

MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO PARA OFICIAL DE MÁQUINAS - APMA.1/2019

LUIZ FELIPE DOMINGOS FERREIRA

O USO DE ENERGIA EÓLICA COMO FONTE DE PROPULSÃO

RIO DE JANEIRO

2019

LUIZ FELIPE DOMINGOS FERREIRA

O USO DE ENERGIA EÓLICA COMO FONTE DE PROPULSÃO

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, como parte dos requisitos para obtenção do Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 Emendada.

Orientador: OSM Ramessés César da Silva Ramos

RIO DE JANEIRO

2019

LUIZ FELIPE DOMINGOS FERREIRA

O USO DE ENERGIA EÓLICA COMO FONTE DE PROPULSÃO

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, como parte dos requisitos para obtenção do Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 Emendada.

Data da Aprovação: ____ / ____ / ____

Orientador: (nome completo com titulação)

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

Assinatura do Aluno

Dedico este trabalho à minha mãe, minha maior parceira e pessoa que mais acredita em mim e me apoia, sem a qual nenhuma das vitórias obtidas ao longo da minha caminhada teriam sido possíveis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre guiar cada passo meu e por ter me apresentado com a minha família, meu maior bem. Agradeço aos meus familiares pelo apoio em cada momento durante esses quatro meses de curso, em especial minha mãe que acordou bem cedo todo santo dia para garantir que o filho dela estava saindo em segurança para suas aulas e rezando para que assim também retornasse para casa. Agradeço ao Coordenador de Manutenção e amigo, José Henriques, por acreditar no meu trabalho e por me auxiliar constantemente contribuindo para meu desenvolvimento pessoal e profissional. Agradeço aos Mestres e Professores pela dedicação e por estarem sempre compartilhando ensinamentos, que sem dúvida contribuíram para meu crescimento na profissão. E por fim agradeço aos meus amigos, que estão sempre comigo torcendo e vibrando pelo meu sucesso. A todos vocês, muito obrigado!

“Não sabendo que era impossível, ele foi lá e fez.”

(Jean Cocteau)

RESUMO

Com as determinações do Acordo de Paris realizado em abril de 2016, uma série de mudanças deverão ser feitas no setor naval a fim de que seja possível reduzir as emissões de gases poluentes pelos navios, a partir de 2020. Em função de tais mudanças, essa monografia tem por objetivo abordar os sistemas de propulsão que utilizam energia eólica como fonte, mesmo que parcial ou totalmente. O foco será dado nas tecnologias de rotores Flettner e Pipas de reboque, sistemas mais desenvolvidos até o momento, que não agridem ao meio ambiente e que já são utilizados por algumas embarcações. Serão mostradas as vantagens de suas aplicações a bordo a fim de que fique claro para os armadores, a razão de tal investimento valer a pena.

Palavras-chave: Acordo de Paris. Energia Eólica. Rotores Flettner. Pipas de Reboque.

ABSTRACT

With the Paris Agreement signed in April 2016, a series of changes will have to be made in the naval sector in order to reduce the emission of pollutants by ships from 2020 onwards. The objective of this monograph is to explore the propulsion systems that use wind energy as a source, partially or totally. The focus will be on the technologies of Flettner rotors and towing kites, systems more developed at this moment, that do not harm the environment and are already used by some vessels. The advantages of your applications on board will be shown in order to make it clear to shipowners, why such an investment is worth it.

Keywords: Paris Agreement. Wind Energy. Flettner Rotors. Towing Kites.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES/FIGURAS

Figura 1:	O efeito magnus	26
Figura 2:	Escuna Buckau	28
Figura 3:	Iate com rotor de Kiernan e Hastings	29
Figura 4:	Barbara	29
Figura 5:	Alcyone	31
Figura 6:	Tracker	32
Figura 7:	Testes do Greenwave em 2006	34
Figura 8:	Unikat da Universidade de Flensburg	35
Figura 9:	Cloudia	36
Figura 10:	E-ship 1	37
Figura 11:	Características dos rotores Flettner	39
Figura 12:	Partes essenciais dos rotores Flettner	40
Figura 13:	Painel de Controle dos rotores	41
Figura 14:	Gráfico coeficiente x razão de velocidade	42
Figura 15:	Vento e forças aparentes	43
Figura 16:	Ângulo de inclinação	47
Figura 17:	Força de Guinada dos rotores Flettner	49
Figura 18:	M/V Estraden	50
Figura 19:	M/S Viking Grace	51
Figura 20:	Maersk Pelican	52
Figura 21:	M/V Afros	52
Figura 22:	M/V BBC Skysails	59
Figura 23:	Painel de Controle no passadiço 1	61
Figura 24:	Painel de Controle no passadiço 2	61
Figura 25:	Lançamento da pipa 1	62
Figura 26:	Lançamento da pipa 2	62
Figura 27:	Voo 1	63
Figura 28:	Voo 2	63
Figura 29:	Recolhimento da pipa 1	64
Figura 30:	Recolhimento da pipa 2	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tracker - Resultados dos Testes

33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IMO	Organização Marítima Internacional
GEE	Gases de Efeito Estufa
SOLAS	Convenção de Salvaguarda da Vida Humana no Mar
MARPOL	Convenção Internacional para Prevenção de Poluição por Navios
COP21	21ª Conferência das Partes
UNFCCC	Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima
iNDC	Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
MEPC	Comitê de Proteção ao Meio Ambiente
MDO	Óleo Diesel Marítimo
HFO	Óleo Pesado
DWT	Porte Bruto
IWSA	Associação Internacional de Propulsão Eólica
VLCC	Very Large Crude Carrier
CVG	Centro Vertical de Gravidade
CLG	Centro Longitudinal de Gravidade
GNL	Gás Natural Liquefeito
SEEMP	Plano de Eficiência Energética do Navio

LISTA DE SÍMBOLOS

CO₂	Gás carbônico
SO_x	Óxidos de enxofre
NO_x	Óxidos de nitrogênio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	ACORDO DE PARIS	17
2.1	O que muda com o Acordo de Paris	18
2.2	Metas do Brasil	18
2.3	Impactos ambientais gerado pelos navios	19
2.4	Adequação do Acordo de Paris a navios	20
2.5	Papel da IMO na prevenção da poluição do ar	21
3	ENERGIA EÓLICA	22
3.1	Desenvolvimento da navegação da energia eólica até os combustíveis fósseis	23
3.2	Barreiras do mercado	25
4	ROTORES FLETTNER	26
4.1	Desenvolvimento dos rotores	26
4.2	Tipos de embarcações aptas a receber os rotores	38
4.3	Design do rotor em embarcações	39
4.4	Informações aerodinâmicas, o vento e as forças	41
4.5	Vantagens	43
4.5.1	Significante economia de combustível	43
4.5.2	Simplicidade de instalação	44
4.5.3	Confiabilidade em alto mar	45
4.5.4	Operabilidade do passadiço	45
4.5.5	Segurança	46
4.5.6	Baixo custo de manutenção e nenhum tripulante adicional necessário	46
4.5.7	Sem interferências na operação normal da embarcação	46
4.6	Desvantagens	46
4.6.1	Aumento do momento de adernamento das forças laterais	47
4.6.2	Propulsão depende das condições de vento	48
4.6.3	Arrasto extra do leme devido ao aumento de guinada	48
4.6.4	Vibrações forçadas	49
4.7	Embarcações de grande porte que utilizam rotores Flettner	50

5	PIPA REBOQUE COMO PROPULSÃO	53
5.1	Informações em tempo real sobre o desempenho do navio	54
5.2	Benefícios	55
5.3	Reederei Wessels	56
5.4	Uso dos dados monitorados	57
5.5	BBC Chartering	59
5.6	Princípio de funcionamento	60
5.6.1	Lançamento	61
5.6.2	Voo	62
5.6.3	Recolhimento	63
5.7	Material das pipas	64
6	Conclusão	65
	REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

As emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE), caso continuem a crescer ininterruptamente, podem aumentar ainda mais as temperaturas globais, com graves implicações para as pessoas e os ecossistemas. Sob o Acordo de Paris, as partes precisam implementar medidas de mitigação de emissões, para limitar o aumento da temperatura global a menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais. As emissões de CO₂ da navegação marítima internacional representam cerca de 2% das emissões globais de CO₂; só que, considerando o desenvolvimento do transporte marítimo nos últimos anos e as previsões para os próximos, há grandes chances de aumentar de 50 a 250% até 2050, caso nenhuma mitigação seja feita, e atingir de 10 a 25% das emissões globais à medida que outros setores se descarbonizam para atender ao Acordo de Paris.

Em função dessas previsões, é primordial que o transporte marítimo se reoriente para uma trajetória de baixa emissão de carbono para a mitigação das mudanças climáticas. As projeções para 2050 mostram que a redução de emissão de CO₂ e outros gases nocivos podem ser possíveis, com as políticas atuais, na faixa de 35-40%, porém espera-se que as emissões líquidas continuem a aumentar mesmo sob essa hipótese de cenário relativamente otimista.

Políticas adicionais são necessárias para encorajar a difusão de inovações de eficiência energética com boa relação custo-benefício na navegação e impulsionar a descarbonização, em linha com a meta de 2°C do Acordo de Paris. As inovações incluem tecnologias de propulsão de navios eólicos, como rotores Flettner, pipas e velas, que podem complementar as tecnologias convencionais já existentes. Propõe-se que 10-60% das reduções de emissões sejam possíveis, dependendo da velocidade operacional, da tecnologia e das condições de vento das embarcações.

Após, então, uma pausa de quase 100 anos, o vento, uma forma de energia natural inesgotável, mas imprevisível, volta a chamar a atenção dos projetistas de navios novamente como uma fonte potencial de energia auxiliar. A propulsão assistida por vento é permitida pelos regulamentos internacionais existentes, incluindo a convenção de Salvaguarda da vida Humana no Mar (SOLAS). Logo é esperado que esse tipo de fonte de energia seja cada vez mais explorado nos próximos anos.

E esse é o principal objetivo principal desta monografia, de desmistificar a energia eólica nos dias atuais mostrando-a como opção de investimento para os armadores, explorando as duas

técnicas mais desenvolvidas até o momento e já aplicadas a bordo, que são os rotores Flettner e os navios pipa.

O capítulo 2 desta monografia abordará o Acordo de Paris quem entra em vigor a partir de 2020, apresentando as mudanças que ocorrerão com o Acordo, bem como as metas do Brasil para os próximos anos a fim de atingir os 2% de emissões desejados. Será mencionado também a adaptação das embarcações para se ajustarem ao Acordo, e o primordial papel da Organização Marítima Internacional (IMO) na luta pela proteção do meio ambiente.

O capítulo 3 por sua vez, desenvolverá o conceito de energia eólica apresentando as principais opções do setor bem como seu crescimento nos últimos anos. Será mostrado o desenvolvimento da navegação desde os barcos a vela até os dias atuais, e serão expostas as barreiras enfrentadas que ainda dificultam o desenvolvimento de fontes de energia limpa a bordo de embarcações.

O capítulo 4 explicará o funcionamento dos rotores Flettner a bordo de embarcações, principal método de energia eólica utilizado, mostrando o desenvolvimento histórico dessa tecnologia ao longo dos anos. O conceito físico será descrito, e as vantagens e desvantagens de sua utilização serão apontadas mostrando ao armador a razão pela qual ele deve investir nesse sistema.

O capítulo 5 por sua vez, trará o conceito das pipas de reboque, desenvolvido pela empresa Skysails, já utilizadas em algumas embarcações mostrando os benefícios do uso, o princípio de operação além de explicar como funciona o Skysails Performance Monitor, peça importante no que diz respeito ao controle das variáveis de uma embarcação visando o melhor consumo de combustível.

Por fim, será feita uma conclusão no capítulo 6, onde ficará objetivado a razão de investir em tal tecnologia, não apenas pelo fato de respeitar o meio ambiente, mas também por proporcionar ao armador um menor gasto com combustível, maior parcela dos gastos de operação.

2 O ACORDO DE PARIS

Durante a 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), em Paris, foi adotado um novo acordo com o objetivo central de tornar mais forte a resposta global à ameaça da mudança do clima e de reforçar a capacidade dos países para lidar com os impactos decorrentes dessas mudanças.

O Acordo de Paris foi aprovado pelos 195 países membros da UNFCCC a fim de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no contexto do desenvolvimento sustentável e entrará em vigor a partir de 2020. O compromisso principal ocorre no sentido de manter o aumento da temperatura média global em bem menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais e de envidar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais.

Para vigorar e receber caráter de lei doméstica, esse acordo necessitou de ratificação de pelo menos 55 de seus países membros responsáveis por 55% das emissões de GEE. As assinaturas oficiais se iniciaram em abril de 2016 e se encerraram em abril de 2017 e esse intervalo, mais de 175 dos quase 200 países membros, assinaram o Acordo e ratificaram o mesmo em seus respectivos governos criando individualmente os seus compromissos para buscar essa redução de emissões de GEE para 2025 ou 2030.

Os governos se envolveram individualmente na construção de seus próprios compromissos, a partir das Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas (iNDC). Por meio das iNDCs, cada nação apresentou sua contribuição de redução de emissões dos gases de efeito estufa, seguindo o que considera viável a partir do cenário social e econômico local.

Países como China (incluindo Hong Kong e Macau), Índia, Japão, Alemanha, Brasil, Canadá, Coreia do Sul e México, que estão entre os maiores poluidores do mundo, são exemplos de países que já assinaram e ratificaram bem como já apresentaram às Nações Unidas as suas propostas nos próximos anos para atingir as metas pré-estabelecidas.

No entanto, os EUA, segundo maior poluidor do mundo, responsáveis por 17,9% das emissões no globo, infelizmente, acabaram recuando e hoje não mais abraçam o combinado na COP21. Junto com a Síria, são os únicos países hoje, que não fazem parte do Acordo de Paris.

Até mesmo a Nicarágua que se negou a assinar o Acordo em 2016 por achar que não era suficiente para evitar uma catástrofe global no futuro, acabou mudando de ideia e hoje também é membro participante. O país declarou que este Acordo é o único instrumento que temos no mundo hoje que permite a união das intenções e esforços de cada nação a fim de

tentar enfrentar as mudanças climáticas e desastres ambientais, cada vez mais frequentes ao redor do globo.

2.1 O que muda com o Acordo de Paris

O acordo inclui uma diversidade imensa de países: há ricos e pobres; muito ricos e muito pobres; países cujas economias dependem predominantemente da exploração do petróleo ou da queima do carvão; e, dentre os pobres, há ainda aqueles que estão à beira da extinção em virtude dos efeitos nefastos do aquecimento global, como as nações insulares do Pacífico, que já perdem território por causa do crescente aumento do nível dos oceanos.

Para cortar as emissões de um país em mais de um quarto, como determina o acordo, o governante de cada nação precisa estimular a substituição dos combustíveis fósseis por alternativas limpas. Tais estímulos consistem basicamente em subsídios para quem produz energia solar, eólica, hidrelétrica entre outras opções de energia renovável. Quem produzir energia limpa pagará menos imposto; e quem produzir suja, pagará mais. Em última instância, trata-se de canalizar dinheiro público para cortar as emissões de CO₂.

Só que essa substituição dos combustíveis fósseis demanda um investimento de capital que faz com que países pobres e em desenvolvimento tenham grande dificuldade de atingir os propósitos do Acordo, uma vez que as economias de seus governos levam tais nações a procurarem financiadores para seus projetos, nem sempre fáceis de encontrar.

Como solução para esta situação, foi determinado também pelo Acordo que os países desenvolvidos deverão investir 100 bilhões de dólares por ano em medidas de combate à mudança do clima e adaptação, em países em desenvolvimento, justamente para que todas as nações participantes tenham chances de iniciar os compromissos estabelecidos perante às Nações Unidas.

Além disso, houve uma preocupação da UNFCCC em formalizar o processo de desenvolvimento de contribuições nacionais, além de oferecer requisitos obrigatórios para avaliar e revisar o progresso das mesmas. Esse mecanismo exige que os países atualizem continuamente seus compromissos, permitindo que ampliem suas ambições e aumentem as metas de redução de emissões, evitando qualquer retrocesso.

2.2 Metas do Brasil

Após a aprovação pelo Congresso Nacional, o Brasil concluiu, em 12 de setembro de 2016, o processo de ratificação do Acordo de Paris. No dia 21 de setembro, o instrumento foi

entregue às Nações Unidas. Com isso, as metas brasileiras deixaram de ser pretendidas e tornaram-se compromissos oficiais chamadas de Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC).

A NDC do Brasil comprometeu-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030. Para isso, o país se comprometeu a aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas, bem como alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030.

A NDC do Brasil corresponde a uma redução estimada em 66% em termos de emissões de gases efeito de estufa por unidade do PIB (intensidade de emissões) em 2025 e em 75% em termos de intensidade de emissões em 2030, ambas em relação a 2005. O Brasil, portanto, reduzirá emissões de gases de efeito estufa no contexto de um aumento contínuo da população e do PIB, bem como da renda per capita, o que confere certa ambição a essas metas.

2.3 Impactos ambientais gerados pelos navios

O setor naval é responsável por 2% de toda a emissão de carbono mundial. Considerando a frota mundial, calculada em aproximadamente 100 mil navios, essa poluição proveniente dos gases de descarga da queima de combustíveis para geração de energia e propulsão polui tanto quanto a frota automobilística mundial, calculada em um bilhão de unidades. Além disso, considerando o aumento do setor do turismo naval que é o que mais cresce no mundo, e que a frota cargueira é responsável por mais de 80% do comércio mundial de mercadorias, esses números só tendem a aumentar.

Um navio de cruzeiro, por exemplo, emite tanto CO₂ como 83.678 carros; tantos óxidos de azoto como 421.153 automóveis; tantas partículas como um milhão de veículos; e tanto dióxido de enxofre como 376 milhões de carros. O motivo de tamanha disparidade entre apenas um navio, e tamanha quantidade de automóveis deve-se ao fato de grandes navios queimarem óleo pesado, combustível que não é muito refinado, tem alto teor de enxofre e, portanto, produz grandes quantidades de óxido de enxofre e compostos de óxido de azoto quando queimado.

2.4 Adequação do Acordo de Paris a navios

A UNFCCC não conseguiu, durante a elaboração do Acordo de Paris, alocar as emissões provenientes de embarcações marítimas entre os países.

Isso se deve ao fato de haver uma complexidade grande no setor pois um navio pode mudar de bandeira facilmente. Países de uma nacionalidade podem também fretar navios de outras bandeiras para transportarem suas mercadorias de importação e exportação e assim criou-se o impasse de qual seria o país responsável pela emissão: proprietário da embarcação, exportador ou importador.

Foi então, que para haver a adequação do Acordo de Paris aos navios, a Organização Marítima Internacional (IMO), agência especializada das Nações Unidas responsável pela segurança e proteção dos navios e pela prevenção da poluição marinha, reuniu os seus 173 países membros e três associados a fim de se determinar as metas para reduzir as emissões também no setor naval.

Após 10 dias de debates, ficou estabelecida a meta de reduzir as emissões do setor em pelo menos 50% até 2050, em relação aos níveis de 2008, período de maior emissão do setor. O acordo vale para todo o transporte de carga e de pessoas com tonelagem maior que cinco mil, salvo embarcações pertencentes às forças armadas.

A proposta inicial foi de zerar as emissões até 2050. Alguns países ameaçados pelo aumento do nível das águas e prejudicados pelas mudanças climáticas e catástrofes provenientes do aquecimento global, como Ilhas Marshall, Tuvalu, Fiji, Kiribati e Vanuatu votaram pela descarbonização total no prazo estabelecido. Países desenvolvidos como Noruega também propuseram o mesmo buscando assim, a emissão zero de GEE.

No entanto, alguns países em desenvolvimento como o Brasil e Panamá solicitaram um maior tempo de adequação. Tais países, com economias dependentes da exportação de commodities (matérias primas e alimentos), alegaram estar em posição desfavorecida, uma vez que sua grande maioria está longe dos principais centros de consumo e de produção, bem como alegaram que os países europeus e outros desenvolvidos, tem a tecnologia e o capital em seu favor. Além disso, eles tinham o receio de que o investimento necessário para alcançar emissão zero até a data acordada, prejudicasse suas exportações e, conseqüentemente, suas economias, uma vez que essas mudanças podem levar a aumentos no custo do frete marítimo, e isso traria impactos negativos desproporcionais para estes países em desenvolvimento ou localizados geograficamente distantes dos seus mercados.

Considerando então os argumentos apresentados, ficou acordado inicialmente reduzir as emissões em pelo menos 50% até 2050 e expandir a meta de redução para 100% até meados do século, alinhada às determinações do Acordo de Paris.

2.5 Papel da IMO na prevenção da poluição pelo ar

A IMO já demonstra preocupação com a poluição por ar desde 1997, quando incorporou à Convenção Internacional para Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL), o anexo VI, cujo propósito é justamente prevenir a poluição do ar por meio da limitação de óxidos de enxofre (SOx) e nitrogênio (NOx) bem como a proibição de emissões deliberadas de substâncias que prejudicam a camada de ozônio contribuindo para o aumento do efeito estufa. Esse anexo entrou em vigor em 2005, e desde então já sofreu diversas alterações durante novas reuniões feitas, uma vez que o objetivo é reduzir cada vez mais os valores de emissões provenientes de navios.

Por meio da última reunião do Comitê de Proteção ao Meio Ambiente Marinho (MEPC) anterior ao acordo de Paris, uma resolução foi adotada para reduzir as emissões em 30% até 2025. Com a regra, os navios tiveram que buscar meios de adaptar suas embarcações aos padrões de óxidos de enxofre (SOx) e óxido de nitrogênio (NOx) tolerados, o que levou a busca de melhorias das embarcações buscando métodos de eficiência energética para atender as porcentagens máximas permitidas.

Houve uma melhoria na hidrodinâmica dos cascos, no desempenho dos motores e dos propulsores, bem como a utilização de combustíveis menos poluentes e com melhor rendimento. Tornou-se fundamental um melhor gerenciamento da velocidade do navio em sua rota, tudo visando a redução do consumo de combustível e, conseqüentemente, a emissão de gás carbônico (CO₂) e outros gases danosos.

Só que a partir de 2020, esse percentual reduz ainda mais para apenas 0,5% com grandes chances de chegar a 0% até meados do século. Com isso, os combustíveis fósseis tendem a deixar de ser uma opção, mesmo que haja pressão por partes dos países, e fontes de energia limpa tendem a tornar-se cada vez mais comuns para os sistemas de propulsão.

Dentre as fontes de energia limpa ou renovável de maior destaque temos: a energia eólica, a energia solar, biocombustíveis e o hidrogênio.

3 ENERGIA EÓLICA

A energia eólica consiste do processo pelo qual o vento é transformado em energia cinética e a partir dela em energia útil, podendo ser utilizada para produzir energia mecânica, elétrica ou até mesmo como forma de propulsão para navios.

A energia eólica aparece como uma excelente alternativa para a substituição dos combustíveis fósseis, uma vez que é uma fonte de energia limpa e renovável, e está permanentemente disponível podendo se produzido em qualquer local.

Embora o seu uso como forma de propulsão hoje em dia ainda não seja tão difundido, com exceção dos barcos à vela; a energia eólica já é bastante utilizada por diversos países para geração de energia elétrica através dos parques eólicos, que consistem de centenas de aerogeradores individuais interligados a uma rede de transmissão de energia elétrica.

Países como China, Estados Unidos, Alemanha, Índia, Espanha, Reino Unido, França e Brasil estão entre os maiores produtores de energia eólica do mundo, sendo que para alguns desses países, a energia proveniente do vento já representa uma significativa parcela da demanda total de energia elétrica de seu país.

A capacidade mundial acumulada de energia eólica no mundo ainda é pequena, mas está em constante crescimento desde 2001. O custo de geração decaiu rapidamente nos últimos anos, custando menos que um quinto do que custava no final da década de 90 e, à medida que novas tecnologias de produção vão sendo feitas, esses custos tendem a cair ainda mais. Somado a isso, tem o fato de a energia eólica exigir baixos custos de manutenção quando comparada com outras fontes, o que torna esse investimento em energia limpa ainda mais vantajoso.

No campo de geração de energia, quando direcionado para o alto-mar, a energia eólica tem avançando com força nos últimos dois anos. Estudos mostram que a indústria eólica global instalou 3,3 Gigawatts (GW) de capacidade offshore em 2017, elevando o total para quase 17 GW no acumulado. E nos próximos cinco anos, o mercado deve instalar mais de 24 GW de nova capacidade, atingindo no total mais de 40 GW até o final de 2022.

No campo de propulsão, o avanço da energia eólica tem sido lento, porém já é uma realidade. Com o Acordo de Paris entrando em vigor a partir de 2020, com chances de chegar a emissões zero de GEE até meados do século, essa fonte deve se tornar cada vez mais presente a bordo de embarcações justamente pelo fato de usar o vento, fonte limpa de energia, como forma de propulsão atendendo as exigências mundiais e reduzindo custos de

navegação. Ao longo dos últimos anos, diversas formas de propulsão utilizando energia eólica tem sido criadas e desenvolvidas, e algumas embarcações já fazem uso dessa nova energia para propulsão mesmo que parcialmente, chamados de navios híbridos.

3.1 Desenvolvimento da Navegação da energia eólica até os combustíveis fósseis

O vento como fonte de energia para a propulsão tem sido discutido regularmente no contexto de soluções de energia renovável para aplicações marítimas. O setor foi, obviamente, movido primeiramente com a energia eólica durante séculos, embora com baixo volume de carga e alta necessidade de mão-de-obra.

Até quase o início do século XX, foram os navios a vela, conhecidos como “Clippers”, que dominaram o comércio marítimo. As embarcações em geral, raramente ultrapassavam 200 toneladas de capacidade de carga, mas em contrapartida, possuíam velocidade bem superior as das embarcações da época. O bom desempenho com rápido deslocamento era resultado da grande área vélica, sustentada por mastros, impulsionando um casco alongado acima da água, com nítido avanço do corpo a proa e uma maior amplitude a ré. Sua alta velocidade, fez com que fosse usado preferencialmente no transporte de passageiros e cargas valiosas como o chá e o ópio, sacrificando o volume de carga para aumentar a velocidade.

O forte consumo de chá na Inglaterra e toda a Grã-Bretanha fez que o transporte de chá, desde a Índia, utilizasse uma importante e considerável frota desses navios. Assim como chás, drogas também foram transportadas por essas embarcações, justamente pela velocidade de comunicação entre China e Europa. A alta velocidade dos Clippers foi até mesmo utilizada no transporte de passageiros para a Corrida do Ouro da Califórnia e a emigração para a Austrália e Nova Zelândia.

Mesmo com algumas embarcações já existentes utilizando propulsão a vapor, os navios Clippers se mostravam mais eficientes e eram maioria. Só que essa supremacia durou até a abertura do Canal de Suez em 1869, que possibilitou uma comunicação mais rápida entre ocidente e oriente, fazendo assim com que os navios a vapor dominassem a rota do chá, e os clippers por sua vez, entraram em decadência.

No início do século XX, com o aumento do número de embarcações, a criação de navios com casco e superestrutura totalmente metálicos e a hélice, o motor a vapor se firmou como principal meio de propulsão naval. Foi através do vapor, que houve a conversão da frota global para energia fóssil, visto que o vapor é proveniente da queima do carvão.

Com a invenção dos motores de combustão interna, houve então, a progressiva extinção de embarcações movidas a vapor, devido à sua substituição por motores diesel. Os motores diesel possuem maior rendimento, e exigem uma menor quantidade de combustível necessária em peso e volume se comparado ao carvão, aumentando a capacidade de carga das embarcações e por essas razões, tornando-se bem mais vantajosos.

Houve o desenvolvimento de tecnologias baseadas em óleo, em particular o uso de Óleo Diesel Marinho (MDO) e Óleo Combustível Pesado (HFO) fazendo com que o petróleo seja hoje a principal fonte de energia monopolista para o setor naval em todas as escalas de navegação; com exceção da propulsão nuclear, mais utilizada em aplicação militar.

Só que essa queima desenfreada fez com que a emissão de CO₂ e GEE para a atmosfera se tornasse cada vez maior, o que contribuiu para danos e alterações dos ecossistemas do planeta, bem como da camada de ozônio. Preservação do meio ambiente, que não era uma preocupação no passado, passou a ser, assumindo caráter de lei a ser seguidos por todos os países. Logo a tendência é que o seguimento do combustível fóssil seja para fontes de energia limpa, em vista das exigências feitas pelos Acordos como o de Paris, Rio +20 entre outros. E dentre essas fontes de energia limpa, temos a energia eólica que, quando aplicada ao transporte marítimo atualmente caem principalmente em quatro categorias: velas macias, velas de asa fixa, velas de pipa e tecnologia de rotor Flettner. O último mencionado é considerado nesta monografia sob o rótulo genérico de rotores Flettner.

A inovação está ocorrendo em algum ritmo em cada uma dessas categorias. Por exemplo, o projeto B9 Shipping de 3.000 DWT e o 7.000 DWT Ecoliner usam a vela flexível “DynaRig” e passaram por testes extensivos de tanques e túneis. A Universidade de Tóquio está propondo velas de asa fixa em cargueiros de 50.000 toneladas e; a “Solar Sailor” na Austrália tem prova de conceito para modelos de balsas portuárias operando comercialmente em portos de Sydney, Hong Kong e Xangai usando velas de asa fixa combinadas com painéis fotovoltaicos. As velas de pipa, promovidas principalmente pela SkySails, oferecem uma forte promessa de economia de combustível do reboque nos ventos seguintes, embora ainda não são suficientes para justificar a implantação sem o aumento dos preços dos combustíveis. A Enercon, fabricante e inovadora alemã de turbinas eólicas, lançou o E-Ship-1 em 2010, que combina rotores Flettner com cascos aperfeiçoados e sistemas de recuperação de calor economizando comprovados 25% de combustível.

3.2 Barreiras de mercado

Embora a tecnologia para energia eólica esteja lentamente começando a estabelecer uma presença no mercado, uma série de barreiras práticas e ideológicas ainda precisam ser superadas. Tais barreiras restringem a difusão de todas as tecnologias alternativas no transporte apesar do seu grande potencial.

Talvez o maior desafio identificado em toda a linha seja a percepção interna. No passado, a indústria naval se mostrava bastante conservadora quando se tratava de novas tecnologias; ela não necessariamente queria ser vista como pioneira em alguma coisa. E infelizmente, isso é algo que perdura até os dias de hoje. Para dificultar, os armadores em geral não têm acesso às informações relevantes e por essa razão, não conseguem comparar as diferentes tecnologias.

Além disso, a natureza das tecnologias alternativas favorece os contratos de fretamento de curto prazo, que são propensos a incentivos divididos (“split incentives”). Nesse mercado, os incentivos são divididos entre fretadores de navios que cobrem seus custos de combustível e armadores que cobrem os custos operacionais, de capital e de investimento em tecnologias de eficiência energética. Incentivos dos armadores para investir em medidas de eficiência energética e reduzir os custos de combustível para os afretadores são baixos, porque sua economia potencial de taxas de afretamento mais altas é limitada.

Portanto, políticas para remover tais barreiras de implementação de fontes limpas de propulsão são necessárias tais como a precificação de carbono, cobrando pela quantidade de CO₂ emitida com a queima de combustíveis das embarcações; e projetos de demonstração que publicam resultados no domínio público são extremamente necessárias.

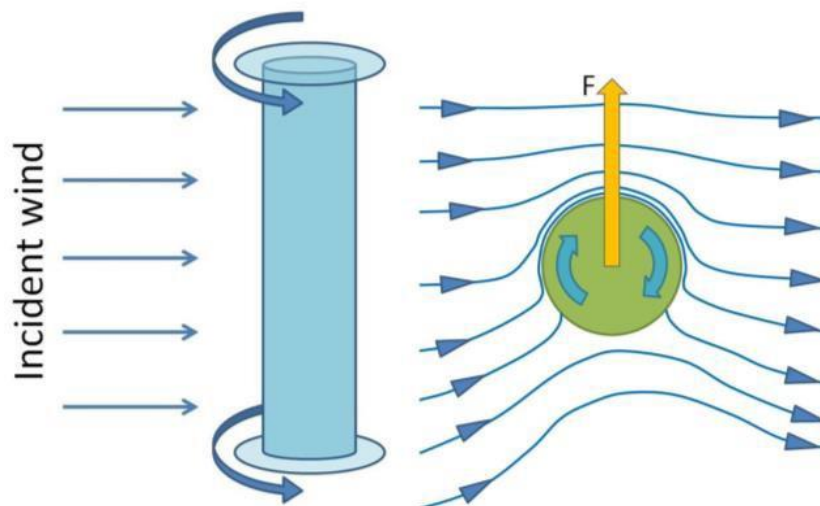
A Associação de Propulsão Eólica Internacional (IWSA) está em processo de trabalho com arquitetos navais, engenheiros, classe e reguladores para suavizar algumas dessas barreiras. Eles também estão ajudando seus membros a arriscar qualquer investimento em tecnologias de propulsão eólica, apoiando-os com pacotes de financiamento, conversando com bancos e com os armadores.

Alguns projetos já estão em andamento, com projetos em fase de conclusão, o que significa que mais navios equipados com tecnologias de propulsão eólica entrarão nos mares nos próximos anos. Sendo uma solução confiável e cada vez mais viável, alguns armadores já tem procurado auxílio nesse propósito fazendo com que certas barreiras tenham sido vencidas.

4 ROTORES FLETTNER

Os rotores de Flettner exploram uma força conhecida como o Efeito Magnus, em homenagem ao físico Heinrich Gustav Magnus, que, em 1851, descreveu uma força até então indefinida que surge quando o ar flui sobre um corpo em rotação. O efeito é bem conhecido em muitos esportes nos quais bolas com um movimento rotativo aplicado seguem uma trajetória curva enquanto passam pelo ar, como beisebol ou tênis de mesa; ou ainda na artilharia quando há o desvio de um projétil em rotação ao ser atingido por um vento cruzado. Mas a bordo de embarcações, ele ainda é desconhecido pela grande maioria atualmente e sua aplicação está ainda em caráter mais experimental, mesmo com seu conceito já sendo utilizado em embarcações desde o início do século passado.

Figura 1: O efeito magnus



Fonte: The Royal Institution of Naval Architects

4.1 Desenvolvimento dos Rotores Flettner

Em 1922, Anton Flettner patenteou pela primeira vez o rotor Flettner, que aproveitou o efeito Magnus usando um cilindro montado no convés, girando verticalmente para fornecer energia propulsora. Flettner era um professor de matemática treinado e engenheiro autodidata que surgiu com sua ideia de um rotor para alimentação de uma embarcação, depois de ouvir sobre a pesquisa do professor Ludwig Prandtl, diretor de Instituto de Pesquisa Aerodinâmica. "Carvão azul" é como Flettner descreveu o combustível eólico que ele utilizou e notou que bilhões de cavalos de potência estavam disponíveis a preços baixos visto que a fonte combustível é o vento. Ele era um inventor prolífico que também patenteou o sistema de direção "trim-tab", dispositivo que movimenta o timão e altera o rumo a ser seguido, e

que ainda hoje é amplamente usado tanto por aviões quanto por navios; e o ventilador sem motor usado globalmente em veículos, caravanas e motor-homes. Flettner também é reconhecido como um dos pais do helicóptero moderno e foi o grande responsável pelos avanços alemães nesse campo durante a Segunda Guerra Mundial e nos Estados Unidos pós-guerra.

A física do Efeito Magnus aplicada por Flettner é bem compreendida. Em essência, a invenção de Flettner é simplesmente a aplicação do princípio científico de que um cilindro girando ao vento exerce uma força perpendicular ao vento. No lado do cilindro que se move contra o vento, o ar se acumula e exerce pressão. O cilindro deve ter energia externa aplicada para fornecer rotação inicial, geralmente em baixas rotações de 100-400 rpm. Em seu modelo patentado inicial, isso foi fornecido pelo uso de um motor de um relógio. Uma vez estabelecido o movimento inicial, a potência aproveitada é relativa à força do vento aplicada, mas resulta em um aumento muitas vezes maior na potência propulsora.

Apesar de alguma confusão resultante do trabalho do físico Thom em 1934, que postulou que encaixar “fences”, discos horizontais no cilindro, aumentava significativamente a velocidade de revolução em até um fator de quatro, podendo assim, produzir uma sustentação (LIFT) vertical aumentada e um poder de propulsão maior para vante. A teoria por trás da invenção de Flettner é bem caracterizada e aceita na literatura.

Em 1924, sob a direção de Flettner, o Estaleiro Germania adaptou a escuna de 2000 toneladas Buckau com dois rotores de 15m de altura e 3m de diâmetro acionados por um sistema elétrico de 37kW para impulsionar sua primeira viagem em 1925 pelo Mar do Norte. Os dois motores que giravam as torres à velocidade de 120 rpm exigiam o equivalente a 20 cavalos de potência e Flettner calculou que eles tiravam cerca de 1000 cavalos do vento. Ela superou a antiga plataforma em todas as condições, alcançando mais de 8 nós de velocidade em comparação com 6,5 nós sob vela. Os rotores não davam nenhuma preocupação mesmo com o tempo mais tempestuoso, e o navio a rotor podia navegar ao vento a 20-30 graus, enquanto o equipamento original não podia se aproximar mais que 45 graus. O peso total do mecanismo completo - torres, motor e motores - era apenas um quinto do peso das velas descartadas e do aparelhamento no mesmo navio. Invertendo a direção de rotação, foi possível mover o navio para ré e, combinando os dois rotores, o navio podia ser parado e girado dentro de seu próprio centro.

Figura 2: Escuna Buckau



Fonte: <http://www.sdtb.de/Flettner-Rotor.1623.0.html>

Primeiras filmagens mostram-na no mar e movendo-se a certa velocidade no rio Humber, na Inglaterra, inteiramente impulsionada por seus rotores. Os primeiros relatos de testemunhas mostram graficamente o impacto desse novo tipo de propulsão:

“A escuna Buckau, lançou recentemente para o mar, um navio sem velas ou vapor. Como um navio fantasma, ele se movia misteriosamente pela água sem meios aparentes de propulsão. Os espantados espectadores em terra sabiam que o barco era uma velha embarcação de aço de 2000 toneladas e que anteriormente eram necessários 500 metros quadrados de lona para impulsioná-la. ... Dois cilindros estranhos, semelhantes a gigantescas chaminés de fumaça, ergueram-se de seu convés. Mas nenhuma fumaça estava saindo deles e nenhum barulho de motor era ouvido. Não houve agitação de parafusos. No entanto, o navio abriu caminho pelas águas agitadas do Báltico, quase o dobro da sua velocidade anterior. (Seybold, 1925, p. 36)”

Em 1926, renomeada Baden Baden, ela navegou para Nova York pela América do Sul. A viagem de 6.200 milhas náuticas através do Atlântico usou apenas 12 toneladas de óleo combustível, em comparação com 45 toneladas para um navio a motor do mesmo tamanho sem rotores.

Uma assinatura interessante da tecnologia é que os rotores encostam no vento, não a sotavento como em um veleiro convencional. Isso fornece, talvez, o recurso mais exclusivo do rotor Flettner, sua característica inerente de limitação de carga, que pode resultar em um sistema de vela praticamente à prova de tempestade. À medida que a força do vento aumenta, a embarcação quer inclinar-se para o clima, enquanto uma embarcação de vela convencional está sendo empurrada mais adiante pela força crescente do vento até um ponto final de emborcamento, se continuar navegando. Na sua travessia inicial do Mar da Irlanda, Flettner notou que a força total da vela exercida pelo vento nos cilindros de fiação não

aumentava à medida que a velocidade do vento aumentava de 35 para 80 mph. O navio de Flettner foi capaz de navegar através de tempestades que navios convencionais tinham que andar com "pólos nus".

Figura 3: late com rotor de Kiernan e Hastings



Fonte: <http://www.see.ed.ac.uk/~shs/Climate%20change/Flettner%20ship/1926%20account.html>

Alguns pioneiros seguiram o exemplo de Flettner. Os oficiais da Guarda Costeira dos EUA, Kiernan e Hastings, eram estudantes de arquitetura naval no Instituto de Tecnologia de Massachusetts. Eles adquiriram um navio cúter abandonado de 10 m e construíram um rotor em cima dele com materiais descartados. Alimentado por um motor de 5 cavalos de potência, eles correram contra um iate de corrida convencional em um curso triangular e o iate de Kiernan e Hastings venceu. Em 1926, a Marinha Alemã encomendou a segunda embarcação de rotor de Flettner, a Barbara de 3.000 toneladas. Os dois protótipos provaram que a tecnologia funcionava de forma confiável, e a Barbara serviu como um cargueiro normal no Mediterrâneo entre 1926 e 1929.

Figura 4: Barbara



Fonte: <http://www.sdtb.de/Flettner-Rotor.1623.0.html>

De volta à América, em 1928, Flettner havia conseguido ordens para seis novos navios da classe Barbara. No entanto, dois eventos conspiraram para derrotá-lo. Em 1929, a economia global entrou em colapso, causando a inadimplência de seus clientes (assim como a maioria das novas construções de navios nesse período). Neste período, também o óleo diesel marítimo (MDO) e a tecnologia de motores de combustão interna relacionada para usá-lo tornaram-se disponíveis de maneira fácil e barata. Tal como acontece com muitas outras tecnologias e inovações de transporte de energia renovável, as abordagens baseadas no petróleo deslocaram totalmente e dominaram qualquer outra iniciativa de propulsão de navios. A história do navio rotor chegou a um fim até então, e Flettner se virou para inventar o helicóptero moderno.

Quando os preços dos combustíveis subiram consideravelmente depois da crise do petróleo de 1973, as companhias de navegação começaram a buscar eficiência e as idéias de Flettner passaram a ser consideradas novamente, quase meio século depois. A ideia de Flettner foi mais uma vez descartada e os construtores navais de Hamburgo, Blohm & Voss, elaboraram planos para instalar rotores em um navio-tanque químico. Mas a ideia foi abandonada em 1986, quando o preço do petróleo caiu novamente.

Em 1980, o oceanógrafo francês Jacques Cousteau sonhava em criar um navio com um motor moderno que fosse movido, pelo menos em parte, pelo vento. Ele olhou inicialmente para um rotor de Flettner antes de chegar a um novo design, o Turbosail trabalhando com associados, Malavard e Charrier. O Turbosail utiliza um obturador móvel e um sistema de aspiração por ventilador em um cilindro não rotativo. Modelos de pequena escala testados em um túnel de vento tiveram bom desempenho e a invenção foi experimentada pela primeira vez em um catamarã batizado de Moulin à Vent, em uma rota que ia de Tânger a Nova York. A travessia estava quase completa quando eles foram atingidos por ventos de mais de 50 nós. A solda que segurava o Turbosail no lugar cedeu e o protótipo acabou afundando no mar.

Figura 5: Alcyone



Fonte: <http://escales.wordpress.com/2009/02/24/!%E2%80%99%99%C2%AB-alcyone-%C2%BB-de-cousteau-en-escale-a-caen/>

Esta experiência foi aplicada ao projeto de uma nova embarcação de pesquisa, a Alcyone, com um inovador casco de alumínio, uma popa tipo catamarã e dois turbos para complementar dois motores a diesel convencionais. Economias de 20-60% foram obtidas, embora possa ter sido consideravelmente menor. O Turbosail não é tecnicamente um rotor e não usa o efeito Magnus. É uma turbina Savonius, cuja eficiência máxima é de 13%. Também neste momento, no trabalho liderado pelo renomado arquiteto naval americano, Lloyd Bergeson, a Wind Ship Company nos Estados Unidos iniciou uma pesquisa intensiva sobre propulsão eólica para navios no início de 1979. Seu abrangente relatório de pesquisa de 1981 para a Administração Marítima dos EUA analisou mais de 75 tipos diferentes de plataformas e velas e concluíram que o rotor Flettner parecia ter o maior potencial sobre o espectro mais amplo de tamanho de navio, de 18 a 100.000 toneladas. Bergeson descobriu que o cilindro tem uma forma estrutural ideal, com esforços de flexão tão baixos que a fadiga não deve ser um problema. Como o rotor não tem ângulo de ataque ou ângulo de stall, o problema usual de ajustar o ângulo de ataque não existe. Não há alterações de configuração de qualquer tipo envolvidas na operação de um rotor de Efeito Magnus e, portanto, nenhum requisito de tripulação. O timoneiro pode iniciar e parar o rotor e selecionar a rotação e a direção de rotação. A sonda total é menor que a metade da altura de uma sonda equivalente, produzindo quatro vezes a potência. O peso do rotor é subtraído da

carga útil da embarcação. Esse peso vezes a altura do centro de gravidade do sistema subtrai diretamente da estabilidade estática da embarcação. Bergeson descobriu que o rotor era de longe o sistema de velas mais leve conhecido, simples de fabricar e oferecia o menor custo de instalação de qualquer sistema de vela e o sistema resultante produzia um veleiro virtual à prova de tempestade.

Em 1983, Bergeson instituiu um programa para projetar e testar um protótipo usando um rotor de Efeito Magnus de 60 cm de diâmetro e 7.3m de altura que ele instalou, instrumentou e testou extensivamente a bordo do 18-ton, e 13 m de deslocamento Launch Tracker. O rotor foi impulsionado até um máximo de 600 rpm por um motor hidráulico que, por sua vez, era acionado por uma bomba hidráulica acionada por um pequeno motor a gasolina. Os resultados confirmaram as alegações de Flettner e o potencial do rotor como um dispositivo de assistência de vela confiável, economicamente viável, que pode fornecer economias substanciais de combustível para embarcações de pesca modernas e navios comerciais. O Tracker foi extensivamente testado em Vineyard Sound, onde os ventos de verão são consistentemente de 16 a 20 nós e, com o rotor girando a 400 rpm, a economia média era de 50 a 65%. Sob apenas a potência do rotor, o Tracker alcançou uma velocidade máxima de 6,1 nós em um vento de 18,4 nós e um verdadeiro ângulo de vento de 122 graus. Os principais resultados são mostrados na Tabela 1. A título de comparação, isso equivale a acionar um pequeno barramento alimentado por um grande motor de cortador de grama.

Figura 6: Tracker



Fonte: *Gilmore, 1985*

Tabela 1: Tracker - Resultados dos testes

Power Mode	Velocidade média do vento (Knots)	Velocidade média da embarcação (Knots)	Média da economia de combustível (%)
Rotor Assist	16.1	7.0	44
Rotor Assist	12.9	6.0	27
Rotor Sailing	17.7	5.3	100

Fonte: adaptado de Gilmore 1985

Bergeson estava convencido de que a pesquisa da Wind Ship Company e os testes relacionados ao Tracker indicavam que não existia nenhuma barreira técnica importante para a introdução da tecnologia de assistência marítima para a frota de navios do mundo. Ele calculou que em 1984 a frota mundial de navios de transporte consumiu 730 milhões de barris de petróleo anualmente, a um custo de aproximadamente US\$ 30 bilhões, ou 3% da demanda mundial de petróleo. Em 1984, o preço dos combustíveis navais havia se multiplicado mais de 15 vezes durante a década anterior, tornando-se o maior componente dos custos operacionais do transporte marítimo. No entanto, em 1986, os preços do petróleo caíram mais uma vez no pós-Segunda Guerra Mundial e o interesse pelas tecnologias de energia renovável para o transporte diminuiu novamente. O desenvolvimento da tecnologia de rotores novamente estagnou e não foi revisitado por mais 20 anos.

Só que com o novo aumento dos custos com combustível e o potencial de regulamentação das emissões de navios na última década tem-se observado o interesse pela tecnologia de rotores revivido novamente. Testes em túnel de vento realizados pelo grupo de pesquisa Greenwave do Reino Unido em 2006, sob supervisão do Lloyd's Register, modelando um granel médio, estabeleceram que o avanço desenvolvido por um rotor Flettner é de oito a dez vezes maior que o avanço desenvolvido por velas de mesma área de superfície. A equipe de pesquisa da Greenwave realizou uma série de testes de desempenho, manuseio e estabilidade usando quatro rotores a bordo de um modelo em escala 25:1 na Academia Marítima Warsash em Southampton. Um protótipo em escala real da turbina proposta, com 17 m de altura e 2,3 m de diâmetro, foi então erguido no porto de Blyth, na Inglaterra, novamente monitorado e verificado pelo Lloyd's Register.

Figura 7: Testes do Greenwave em 2006



Fonte: <http://www.greenwave.org.uk/achievements-221.html>

Com base nesses testes, a Greenwave conseguiu prever a redução de emissões de gases de efeito estufa e outras emissões nocivas, como NOx e SOx, em uma média de 13% por navio por ano, representando cerca de 1.000 toneladas de combustível e mais de 3.000 toneladas de CO2 por navio anualmente para esta classe de embarcação. Greenwave afirma que, embora a teoria do "motor eólico" permaneça a mesma da versão de 1926 de Flettner, eles usaram design, fabricação e materiais modernos para criar um design protegido por patente. Isso inclui a criação do "motor eólico" de forma modular que permite que ele seja contêinerizado para facilitar o transporte para qualquer porto ao redor do mundo. Em 2012, o Lloyd's Register anunciou que a Greenwave estava procedendo à aplicação em tamanho real de quatro motores eólicos em um graneleiro de 95.000 dwt em construção na Jiangsu Eastern, mas não houve mais relatórios sobre o progresso.

Em 2006, os pesquisadores da Universidade de Flensburg construíram um rotor Flettner montado em uma proa de 8 metros (embora a embarcação seja descrita como um catamarã). O UniKat aciona o rotor por uma simples célula solar de apenas alguns watts. As propriedades do rotor de Flettner significam que, ao inverter a direção de rotação, uma força oposta pode ser aplicada, permitindo que o navio navegue tão eficientemente para trás quanto para a frente. Isso permite que um verdadeiro paradigma de navegação de um *Drua* (embarcação a vela com caso duplo) ou Proa seja empregado com o desvio da embarcação, em vez de se aproximar do vento. Dada a tendência do rotor Flettner de se inclinar mais para barlavento do

que para a sotavento, seria necessário considerar se a cama (casco menor) era mantida a barlavento, como acontece com os projetos tradicionais de *drua*/proa no centro e no norte do Pacífico.

Figura 8: Unikat da Universidade de Flensburg



Fonte: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Uni-Kat_Kiel2007.jpg

Desde 2008, um grupo líder de geofísicos, liderados pelo Professor Emérito Salter, da Universidade de Edimburgo, propôs a construção de uma frota de 1.500 embarcações controladas por rotores Flettner. Seu objetivo é a engenharia climática, especificamente a capacidade de usar partículas de água do mar atomizadas para acentuar o efeito albedo das formações de nuvens. Os navios ejetariam verticalmente uma fina névoa de água do mar deixando grãos de sal ultrafinos, uma proporção da qual seria suspensa para formar núcleos adicionais de condensação de nuvens, iluminando assim as nuvens de baixo nível para refletir uma maior proporção de luz solar incidente. A equipe acredita que essa frota seria suficiente para reduzir a incidência de luz solar na Terra em cerca de 2%, o que reduziria as temperaturas médias globais às que prevaleciam no início da revolução industrial. Como resultado da proposta da Salter, o Discovery Channel contratou John Marples, designer de multicascos, para adaptar os rotores Flettner "cercados" a um trimarã Searunner de 10 metros, o Cloudia. Os rotores foram alimentados por 48 Volts e 10 cavalos de potência de um motor elétrico, acionando os rotores a 400 rpm. A embarcação foi testada em ventos fracos, com desempenho impecável e alcançou 6,5 nós de velocidade em 6 nós de vento em testes em Fort Pierce, Flórida, em fevereiro de 2008. Com uma potência de 600 watts, ela podia

navegar mais rápido que o vento, parar, se deslocar para ré e girar 180 ° em qualquer direção em torno de seu próprio eixo. Preocupado com o aconselhamento jurídico sobre a potencial responsabilidade por acidentes, a Discovery ordenou que os rotores fossem destruídos após o julgamento.

Os desenhos conceituais originais de Salter mostram o uso extensivo das “Thom fences” ou discos horizontais, conforme discutido anteriormente, e estes também foram adaptados aos rotores Cloudia. Extensa modelagem computadorizada pela Universidade de Manchester demonstrou que a adição de discos, enquanto leva a coeficientes de arrasto aparentemente negativos, não produz o aumento impressionante nos coeficientes de sustentação que as experiências de Thom mostraram. Além disso, o grande aumento nos coeficientes de torque associados à adição de discos parece excluir seu uso em aplicações de propulsão marítima.

Figura 9: Cloudia



Fonte: *Marples, 2009*

Em 2009, a Enercon, fabricante alemã de turbinas eólicas, lançou seu novo rotor-ship, E-Ship 1, que apresenta um casco aerodinâmico, uma nova e eficiente hélice para a propulsão diesel-elétrica convencional e modernos rotores Flettner com sistemas de controle automático. Os gases de escape dos motores a diesel alimentam uma turbina a vapor que gera eletricidade adicional usada para girar seus quatro rotores Flettner. Seguindo uma trilha inicial da Alemanha para a Irlanda, o E-Ship 1 havia percorrido 170.000 milhas marítimas até 2013 e uma média de 25% de economia total de combustível, dos quais 15% são diretamente atribuíveis ao uso dos rotores.

Figura 10: E-ship 1

Fonte: <http://www.motorship.com/news101/industry-news/e-ship-1-passes-kiel-canal-for-first-time>

Os designs de Flettner estão agora aparecendo nas principais pranchetas de arquitetos navais, com pelo menos quatro grandes empresas propondo seu uso em embarcações de nova geração, particularmente voltadas para grandes navios e novos projetos de construção. Por exemplo, a subsidiária da Germanischer Lloyd, a FutureShip, desenvolveu um conceito de propulsão com emissões zero para a empresa de transporte Scandlines, que deverá ser entregue em cinco anos e com quatro rotores Flettner com previsão de 10% de economia de combustível e emissões. Algumas das principais universidades de pesquisa, incluindo a Hochschule Emden / Leer, a Universidade de Manchester, o Centro Tyndall de Pesquisas sobre Mudança Climática, CE Delft e UCL, têm programas de pesquisa atuais voltados para a engenharia e rotação de computadores e avaliação de eficiência desta tecnologia para várias aplicações em um futuro próximo. A análise comparativa da economia projetada em rotas transatlânticas modeladas por computador usando dados históricos de vento foi realizada para navios equipados de forma alternada com velas DynaRig, velas de kite e rotores com projeções favoráveis. Uma empresa norte-americana, a Monorotor, propõe rotores de grande diâmetro girando a 40-80 rpm para navios graneleiros de médio porte e contêineres, como o Handymax de 55.000 toneladas, com economia projetada de 8,2 toneladas de combustível por dia e de 17 a 35 toneladas de combustível para embarcações petroleiras do tipo VLCC (Very Large Crude Carrier). A taxa interna de retorno sobre esse investimento é calculada como sendo inferior a 2 anos. Outros inovadores estão propondo rotores retro-montados que

podem se retrair telescopicamente ou são articulados para se deitarem no convés entre as escotilhas, quando no porto ou passando sob estruturas.

4.2 Tipos de embarcação aptas a receber os rotores

Ao iniciar uma avaliação para o potencial retrofit de rotores Flettner em um navio, primeiro deve ser assegurado que o navio candidato está fisicamente bem adaptado para acomodá-los. As particularidades dos navios são usadas para definir as dimensões e locais iniciais dos rotores e, dependendo do tipo de navio, uma lógica diferente é aplicada.

Os requisitos iniciais são os seguintes:

- a) Espaço suficiente no convés limpo;
- b) Nenhuma estrutura imediatamente adjacente que possa interferir nos rotores;
- c) Questões como estabilidade do navio, operações de carga, visibilidade dos requisitos de ponte, radar e luz de navegação devem ser verificadas para cada caso
- d) Pontos de montagem adequadamente fortes.

Estes requisitos significam, em última instância, que um navio candidato deve ser de um tipo que tenha uma área aberta de convés, sem superestrutura extensa que inibiria o fluxo de ar, ou engrenagens/guinchos de convés que possam ser obstruídos pela presença de um rotor Flettner. Uma orientação para este efeito foi publicada pelo Lloyds Register cerca de 5 anos atrás.

Como haverá forças consideráveis transmitidas à estrutura do navio, os locais de montagem devem ser cuidadosamente escolhidos para garantir que as forças possam ser transferidas com segurança para a estrutura do navio. Para uma avaliação inicial, as áreas que já possuem reforço de convés para guindastes ou cabrestantes, etc., são consideradas um local apropriado. Onde isso não for possível, colocar diretamente sobre uma antepara que possa acomodar um enrijecimento extra é também uma alternativa aceitável.

Dessa abordagem, fica claro que certos tipos de navios são inadequados desde o início; como as embarcações do tipo contêiner que não possuem o espaço de convés livre necessário para instalação. Para as embarcações de contêiner, a instalação exigiria o sacrifício de alguma capacidade de transporte de contêineres, além da necessidade de espaço livre ao redor do rotor. No entanto, outros tipos de embarcações, como graneleiros e navios-tanque, representam uma plataforma ideal para a instalação de rotores Flettner. Seus decks abertos e

velocidades “slow steaming” para navegação, juntamente com perfis operacionais favoráveis, os tornam uma proposta mais atraente para o uso dos rotores.

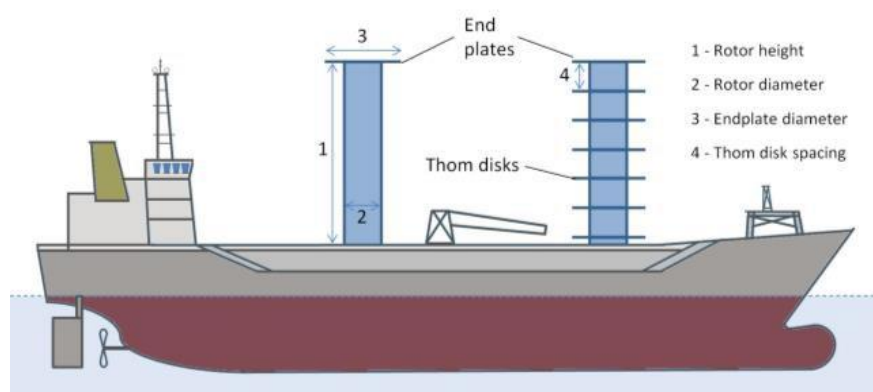
O perfil de operação do navio e a velocidade dos navios em diferentes estados do mar também são fatores-chave para a viabilidade de uma instalação, pois os rotores Flettner são mais eficazes para navios que viajam em velocidades mais lentas em ventos médios/superiores. O melhor benefício de economia de combustível é para os navios que gastam a maior parte de seu tempo operacional a uma velocidade de cruzeiro constante, em vez de manobras, como manipuladores de âncoras.

O navio selecionado para a instalação dos rotores Flettner deve, portanto, atender a todos os critérios necessários para torná-lo uma plataforma adequada para o retrofit.

4.3 Design do rotor em embarcações

Um rotor Flettner padrão consiste de um cilindro básico, com uma placa final montada na parte superior para melhorar a relação de sustentação e arrasto. Podem ser incluídos opcionalmente, “Thom fences”, discos adicionais espaçados uniformemente ao longo do comprimento do cilindro que também podem aumentar o coeficiente de sustentação ao custo de requisitos de energia muito maiores; nomeado após o Dr. Alexander Thom que inicialmente propôs seu uso no projeto de um rotor Flettner. E possui como principais parâmetros de projeto, a altura do rotor, o diâmetro do rotor, o diâmetro do disco superior e o espaçamento entre os discos Thom, quando instalados. Tais parâmetros serão determinados em função da eficiência energética que se quer obter, bem como das condições de vento do local onde navegará a embarcação.

Figura 11: Características do rotor flettner

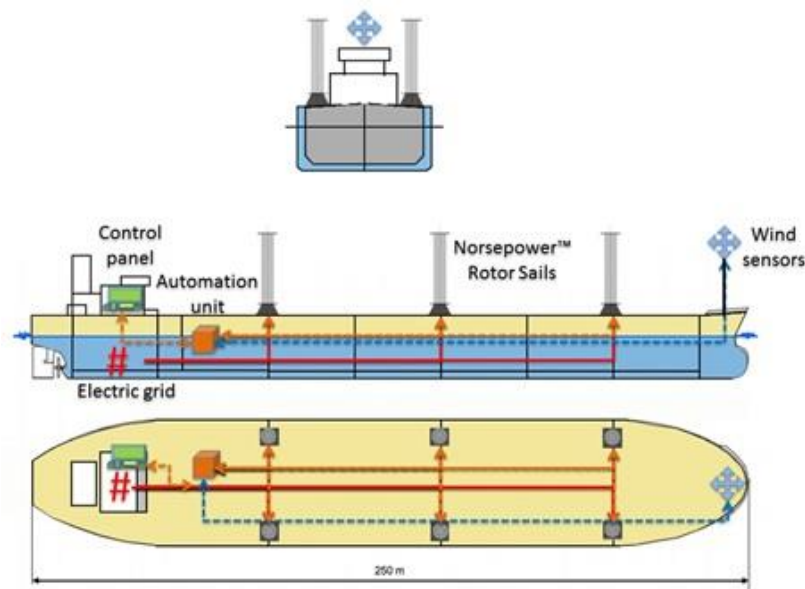


Fonte:

[https://www.bmtdsl.co.uk/media/6097883/BMTDSL%20The%20Use%20Of%20Flettner%20Rotors%20In%20Efficient%20Ship%20Design%20Conference%20paper%20\(RINA%202014\).pdf](https://www.bmtdsl.co.uk/media/6097883/BMTDSL%20The%20Use%20Of%20Flettner%20Rotors%20In%20Efficient%20Ship%20Design%20Conference%20paper%20(RINA%202014).pdf)

A altura do rotor (1) é definida como a distância vertical entre o convés principal e o topo do mastro mais alto dos navios, de modo a não aumentar a corrente de ar existente do navio. O diâmetro do cilindro (2) é definido com base em uma relação fixa de altura e diâmetro, com uma relação menor para as placas finais. O disco na extremidade (3) possui diâmetro maior que o do rotor e auxilia melhorando a sustentação, assim como os discos de Thom (4), que quando instalados, desempenham o mesmo papel.

Figura 12: Partes Essenciais do rotor flettner



Fonte: <http://wind-ship.org/wp-content/uploads/2018/08/Norsepower-Rotor-Sail-Solution-brochure-2018.pdf>

Algumas empresas, atualmente, se especializaram no desenvolvimento de propulsão eólica, e aperfeiçoaram o conceito criado por Flettner um século atrás. Uma das empresas pioneiras nesse setor é a Norsepower que foi até por diversas vezes premiada pelas suas contribuições no desenvolvimento sustentável. A principal diferença dos modelos atuais para o antigo modelo, está no processo totalmente automatizado para gerar a propulsão. As partes essenciais dos projetos mais modernos incluem:

- O rotor que fornece o avanço da embarcação para vante;
- Um painel de controle, que dá ao comandante controle total da operação e do desempenho dos rotores;
- Um sistema de controle totalmente automático, que otimiza o avanço para a vante das velas do rotor e;
- Uma fonte de energia elétrica de baixa tensão para cada Rotor.

O número e o tamanho necessários de rotores são baseados no tamanho, velocidade e perfil de operação de cada embarcação. E com o controle automático dos rotores, a tripulação é capaz de controlar o funcionamento através do Painel de Controle normalmente instalado no passadiço das embarcações. Depois de iniciar o sistema com um botão de partida, a solução é totalmente automatizada e detecta sempre que o vento é forte o suficiente para fornecer economia de combustível, quando os rotores começam automaticamente, minimizando o tempo e o recurso da equipe. Com isso, a tecnologia aproveita o vento para maximizar a eficiência de combustível do navio de carga, sendo toda essa manobra feita de forma automática. Quando as condições do vento são favoráveis, as velas do rotor permitem que os motores principais sejam desacelerados, economizando combustível e reduzindo as emissões, fornecendo a potência necessária para manter a velocidade e o tempo de viagem.

Figura 13: Painel de Controle dos Rotores



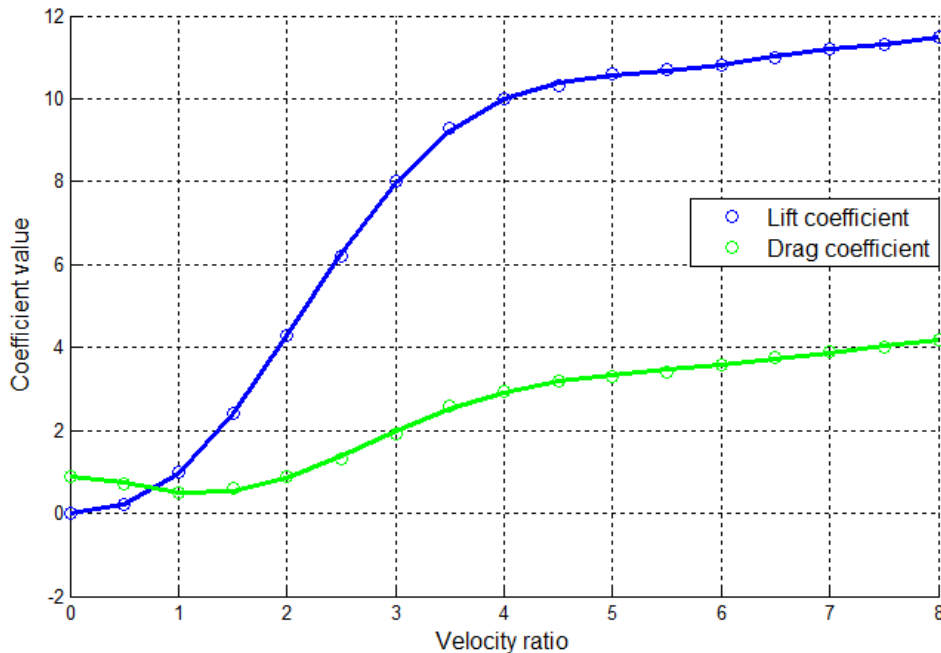
Fonte: <http://wind-ship.org/wp-content/uploads/2018/08/Norsepower-Rotor-Sail-Solution-brochure-2018.pdf>

4.4 Informações aerodinâmicas, o vento e as forças

A única variável dinamicamente controlada de um rotor Flettner é a velocidade de rotação, que conseqüentemente afeta a razão de velocidade, que é definida como a razão da velocidade superficial do cilindro em relação à velocidade do ar. Os coeficientes de sustentação e arrasto variam com a razão de velocidade; portanto, o desempenho do rotor dependerá dos dados de segundo plano usados para calcular os coeficientes de sustentação e arrasto e as forças subseqüentes geradas.

Dados precisos sobre os coeficientes de sustentação e arrasto, mostram que quanto maior a razão de velocidade, maior é o coeficiente de sustentação da embarcação, sendo, portanto, maior o seu avanço.

Figura 14: Gráfico Coeficiente x Razão de Velocidade



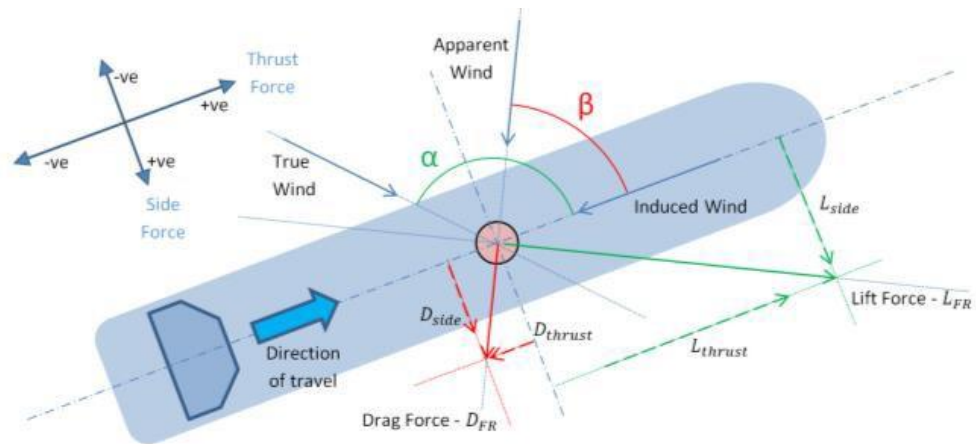
Fonte: The use of Flettner rotors in efficient ship design

A força e direção do vento experimentada pelo navio, à medida que ele avança, será a resultante do "vento induzido" (Induced Wind), fluxo de ar sentido pelo movimento dos navios para vante, e o "vento verdadeiro" (True Wind), direção do vento era ser estacionário, para criar então o vento aparente (Apparent Wind).

É o vento aparente incidente sobre o navio que é a velocidade do vento usada para calcular a razão de velocidade. O vento aparente varia em força e direção para cada combinação de velocidade do navio, velocidade real do vento e direção real do vento, portanto o modelo Flettner deve levar em conta todas as combinações potenciais.

As forças de sustentação (Lift) e arrasto (Drag) resultantes do rotor Flettner são então divididas em seus componentes e somadas para dar a força resultante para esse cenário.

Figura 15: Vento e Forças aparentes



Fonte:

[https://www.bmtdsl.co.uk/media/6097883/BMTDSL%20The%20Use%20Of%20Flettner%20Rotors%20In%20Efficient%20Ship%20Design%20Conference%20paper%20\(RINA%202014\).pdf](https://www.bmtdsl.co.uk/media/6097883/BMTDSL%20The%20Use%20Of%20Flettner%20Rotors%20In%20Efficient%20Ship%20Design%20Conference%20paper%20(RINA%202014).pdf)

Assume-se que o rotor irá sempre rodar na direção que proporcionará avanço benéfico e à velocidade rotacional benéfica mais alta; onde isso não for possível, os rotores são desligados para minimizar o consumo de arrasto e energia.

4.5 Vantagens

A instalação dos rotores Flettner a bordo de embarcações possui um amplo número de vantagens. Não apenas pelo fato de ser uma fonte de propulsão que não agride ao meio ambiente, mas principalmente por acabar se tornando um investimento rentável para o armador. Entre as principais vantagens da implementação dessa tecnologia a bordo, temos:

- a) Significante economia de combustível;
- b) Simplicidade de instalação;
- c) Confiabilidade em alto mar;
- d) Operabilidade do passageiro;
- e) Segurança;
- f) Baixo custo de manutenção e nenhum tripulante adicional necessário e;
- g) Sem interferências na operação normal da embarcação

4.5.1 Significante economia de combustível

Alguns dos cálculos mais recentes em relação a economia de combustível, sugerem mais de 50% de economia em rotas específicas para embarcações que navegam em condição de

“slow steaming” e com os rotores instalados a bordo, no entanto, isso é considerado uma estimativa altamente otimista. Realisticamente, cada rotor tem oferecido cerca de 8% de economia de combustível, portanto a economia da embarcação dependerá também, do número de rotores instalados a bordo.

Se levado em consideração que aproximadamente 50% do custo operacional de uma embarcação são gastos com óleo combustível, então independente da porcentagem e quantidade de rotores, sua instalação já se torna uma grande vantagem, visto que gerará economia para o armador.

E a economia com combustível é tão considerável, que é estimado que a taxa de retorno para o capital investido na tecnologia dos rotores seja de apenas 2 a 4 anos. Colocando isso em valores, há uma economia na faixa de U\$ 200.000,00 por ano em função de uma redução de consumo de 400 toneladas de óleo combustível. Além disso, com essa economia, cerca de 1200 toneladas de CO2 deixam de ser lançadas à atmosfera. Isso tudo, sem que a embarcação diminua sua velocidade de operação

4.5.2 Simplicidade de instalação

Como tempo é dinheiro, uma outra vantagem dos rotores é a simplicidade da instalação que conseqüentemente gera um tempo rápido de intervenção para conclusão de todo o processo. A instalação da fundação é simples e feita durante um dry-docking normal. Modificações e instalação da estrutura de aço podem ser feitas entre apenas 7 e 14 dias. Se necessário, uma parte das obras até pode ser realizada a bordo durante a navegação, diminuindo ainda mais o tempo de instalação.

Os componentes do sistema de automação (sensores, controle e painéis de monitoramento), bem como o cabeamento do sistema de energia e automação, são mais convenientes para instalar enquanto o navio estiver em docagem. Se o período de docagem for curto, não é impeditivo de instalação, logo uma parte desse trabalho também pode ser executada enquanto o navio estiver em operação.

A instalação do rotor propriamente dito, é uma operação bastante rápida. Geralmente, isso pode ser feito durante um período de atracação da embarcação no porto. O tempo de instalação típico é de 6 a 12h por rotor. Na fase de instalação, o rotor é levantado pelo guindaste até a fundação, e todas as conexões mecânicas e de cabeamento estão bem protegidas.

4.5.3 Confiabilidade em alto mar

Por ser um processo totalmente automatizado, os rotores Flettner proporcionam alto grau de confiabilidade em alto mar. Aliado a isso, o sistema responde muito bem tanto em condições de bom tempo, quanto em condições tempestuosas. A embarcação segue navegando sem alterações bruscas dos seus graus de estabilidade, e efeitos como balanço e caturro não são prejudicados em razão dos rotores.

O sistema é muito seguro e está programado para emitir um aviso em várias ocasiões. Existem dois níveis de aviso, a cor amarela é usada apenas para notificar sobre uma alteração e não requer ações adicionais. A cor vermelha é usada para avisos críticos, o que fará com que o rotor desligue ou apenas reduza a velocidade de rotação automaticamente. Alguns desses casos podem acarretar em necessidade de manutenção. Há informações relacionadas a componentes do rotor, como temperaturas ou vibrações dos rolamentos, engrenagens, conexões de dados, etc.; e outros são avisos de condições de operação externas, como alta velocidade do vento, umidade, formação de gelo e condições de balanço elevadas.

4.5.4 Operabilidade do passadiço

É totalmente automatizado e coleta informações necessárias através de seus sensores, passando os dados para o programa que calcula a velocidade de rotação ideal e aciona o rotor.

O rotor é operável a partir do passadiço através de um painel de controle simples, sem ajustes manuais complicados. Ele tem uma tela, que mostra os principais parâmetros da função do rotor, botão de parada de emergência e uma alavanca para o ajuste manual da velocidade de rotação. Existem três modos de operação: "on", "off" e modo invisível. O modo invisível significa rotação lenta, o que reduz o arrasto a ser menor do que seria no caso do rotor de parada completa, tornando o rotor "invisível". Quando o rotor é ligado, o programa coleta informações necessárias através de seus sensores e calcula a velocidade de rotação ideal e a direção da velocidade e direção do vento em tempo real, tudo de forma automatizada. Esses valores são mostrados na tela para o operador que poder acompanhar tudo instantaneamente. O consumo de energia do rotor e o rendimento de energia, bem como os dados do fluxo de ar dos motores são todos mostrados.

4.5.5 Segurança

O rotor Flettner atual com sistema automatizado de funcionamento oferece além de desempenho, segurança em alto nível para o operador. Há interruptores de emergência que podem ser encontrados no painel de controle no passadiço, no local em frente ao painel do rotor e também dentro do rotor. Todas essas proteções evitam o giro do rotor desalimentando o circuito, permitindo o encarregado de manutenção fazer alguma intervenção sem se acidentarem. A escotilha na base do rotor também é equipada com um “switch” que se aberto, provocará a sua parada não podendo ser ligado enquanto a escotilha não estiver devidamente fechada.

4.5.6 Baixo custo de manutenção e nenhum tripulante adicional necessário

Uma outra vantagem de se instalar os rotores Flettner a bordo de embarcações, deve-se ao fato de eles apresentarem um baixíssimo custo de manutenção. A Norsepower, pioneira no ramo, estima que o valor gasto em manutenção com os rotores seja na faixa de 2% do gasto total anual em manutenção de toda a embarcação, uma parcela bem pequena, se levado em conta os benefícios de até 20% de gastos sendo economizados em combustível, permitindo assim, ainda, uma boa margem de economia. Sendo uma tecnologia simples que apenas utiliza um rotor para gerar a propulsão em função do vento e controlada de forma totalmente automatizada através de sensores que fornecem uma variedade de parâmetros, nenhum tripulante extra é necessário em função da instalação dos rotores pois todos os parâmetros de operação estão disponíveis para o operador no passadiço.

4.5.7 Sem interferências na operação normal da embarcação

Uma vez que se faça o estudo de caso vendo o local ideal de instalação, os rotores Flettner não interferem na operação normal da embarcação. Até mesmo embarcações com guindastes conseguem utilizar essa tecnologia e ainda assim obter sua total operacionalidade.

4.6 Desvantagens

Existem fatores que afetam o desempenho geral de um navio equipado com rotores Flettner e demonstram porque uma avaliação antecipada do tipo e do layout do navio é importante. Caso não verificado minuciosamente, o que deveria ser vantajoso, acaba se

tornando uma desvantagem. E dentre algumas desvantagens da instalação dos rotores, temos alguns fatores a serem considerados dentro deste modelo de propulsão que são:

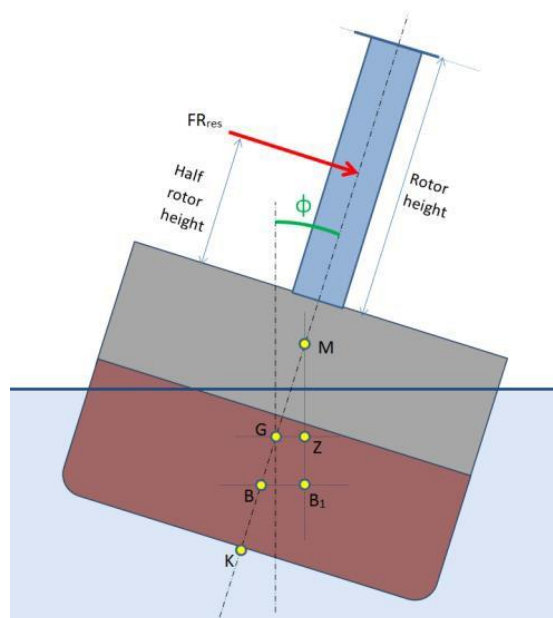
- Aumento do momento de adernamento das forças laterais;
- Propulsão depende das condições de vento;
- Arrasto extra do leme devido ao aumento da guinada e;
- Vibrações forçadas (ressonância).

4.6.1 Aumento do momento de adernamento das forças laterais

As forças laterais (oscilação) podem se tornar muito grandes quando o ângulo do vento aparente estiver quase morto à vante ou à ré. Esta grande força lateral quando combinada com o braço de alavanca vertical de um rotor Flettner, cria um grande momento de adernamento no navio e, assim, aumenta o ângulo de inclinação estático, tal como acontece com um iate à vela. O aumento no ângulo de inclinação estático deve, portanto, ser calculado para garantir que não exceda os níveis de segurança e para quantificar seu efeito na manutenção do navio no mar.

Isso é realizado usando as características hidrostáticas do navio. Os momentos são equacionados em torno do centro de gravidade vertical (CVG) e a geometria básica permite um cálculo do ângulo de inclinação estático.

Figura 16: Ângulo de inclinação



Fonte:

[https://www.bmtdsl.co.uk/media/6097883/BMTDSL%20The%20Use%20Of%20Flettner%20Rotors%20In%20Efficient%20Ship%20Design%20Conference%20paper%20\(RINA%202014\).pdf](https://www.bmtdsl.co.uk/media/6097883/BMTDSL%20The%20Use%20Of%20Flettner%20Rotors%20In%20Efficient%20Ship%20Design%20Conference%20paper%20(RINA%202014).pdf)

A partir do ângulo calculado de inclinação, a mudança na área da superfície molhada no casco pode ser calculada e, assim, qualquer mudança resultante no arrasto levada em conta.

Verificou-se que tem efeitos insignificantes (<1%), uma vez que o ângulo de inclinação não excede o ângulo proveniente do balanço normalmente experimentado pelo navio, portanto os efeitos do ângulo de inclinação não são calculados rotineiramente, a menos que se espere que seja inesperadamente alto para esse cenário.

4.6.2 Propulsão depende das condições de vento

Para que os rotores Flettner possam desempenhar o seu papel de propulsão em função do avanço gerado pela força de sustentação, é primordial que exista vento. Estudos e testes feitos comprovam que os rotores respondem benéficamente para diversas velocidades de vento e diferentes ângulos de ataque. No entanto, ventos ideais são normalmente raros, o que pode fazer com que os rotores sejam úteis em apenas parte útil do tempo. E para piorar, quando não utilizados, ainda assim estão fornecendo algum arrasto o tempo todo, reduzindo a capacidade de propulsão do motor ou aumentando o consumo de combustível para manter a velocidade operacional.

Um navio de carga médio navega em torno de 16 a 25 nós, o que é velocidade suficiente, mas o vento tem que ser lateral para que os rotores sejam eficazes. Eles são mais eficazes com ventos mais altos a 90 graus do barco, mas fornecem algumas vantagens com ventos mais baixos de 20 graus. Em função de diversas variáveis como velocidade do vento e ângulo de ataque além de sua instabilidade, em qualquer jornada, será um tanto difícil dizer qual será o valor real, fazendo com que calcular a carga de combustível ideal se torne mais complexo, bem como mais combustível que o necessário provavelmente será carregado como uma contingência a um custo econômico.

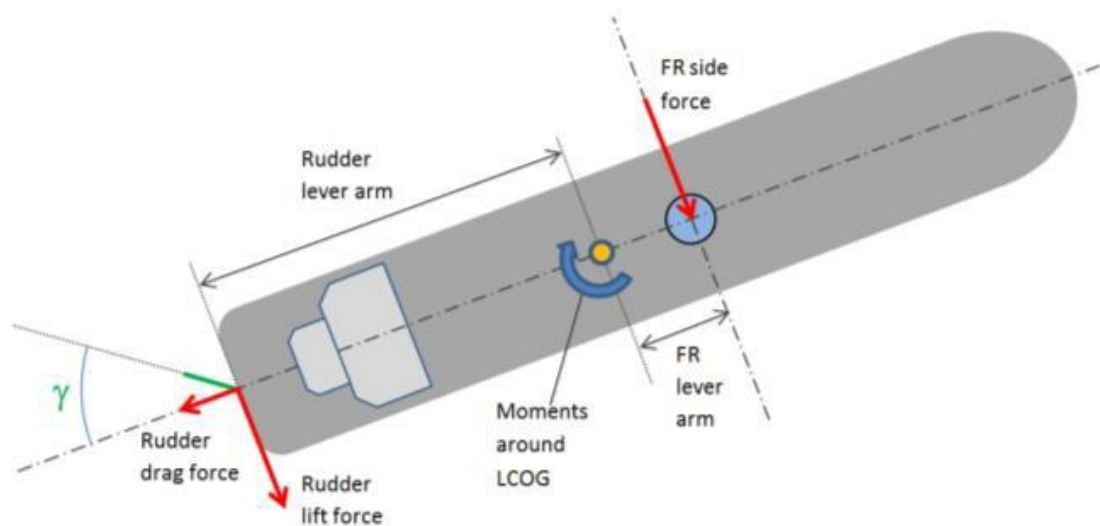
Por essa razão, é necessário um estudo minucioso das condições climáticas de onde a embarcação irá atuar, visto que o rotor só responde bem na presença de condições ideais de vento.

4.6.3 Arrasto extra do leme devido ao aumento da guinada

Outro efeito potencial de grandes forças oscilantes é a capacidade de criar momentos de guinada desequilibrados ao redor do Centro Longitudinal de Gravidade (CLG) dos navios. Este

momento de guinada deve ser contrariado aplicando-se um ângulo de leme maior, o que aumentará o arrasto e reduzirá o benefício dos rotores. Como parte deste problema, há um momento de guinada máximo que o leme pode exercer para uma determinada velocidade de navio, e a velocidades reduzidas de navios e ventos mais altos isso pode resultar em perda de direção da embarcação.

Figura 17: Forças de Guinada dos rotores Flettner



Fonte:

[https://www.bmtdsl.co.uk/media/6097883/BMTDSL%20The%20Use%20of%20Flettner%20Rotors%20In%20Efficient%20Ship%20Design%20Conference%20paper%20\(RINA%202014\).pdf](https://www.bmtdsl.co.uk/media/6097883/BMTDSL%20The%20Use%20of%20Flettner%20Rotors%20In%20Efficient%20Ship%20Design%20Conference%20paper%20(RINA%202014).pdf)

Caso o momento de guinada criado pelos rotores exceda a capacidade do leme de contê-lo, a velocidade do rotor é reduzida para manter a direção.

4.6.4 Vibrações forçadas (Ressonância)

Em hidrodinâmica é estudado o conceito de estol (do inglês “stall”), que consiste na perda de sustentação provocada por um determinado ângulo de ataque do fluido em movimento contra a embarcação. Há um determinado ponto de transição em quem o fluido deixa de escoar de forma linear, passando a escoar de forma turbulenta. Com essa turbulência gerada, o navio perde sustentação e conseqüentemente capacidade de propulsão. Além dessa perda, a embarcação ainda sofre com os efeitos da turbulência gerada, na forma de vibração. Há um considerável aumento na vibração do navio, podendo até levar a um estado de ressonância dependendo das correções feitas pelo operador.

Quando aplicada essa ideia aos rotores Flettner, o comportamento é exatamente o mesmo. Dependendo do ângulo de ataque e da velocidade do vento, se for atingido o ângulo de estol, a embarcação perderá a sustentação gerada pelos rotores tendo o seu arrasto aumentado. Com arrasto aumentado, há um comprometimento dos motores que acabam consumindo mais para compensar o arrasto, mas há também um aumento na vibração da embarcação em função da zona turbulenta gerada pelo ângulo de ataque do vento.

Por essa razão, para evitar esse tipo de situação, o operador deve acompanhar regularmente a velocidade e o ângulo de incidência do vento, de forma a obter sempre a maior capacidade de sustentação e, portanto, o maior avanço possível.

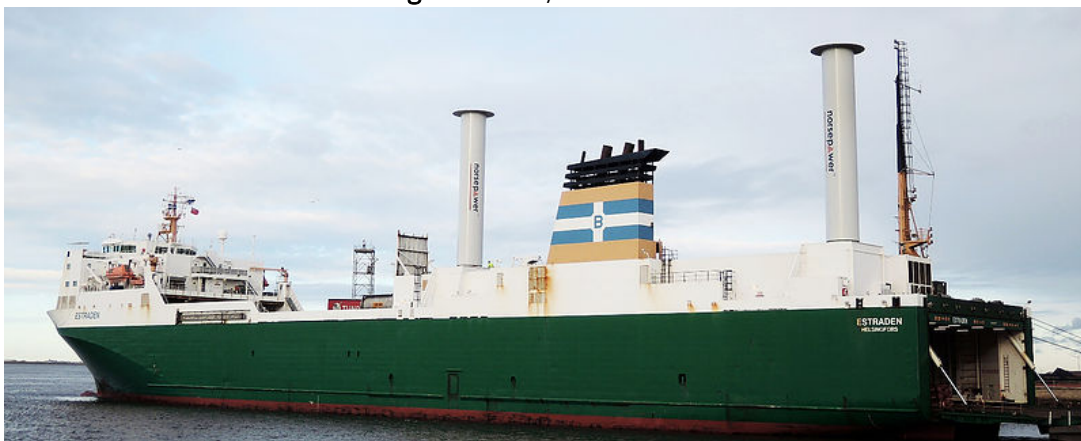
Como forma de proteção, os rotores são equipados com sensores detectores de vibração podendo parar o funcionamento, caso condições anormais sejam observadas protegendo a embarcação.

4.7 Embarcações de grande porte que utilizam os rotores Flettner

Embora estudos mostrem que os rotores Flettner apresentem melhores resultados em embarcações de pequeno e médio porte, algumas de grande porte já fazem uso dessa tecnologia e também colhem os benefícios desse sistema.

O Navio Ro-Ro M/V Estraden, 9700 DWT e dimensões de 162,7m de comprimento por 25,7m de boca, foi o primeiro navio de grande porte a instalar os rotores, que de acordo com os armadores da empresa, proporcionaram uma economia de 6,1% no consumo de óleo combustível anualmente.

Figura 18: M/V Estraden



Fonte: <https://www.norsepower.com/ro-ro>

Outra embarcação de grande porte utilizando esse sistema é o navio de cruzeiro M/S Viking Grace, navio com 218m de comprimento por 31,8m de boca, já conhecido por ser ecologicamente correto, e que com a adição da tecnologia Flettner reduziu ainda mais as suas emissões provenientes da queima de combustível. Estima-se que as emissões de carbono em diminuíram em cerca de 900 toneladas anuais equivalentes a uma economia de 300 toneladas de combustível, sendo este navio o primeiro híbrido global de propulsão elétrica de Gás Natural Liquefeito (GNL) e energia eólica. Pesquisas feitas no primeiro ano de navegação deste navio mostraram que o rotor instalado reduziu o consumo de energia entre 207-315 kW, ou seja, 231-315 toneladas de combustível por ano, bem alinhado com o objetivo original do projeto.

Figura 19: M/S Viking Grace



Fonte: <https://www.norsepower.com/cruise-ferry>

Representando os navios tanques, temos a maior empresa de navegação do mundo com Maersk Pelican utilizando dois rotores ao longo do seu convés. Essa embarcação com 245m de comprimento por 42m de boca e 109.647 DWT é a embarcação de grande porte mais recente a instalar essa tecnologia, sendo o retrofit realizado em agosto de 2018. Ela ainda está sob testes e análise até o final de 2019, mas com seus dois rotores, é esperado que forneça uma economia na faixa de 7 a 10% no consumo de óleo combustível.

Figura 20: Maersk Pelican



Fonte: <https://www.norsepower.com/tanker>

Há também registro de rotores Flettner instalados a bordo de navio a granel. O M/V Afros, navio com 64.000DWT e 199m de comprimento com 32m de boca, já possui segundo a empresa que instalou os rotores, a melhor eficiência do setor. Esta instalação, foi a primeira em uma embarcação deste tipo e porte, demonstrando que as operações de manuseio de carga e portuárias não foram afetadas pelo sistema.

Figura 21: M/V Afros



Fonte: <https://www.vesselfinder.com/news/14132-Blue-Planets-bulk-carrier-Afros-wins-Ship-of-the-Year-award-at-Lloyds-List-Greek-Shipping-Awards-2018>

5 PIPA REBOQUE COMO PROPULSÃO

A fim de permanecer competitiva em um mercado desafiador e atender ao crescente número de regulamentações internacionais em relação à redução de emissões, cada vez mais empresas de navegação estão buscando medidas eficazes para reduzir o consumo de óleo combustível.

Entre as inúmeras opções disponíveis no mercado, existe também uma forma de suporte de propulsão que utiliza uma pipa como reboque e que tem apresentado resultados muito positivos e efetivos com sua instalação.

A SkySails, empresa sediada em Hamburgo especializada em pesquisa e desenvolvimento de sistemas auxiliares de apoio à propulsão eólica e gerenciamento de desempenho de embarcações, foi quem criou e desenvolveu esta pipa para reboque. Implantados em modernos navios comerciais de carga oceânica.

A empresa sediada em Hamburgo equipou o primeiro navio, M/V Michael, da Reederei Wessel, com um sistema SkySails de primeira geração no final de 2007. Desde então, a solução de suporte de propulsão foi testada em condições reais e os resultados obtidos levaram a novos desenvolvimentos para aperfeiçoamento da tecnologia.

A SkySails desenvolveu então, o SkySails Generation III, que possui uma pipa de reboque de 400 m² capaz de criar forças de tração de até 16 toneladas. O primeiro sistema da pré-série foi instalado na M/V Aghia Marina, de propriedade da companhia marítima grega Ambros Maritime, e sob contrato de longo prazo com a empresa cargueira americana Cargill Ocean Transportation.

Com sua solução de pipa de reboque em constante evolução, a SkySails fornece suporte de propulsão de energia renovável, ao mesmo tempo em que reduz o consumo de óleo combustível e as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

De acordo com os próprios estudos de campo da própria empresa, as possíveis economias de custo são substanciais; uma vez que a empresa afirma que, a um preço de US\$ 0,06/Kw, 1 Kwh de energia da SkySails custa metade de um Kw produzido pelo motor principal.

No lado ambiental, a IMO publicou estimativas sugerindo que a tecnologia de transporte de pipas tem um enorme potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa em até 100 milhões de toneladas por ano.

O sistema de suporte de propulsão SkySails consiste em três componentes principais: uma pipa de reboque com corda, um sistema de lançamento e recuperação e um sistema de controle para operação automatizada.

A solução é controlada por meio de um sistema baseado em software, que a empresa instala em um painel de controle no passadiço.

Além disso, embora possa parecer absurdo pensar que o manuseio da pipa deva exigir o uso do sistema de comunicação via satélite, a moderna tecnologia de comunicação desempenha um papel importante, já que a disponibilidade de dados climáticos instantâneos é essencial para a efetiva implantação destes sistemas de propulsão eólica. A fim de maximizar a eficácia da pipa, dados climáticos obtidos via satélite são necessários para adaptar o aspecto de planejamento da viagem do sistema, em cooperação com a equipe em terra durante a viagem, de acordo com as mudanças climáticas.

5.1 Informações em tempo real sobre o desempenho do navio

A fim de apoiar as companhias de navegação na economia eficiente do consumo de óleo combustível e na redução sustentável das emissões de gases de efeito estufa de seus navios - em suma, para melhorar a eficiência operacional das embarcações - a SkySails desenvolveu o SkySails Performance Monitor.

O sistema de suporte à decisão baseado em software fornece automaticamente às matrizes das companhias de navegação, e à tripulação a bordo, informações em tempo real sobre os dados de desempenho do navio.

Além disso, combina esses dados de desempenho de embarcações em tempo real com informações econômicas adicionais e oferece recomendações práticas para os oficiais a bordo.

A solução possui um dispositivo de monitoramento, que é instalado no passadiço da embarcação. Esta exibição fornece ao capitão uma variedade de informações sobre o desempenho do navio, como a velocidade real (em nós), o consumo real de combustível (em kg/mn), um gráfico que visualiza a velocidade real do navio e o consumo real de combustível nos últimos 60 min, a velocidade ideal (em nós), a taxa real de consumo de combustível (em ton/dia) e o consumo de combustível nas últimas 24 horas (em toneladas).

A velocidade ideal sugerida para o navio é calculada com base nas condições prevalecentes, que são continuamente compiladas e calculadas em tempo real. Além disso, o cálculo leva em

conta outras informações essenciais, como o preço do bunker, os custos operacionais e as taxas de afretamento, que são alimentadas ao sistema pelo pessoal em terra.

A tela oferece uma variedade de dados náuticos para o Capitão, como posição e velocidade da embarcação, ou a situação climática em relação ao vento e às ondas. O SkySails Performance Monitor também pode ser personalizado de acordo com as necessidades específicas do usuário, para coletar informações adicionais, como posição do leme ou torque, bem como dados do motor principal e dos geradores.

A tela do SkySails Performance Monitor é dividida em três seções, das quais a seção principal contém todos os parâmetros relevantes para monitorar o consumo de óleo combustível. Os dados são coletados em intervalos curtos de dez minutos.

A velocidade econômica recomendada é exibida como uma linha verde em um gráfico "Velocidade do navio", enquanto a curva de velocidade dos últimos 60 minutos é mostrada como uma linha preta podendo o operador, portanto, controlar durante todo instante o consumo.

Todos os dados coletados e compilados são enviados automaticamente para um destinatário especificado em terra uma vez por dia, por exemplo, a sede da companhia de navegação.

A solução também inclui o serviço SkySails Data Management & Analytics, que cria automaticamente um relatório de fim de viagem contendo todos os dados coletados. Este relatório é enviado por e-mail para a sede da companhia de navegação no final de cada viagem.

Esses dados compilados podem ser usados para vários propósitos, como analisar e otimizar as operações dos navios por meio de comparação com outras embarcações da mesma frota.

5.2 Benefícios

A implementação do SkySails Performance Monitor visa oferecer várias vantagens para as empresas de navegação. A empresa não apenas proporciona economias significativas de combustível, mas também reduz substancialmente as emissões de gases de efeito estufa. E isso, sem necessidade de aumentar o número de tripulantes, o que significa que nenhum custo adicional de pessoal é requerido.

Além disso, os sistemas de software podem ser usados para fornecer monitoramento e análises de dados que podem servir de base para a implementação do Plano de Gerenciamento de Eficiência Energética do Navio (SEEMP), que é uma das medidas

obrigatórias adotadas pela IMO em 2011 para reduzir a emissão de gases de efeito estufa que se originam da navegação internacional.

Espera-se que o sistema de apoio à decisão forneça maior transparência do desempenho do navio por meio da compilação e computação de uma grande quantidade de informações relevantes para o desempenho.

Além disso, a SkySails se esforça para oferecer suporte a decisões de armadores, operadores e tripulação; bem como auxiliam oferecendo a base para análises de desempenho retrospectivos que podem detectar espaço para melhoria e otimização.

Além da implementação de uma abordagem sistemática de economia de combustível em toda a frota, as companhias de navegação também podem usar os dados do Monitor de Desempenho para determinar quais ações corretivas são adequadas e avaliar se elas foram tomadas de forma eficaz.

Além disso, todas as informações necessárias para a preparação do relatório de viagem são automaticamente compiladas e comunicadas à costa, o que deve diminuir a carga de trabalho adicional das tripulações criadas pelas exigências regulatórias.

As informações do software de monitoramento podem ajudar a aumentar a conscientização entre os funcionários da tripulação e da empresa de navegação em relação à otimização das operações do navio e à melhoria da eficiência de combustível, bem como à redução de emissões.

5.3 Reederei Wessels

Reederei Wessels, empresa alemã de transporte marítimo, que está continuamente à procura de melhorias de eficiência, analisou uma variedade de soluções para otimizar as operações de seus navios.

Além de usar tinta especial para a parte submersa das suas embarcações ou atomizadores que melhoram o movimento da embarcação durante a viagem, a Reederei Wessels foi a primeira empresa de navegação do mundo a testar o suporte de propulsão de pipa SkySails.

Em 2007, Reederei Wessels introduziu o uso de uma pipa de 160 m² em seu MV Michael, uma embarcação multifuncional de 3600 DWT, em cooperação com a SkySails.

Um período de teste abrangente foi feito e completado com sucesso em 2009. E os resultados obtidos foram tão positivos que levaram à instalação do SkySails SKS160 Kite System em outros navios, como o M/V Theseus, M/V Telamon e M/V Peléus.

Reederei Wessels se mostrou satisfeita tanto com os resultados da implementação da pipa de reboque como com o manuseio e manutenção diários do sistema totalmente automatizado.

A implementação da tecnologia de suporte de propulsão de pipa de reboque levou a uma redução significativa do consumo de óleo combustível em todos os navios participantes, que de acordo com dados fornecidos pela empresa, foi na faixa de 10 a 15% apenas para o M/V Michael.

Além do sistema de pipa de reboque, a Reederei Wessels também implementou o SkySails Fuel Performance Monitor, que foi desenvolvido como resultado da experiência conjunta das empresas ligadas ao SkySails SKS160. A motivação da empresa para a instalação deu-se pela possibilidade de se obter uma assistência humana a todo instante, bem como permitir que os oficiais de seus navios se conscientizassem cada vez mais em relação a importância de se controlar os custos crescentes de óleo combustível.

Com a instalação do software sendo programada e executada durante dois dias de operação de carga geral, não foi necessário gastar tempo extra na implementação. Para simplificar o processo, mais tripulantes também foram treinados sobre o uso do Monitor de Desempenho de Combustível dentro desse prazo.

Para referência adicional ou para esclarecer dúvidas, há ainda um manual detalhado disponível e a SkySails estabelece uma linha de suporte 24 horas para suporte.

Há vários componentes de hardware e pré-requisitos adicionais necessários para a implementação. Por exemplo, os navios que usam o sistema de monitoramento de combustível precisam estar equipados com um computador de combustível, assim como medidor de vazão e sensores.

Um outro pré-requisito é a conectividade inter-redes adequada. O sistema de comunicação via satélite precisa ser capaz de transferir anexos grandes de até 60 KB, feito pelo Inmarsat FleetBroadband e o Fleet33, dispositivos de comunicação via satélite utilizados pela empresa.

5.4 Uso dos dados monitorados

A Reederei Wessels se mostrou totalmente satisfeita com o sistema e com o modo como é operado através de um display no passadiço, indicando vários parâmetros operacionais, como velocidade da embarcação, consumo de óleo combustível e dados adicionais de navegação. A companhia de navegação também se mostrou satisfeita com as recomendações do Fuel Performance Monitor para operações do navio, pois a partir dos dados fornecidos, que

contêm diversos parâmetros diferentes, foi possível otimizar as rotas de todas as suas embarcações com eficiência.

O dispositivo de monitoramento de desempenho registra a quantidade de óleo combustível consumido durante uma viagem e corresponde a isso com as condições em que o consumo ocorreu, como velocidade, corrente e altura da onda. Estas informações são muito valiosas para o Capitão de uma embarcação pois o auxilia a encontrar a velocidade de cruzeiro que fornecerá o máximo de eficiência.

O cálculo feito pelo dispositivo de monitoramento leva em consideração a velocidade da embarcação, a rota e a hora prevista de chegada ao porto de destino. E de acordo com essa informação, os ganhos da embarcação são calculados. O Capitão pode verificar no monitor se uma redução de velocidade economizaria custos e tomando sempre suas decisões economicamente.

A solução de software SkySails também suporta o sistema de relatórios da Reederei Wessel, fornecendo um conjunto de formulários padrão para relatórios de viagem e posição para o operador do navio. Isto simplificou notavelmente o processo de obtenção de dados para toda a tripulação a bordo.

Além dos formulários padrão, os usuários podem criar formulários de relatórios individuais de acordo com suas especificações. A Reederei Wessels aproveitou esta oportunidade e criou formulários individuais de relatórios para o consumo de óleo combustível e relatórios de posição, que são enviados para Arkon Shipping, empresa parceira. Além disso, relatórios mais detalhados com todos os parâmetros disponíveis são enviados ao proprietário em intervalos regulares.

Além desses benefícios operacionais, a implementação do software também beneficiou a tripulação a bordo dos navios, que foi treinada para permitir a operação. A reação da tripulação de forma geral foi bem positiva, uma vez que o trabalho manual existe em menor escala, e pelo fato de economizar tempo e fornecer um bom suporte adicional à decisão. De acordo com os parâmetros de viagem, o sistema avalia se os ganhos são mais altos ao ir mais rápido ou mais devagar e faz recomendações de acordo.

O departamento de suporte da SkySails, auxilia os clientes sempre que necessário, sendo mais uma ferramenta de apoio. A linha direta de suporte está disponível 24 horas por dia mostrando o comprometimento da Skysails em oferecer os melhores serviços.

Algumas melhorias já foram feitas no sistema e novos parâmetros foram incluídos, de forma a obter a maior variedade de informações que ajudarão o pessoal de bordo da tomar as melhores decisões no que se refere a economia de combustível.

Desde a implementação do monitoramento de desempenho nos primeiros navios, a Reederei Wessels acompanhou de perto os benefícios financeiros do sistema, e os estudos de campo sobre o M/V Theseus levaram a resultados interessantes com relação ao potencial de economia de custos.

Durante um período de teste de 152 dias, o expositor conseguiu uma redução de custos de 49.100 €, em comparação com os custos regulares de combustível de 348.100 €. Isso equivale a 14% de economia, o que é muito positivo.

5.5 BBC Chartering

A BBC Chartering, empresa alemã de navios “multipurpose” e elevadores navais, vinha acompanhando o desenvolvimento da tecnologia SkySails há alguns anos, antes de adicionar à sua frota, em 2011, um navio “multipurpose” de 9.821 DWT equipado com um sistema auxiliar de propulsão eólica da SkySails.

O antigo M/V Beluga Skysails, que após aquisição passou a se chamar M/V BBC Skysails, permitiu a empresa testar essa tecnologia e experimentar sua aplicação.

Dentre as vantagens observada pela empresa, está a quantidade comparativamente pequena de esforço adicional necessária para manuseio e manutenção diários. O sistema de pipa de reboque é totalmente automatizado, e após o treinamento, a tripulação existente pode operar o sistema sem suporte adicional.

Figura 22: M/V BBC Skysails



Fonte: <https://www.skysails.info/en/skysails-marine/skysails-propulsion-for-cargo-ships/operation/>

O navio usa o suporte de propulsão auxiliar da pipa de reboque sempre que as condições do vento permitirem. A BBC Chartering observou uma redução significativa no consumo de óleo combustível através da implementação da solução de pipa de reboque na faixa de 10 a 15% em plenas condições de operação.

Se as condições climáticas forem favoráveis, isso contribui com um alívio de carga do motor de até 2.000 kW. Essa tecnologia não apenas ajuda a economizar nos custos do óleo combustível, mas também apoia a política ambiental com relação à redução de emissões. Além de testar os benefícios do suporte de propulsão de pipa de reboque, a BBC Chartering também embarcou na implementação do SkySails Fuel Performance Monitor. A instalação do hardware necessário foi executada sem complicação durante as operações no porto.

5.6 Princípio de funcionamento

Conforme explicado anteriormente, a pipa de reboque é o núcleo da propulsão do sistema SkySails. Juntamente com a cápsula de controle e a corda de reboque, forma-se o chamado “sistema de voo”. Dirigido pela cápsula de controle, a pipa de reboque executa manobras de voo dinâmicas regulares no ar em frente ao navio para gerar propulsão. Esta força de tração é transmitida ao navio através de um cabo de reboque feito de fibra sintética de alta resistência. Um cabo especializado integrado nesta corda garante o fornecimento de energia para o painel de controle e a comunicação com o sistema de controle da embarcação.

A pipa de reboque específica é feita de tal forma que pode ser elevada até a sua elevação adequada e depois trazida de volta com a ajuda de um mastro telescópico que permite que a pipa seja içada de forma adequada e eficaz. Isso ajuda a facilitar a melhor velocidade possível para a embarcação. Todo o processo do mastro elevando e depois recolhendo o skysail de volta, leva algo entre 10-20 minutos e é uma visão esplêndida para ver. Outro aspecto importante que deve ser notado sobre os skysails envolvidos é que eles podem ser levantados somente quando o vento estiver certo, porque o skysail não funcionará de forma eficaz na geração da velocidade requerida para a embarcação.

Pode-se dizer que a forma do skysail toma a forma de um parapente quando é realmente alto no céu; e no que diz respeito à aceleração do navio, skysails permitem que uma embarcação

gere uma velocidade que seja facilmente cinco a 25 vezes mais potente do que as velas rotineiramente usadas.

5.6.1 Lançamento

Os oficiais do navio operam o sistema SkySails usando um painel de controle instalado na ponte. O processo de lançamento e recuperação é parcialmente automatizado e requer apenas algumas ações simples da equipe na proa.

Figura 23: Voo - Painel de Controle no passadiço 1



Fonte: <https://www.skysails.info/en/skysails-marine/skysails-propulsion-for-cargo-ships/operation/>

Figura 24: Painel de Controle no passadiço 2



Fonte: <https://www.skysails.info/en/skysails-marine/skysails-propulsion-for-cargo-ships/operation/>

Para o lançamento, o mastro telescópico primeiramente levanta a pipa de reboque, que é dobrada como um acordeão, dentro do seu compartimento de armazenamento. O mastro, em seguida, se estende para cima, de forma que após isso, a pipa se desenrola até o seu tamanho total e está pronta para ser lançada. O guincho, então, libera a corda de reboque até que a pipa atinja sua altitude de operação.

Figura 25: Lançamento da Pipa 1



Fonte: <https://www.skysails.info/en/skysails-marine/skysails-propulsion-for-cargo-ships/operation/>

Figura 26: Lançamento da Pipa 2



Fonte: <https://www.skysails.info/en/skysails-marine/skysails-propulsion-for-cargo-ships/operation/>

5.6.2 Voo

A pipa de reboque é controlada automaticamente em todos os momentos durante o voo e o lançamento da mesma é feito através de guincho que libera cabo suficiente até atingir a altura ideal de navegação. Um software de piloto automático garante que a pipa de reboque voe padrões definidos com base na direção e velocidade do vento, bem como a velocidade do navio, de modo que ele gere propulsão ideal. O painel de controle do SkySails no passadiço mantém os oficiais do navio sempre informados sobre o status operacional do sistema.

Os sistemas de segurança e backup de vários níveis da propulsão SkySails garantem operações seguras do navio. Ações de emergência podem ser iniciadas a partir da ponte com o pressionar de um botão.

Figura 27: Voo 1



Fonte: <https://www.skysails.info/en/skysails-marine/skysails-propulsion-for-cargo-ships/operation/>

Figura 28: Voo 2



Fonte: <https://www.skysails.info/en/skysails-marine/skysails-propulsion-for-cargo-ships/operation/>

5.6.3 Recolhimento

O recolhimento da pipa de reboque é executado na ordem inversa ao do lançamento: o guincho retrai a corda de reboque e a pipa é encaixada no mastro. A pipa de reboque é então

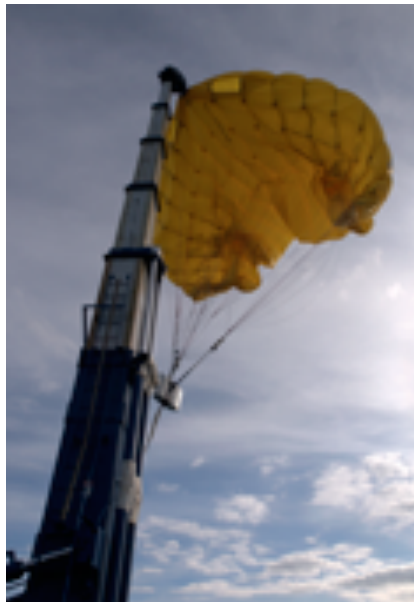
guardada, e após isso, o mastro telescópico se retrai e a pipa e a base de controle são baixadas para o compartimento de armazenamento.

Figura 29: Recolhimento da pipa 1



Fonte: <https://www.skysails.info/en/skysails-marine/skysails-propulsion-for-cargo-ships/operation/>

Figura 30: Recolhimento da pipa 2



Fonte: <https://www.skysails.info/en/skysails-marine/skysails-propulsion-for-cargo-ships/operation/>

5.7 Material das pipas

A lona usada em skysails é sintética e, portanto, durável quando se trata de chuvas e tempestades. Também deve ser notado que a energia que é fornecida pelo Skysails para impulsionar o navio para vante é passada através de um fio ou cabo que é estruturado dentro do cabo de reboque, que é utilizado para elevar a pipa até à altura desejada. A corda de reboque também é sintética em termos do material usado e, portanto, é igualmente durável.

6 Conclusão

O Acordo de Paris a partir de 2020 entra em vigor e se torna uma realidade de forma que as empresas de navegação terão que se ajustar para atender as novas exigências. As fontes de energia renovável já existem no mercado, no entanto ainda não são muito bem difundidas como propulsão para embarcações. Normalmente o armador não é aquele que carrega o navio, logo o gasto de combustível, maior parcela de custo de uma empresa, não fica sob sua responsabilidade. Já o fretador, responsável por arcar com os custos de combustível, aluga o navio por um determinado período de tempo estabelecido em contrato, logo não vê a vantagem de investir em tal tecnologia para algo que não lhe pertence. Essa é sem dúvida a maior barreira a ser vencida.

Para que isso se desenvolva melhor, então, nos próximos anos, devem ser criadas políticas que direcionem para esse caminho sustentável, como a precificação do carbono, cobrando das empresas uma taxa para quantidade de CO₂ que as mesmas emitirem. Só assim, as empresas de navegação se verão forçadas a melhorar suas frotas independente de armador ou fretador arcando com os custos.

E opções para essas melhorias já existem. A energia eólica é uma delas e ao longo deste documento, fica evidente quão vantajosa ela é. As economias com combustível são expressivas, e a diminuição de GEE e CO₂ para a atmosfera são bem consideráveis. Estima-se que cerca de 20.000 navios ao redor do mundo possam ser melhorados com tais tecnologias como os rotores Flettner e as Pipas de Reboque aqui desenvolvidos; faltando apenas o interesse por parte dos armadores para tornar isso realidade.

A natureza está clamando por socorro e os desastres ambientais estão cada vez mais recorrentes ao redor do globo; logo é vital a conscientização generalizada de que as mudanças são necessárias e urgentes. Meios já temos para resolver.

REFERÊNCIAS

- BERGESON, L. **Wind Propulsion for ships of the American merchant marine**. Washington: U.S. Dept. of Commerce, 1981.
- CLAYTON, B. R. **Wind Assisted Ship Propulsion**. Physics in Technology, 1987.
- DASGUPTA, Soumyajit. Aghia Marina: **The World's Largest Vessel Equipped with Kite Power Technology**. Marine Insight. 21 de jul. 2016. Disponível em: <<https://www.marineinsight.com/green-shipping/aghia-marina-the-worlds-largest-vessel-equipped-with-kite-power-technology/>>. Acessado em: 10 de abr. 2019.
- ENERCON GmbH. **'Rotor sail ship E-Ship 1 saves up to 25% fuel'**. Enercon Press release: 29th July 2013.
- GERMAN Museum of Technology. **The Flettner Rotor – An Invention Ahead of Its Time? Special exhibition in the shipping section of the German Museum of Technology**. 2010. Disponível em: <<http://www.sdtb.de/Flettner-Rotor.1623.0.html>>. Acesso em 16 abr. 2019.
- GILMORE, C. P. **Spin Sail Harnesses Mysterious Magnus Effect for Ship Propulsion**. Popular Science, 1984.
- HENRY, João. **Navios de propulsão eólica**. 2011. Disponível em: <<https://meioseculodeaprendizagens.blogspot.com/2011/05/navios-de-propulsao-eolica.html>>. Acesso em: 12 de abr. 2019.
- INTERNATIONAL Maritime Organisation (IMO), **'RESOLUTION MEPC.203(62)'**, Marine Environment Protection Committee (MEPC) - 62nd session, 11-15 July 2011.
- INTERNATIONAL Maritime Organisation (IMO), **'Technical and Operational Measures'**, Disponível em: <<http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>>. Acesso em: 10 abr. 2019.
- KANTHARIA, Raunek. **Top 7 green ship concepts using wind energy**. 2017. Disponível em: <<https://www.marineinsight.com/green-shipping/top-7-green-ship-concepts-using-wind-energy/>>. Acesso em: 10 de abr. 2019.
- LLOYD'S Register. **What is the future of shipping? Horizons**. 2012. Disponível em: <http://www.lr.org/Images/Horizons_-_What_is_the_future_of_shipping_tcm155-236052.pdf>. Acesso em: 15 de abr. 2019
- LLOYD'S Register. **Wind-powered shipping, A Review of The Commercial, Regulatory and Technical Factors Affecting Uptake of Wind-Assisted Propulsion**. 2015. London: Lloyd's Register Group Ltd.

MESQUITA, João Lara. **Navio movido a energia eólica, e outras, o futuro chegou.** 2018. Disponível em: <<https://marsemfim.com.br/navio-movido-a-energia-eolica/>>. Acesso em: 4 de abr. 2019.

NAAIJEN, Peter. **Performance of auxiliary wind propulsion for merchant ships using a kite.** Disponível em: <<https://www.icmrt07.unina.it/Proceedings/Papers/c/26.pdf>>. Acesso em: 3 de abr. 2019

PASSARINHO, Nathalia (2018). **Por que Brasil se opõe à Europa em corte de emissões de CO2 por navios.** BBC, Londres, 3 de abr. de 2018. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-43629719>>. Acesso em: 4 de abr. de 2019.

PRANDTL, L. **The Magnus effect and wind-powered ships,** 1985.

REHMATULA, N.; SMITH T.; WROBEL, P. **Implementation Barriers to Low Carbon Shipping.** Low Carbon Shipping Conference, London, 2013.

ROJON, I. **Blowin' in the wind? Possibilities of the International Maritime Organization to Promote the Uptake of Wind Propulsion in International Shipping.** Masters Thesis, Utrecht University. Netherlands, 2013.

SEYBOLD, G. S. **A Sailing Ship Without Sails: New Wonder of the Seas.** Popular Science Monthly, 1925.

ZERO Emissions - **World's first skysails-yacht successfully crosses the atlantic.** Skysails. Disponível em: <<https://www.skysails.info/en/skysails-marine/news/details/article//Null-Emissionen-Weltweit-erste-SkySails-Yacht-ueberquert-erfolgreich-den-Atlantik/?cHash=8bc3bf9f153b54823eb572f0e106a529>>. Acessado em: 15 de abr. 2019.

THE PARIS Agreement. **United Nations Climate Change (UNFCCC).** Disponível em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>>. Acesso em: 6 de abr. 2019

THOM, A. **Effects of discs on the air forces on a rotating cylinder.** Aero. Res. Committe. R&M No. 1623. London: Air Ministry, 1934.