de propulsão pelos sistemas de propulsão híbrida, nos últimos anos, colocaram uma pressão considerável sobre os armadores, projetistas e engenheiros a otimizar a propulsão e o sistema de energia das embarcações, o que pode, quando não bem “pensado”, gerar mais danos do que beneficios ao segmento, sendo por isso fundamental existirem estudos sobre o tema focados a dispostos testes de prova de conceito aos mesmos.

Com base nas indicações de Nguyen e colaboradores (2020), eis que também em 2020 surge Kim e colaboradores com o estudo intitulado “Integração de sistema e resultados de teste de prova de conceito do sistema de geração de energia híbrido de motor SOFC”, onde apresentam um novo conceito de geração de energia híbrida, com base em célula de combustível de óxido sólido (conhecida internacionalmente pela sigla SOFC-motor), e o resultado de teste de prova de conceito para um sistema de classe de 5 kW. No estudo pesquisadores destacam que o sistema híbrido SOFC-motor é uma combinação de um SOFC e motor de combustão interna, consistindo em uma pilha SOFC, um reformador, um soprador de ar, um sistema de abastecimento de combustível, uma bomba de água, um trocador de pré-aquecimento de ar, um gerador de vapor e um motor de combustão interna. Para provar a viabilidade do conceito de sistema híbrido proposto, um sistema de demonstração em pequena escala de classe 5 kW foi integrado ao sistema proposto, e os testes foram realizados em várias condições experimentais com hidrogênio puro e gás metano reformado. No teste à base de hidrogênio, o SOFC e o motor geraram 4,4 kW e 731 W, respectivamente, com 70% de utilização de combustível. Tal ato indica que o motor melhorou a eficiência em 7,9% em comparação com a operação apenas com célula de combustível (47,8%). No teste de gás reformado, a demonstração foi realizada por mais de 200 h. Com uma utilização de combustível inferior a 50,6%, a SOFC e o motor geraram 3,3 kW e 1168 W, respectivamente; o motor foi responsável por 26,0% da produção total de energia líquida. À medida que a utilização de combustível aumentou, o compartilhamento de potência do motor diminuiu; o motor foi responsável por 17,3%, 13,1% e 7,6%

da potência líquida total em utilizações de combustível de 61,2%, 65,4% e 70,1%, respectivamente. Com base nos resultados, pesquisadores concluiram que com 70,1% de utilização do combustível, a eficiência melhorou 5,3% devido à potência adicional do motor. Através de uma série de testes, foi observado que em uma utilização de combustível de mais de 65%, a produção de potência total e a soma da potência SOFC e potência do motor mantiveram valores semelhantes porque o motor compensou a diminuição de potência na pilha SOFC.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que os principais benefícios da propulsão híbrida quando alocada a embarcações de variados portes e segmentações seguem ligados a maior economia de combustível, menor ruído de cavitação, maior carga média do motor, custos de manutenção mais baixos, maior sustentabilidade (redução da emissão de NOx e CO_2), maior confiabilidade operacional e maior tempo de atividade. No que referem os desafios, tem-se que o principal tange sobre equilibrar, adequadamente, no projeto os requisitos funcionais com as estratégias de troca entre o motor elétrico e o mecânico, o que, na prática, não é simples de ser realizado nem embarcações ativas nem em prospectos de embarcações futuras.

É interessante indicar que as embarcações que se mostram mais positivas a para projetos funcionais e equilibrados de sistemas híbridos de propulsão são as embarcações *offshore* e as embarcações de patrulha da Marinha as quais detém espaço ideal a ancorar tais sistemas bem como são as que, por trabalharem ou em posicionamento dinâmico de espera ou em alta demanda de energia a alcançar alta velocidade a intercepção, detém maior necessidade de flexibilidade energética.

REFERÊNCIAS

AMY, C. Pathways and Obstacles to Reduce Sea-Shipping Emissions. **Massachusetts Institute of Technology**. 2019; 10(13). Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Caleb_Amy/publication/339933381_Pathways_and_Obstacles_to_Reduce_Sea-Shipping_Emissions/links/5e6cdfa492851c6ba7024f03/Pathways-and-Obstacles-to-Reduce-Sea-Shipping-Emissions.pdf>. Acessado em: 13 de outubro de 2020.

BARCELLOS, R. The hybrid propulsion system as an alternative for offshore vessels servicing and supporting remote oil field operations. **Proceedings of the annual offshore technology conference**, vol. 3; 2013. p. 1622–31. Disponível em: <https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-24467-MS>. Acessado em: 13 de outubro de 2020.

BARELLI, L. et al. Dynamic Modeling of a Hybrid Propulsion System for Tourist Boat. **Energies**, 2018, 11(10), 2592. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/10/2592/htm>. Acessado em: 15 de outubro de 2020.

CASTLES, G.; BENDRE, A. Economic benefits of hybrid drive propulsion for naval ships. **Proceedings of the 2009 IEEE electric ship technologies symposium**. Baltimore, Maryland, USA; 2009. p. 515–20. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Economic-benefits-of-hybrid-drive-propulsion-for-Castles-Reed/4e17acf4a2f08ced5de67d083845a84d202c8b38>. Acessado em: 14 de outubro de 2020.

GIAP, V.T. et. al. System simulation and energetic evaluation of hybrid propulsion system for crude oil tanker: **A hybrid of solid-oxide fuel cell and gas engine. Energy Conversion and Management**. 2020, Vol. 223, 113265. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890420308074>. Acessado em: 16 de outubro de 2020.

JAFARZADEH, S.; SCHIOBERG, I. **Operational profiles of ships in Norwegian waters: An activity-based approach to assess the benefits of hybrid and electric propulsion. Transportation Research Part D: Transport and Environment**. Volume 65, December 2018, Pages 500-523. Disponível em: <https://daneshyari.com/article/preview/11005451.pdf>. Acessado em: 15 de outubro de 2020.

KIM, Y. S.; LEE, Y. D.; AHN, K. Y. System integration and proof-of-concept test results of SOFC–engine hybrid power generation system**. Applied Energy**. 2020, Vol 277, 115542. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261920310540>. Acessado em: 13 de outubro de 2020.

LITWIN, W. et al. **Energy Efficient and Environmentally Friendly Hybrid Conversion of Inland Passenger Vessel.** Polish Maritime Research. 2017; 4(96), vol 24. Disponível em:

<https://content.sciendo.com/configurable/contentpage/journals$002fpomr$002f24$002f4$002farticle-p77.xml>. Acessado em: 15 de outubro de 2020.

LITWIN, W. et al. Experimental Research on the Energy Efficiency of a Parallel Hybrid Drive for an Inland Ship. **Energies**, 2019, 12, 1675. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/332819265_Experimental_Research_on_the_Energy_Efficiency_of_a_Parallel_Hybrid_Drive_for_an_Inland_Ship>. Acessado em: 14 de outubro de 2020.

MARTINS, E. M. O. **Curso de Direito Marítimo**. Vol. I. 4º Ed. Rio de Janeiro: Manole, 2013.

MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. **Ship resistance and propulsion:** practical estimation of ship propulsive power. New York: Cambridge University Press, 2011.

NGUYEN, H. P. et al. The electric propulsion system as a green solution for management strategy of CO2 emission in ocean shipping: A comprehensive review. **Eletrical Energy systems**. 2020; 12(8). Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2050-7038.12580>. Acessado em: 13 de outubro de 2020.

SOUZA, L. A. V. **Análise integrada do sistema propulsivo e do comportamento dinâmico de embarcações**. Monografia (Graduação Engenharia Naval e Oceânica). Rio de Janeiro: UFRJ, 2015. Disponível em: <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10014921.pdf>. Acessado em: 13 de outubro de 2020.

SULLIGOI, G. et al. Active front-end for shaft power generation and voltage control in FREMM frigates integrated power system: Modelling and validation. **Proceedings of the 21st international symposium on power electronics, electrical drives, automation and motion**. Sorrento, Italy; 2012. p. 452–7. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Active-front-end-for-shaft-power-generation-and-in-Sulligoi-Castellan/f91a34548810852c1b70dca440353bca0da2c0f4>. Acessado em: 15 de outubro de 2020.

ZAHEDI, B.; NORUM, L.E. Modeling and simulation of all-electric ships with low-voltage DC hybrid power systems. **IEEE Trans. Power Electron**. 2013. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6374689>. Acessado em: 14 de outubro de 2020.