

GERAÇÃO DE HÉLICES A PARTIR DE OTIMIZAÇÃO DE GESTÃO ENERGÉTICA E ANÁLISE HIDRODINÂMICA EM CFD

RESUMO

O projeto Hurakan fundado em 2011, da Universidade Estadual de Santa Catarina, participa da competição universitária Desafio Solar Brasil, que propõe uma melhor gestão dos recursos energéticos por meio da criação e desenvolvimento de um catamarã movido à energia solar. Tendo em vista a proposta da competição, cabe à equipe sua adaptação aos desafios que circundam esse cenário. Para atingir a melhor eficiência do barco, houve o desenvolvimento de hélices exclusivas dada as propriedades únicas da navegação, com base no projeto de Mendes (2021), onde o autor desenvolveu uma rotina de programas que geram um hélice da série B-Troost, a partir disso foram geradas 3 hélices aplicadas para cada estilo de prova da competição. Dentre as opções proporcionadas, levando em consideração o gasto computacional para simulação da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), foi escolhida o hélice de 2 pás. A partir disso, houve a obtenção de dados de distribuição da pressão hidrodinâmica e a comparação com a teoria da equação de Bernoulli e conservação de massa. Os resultados foram semelhantes e mostraram o escoamento e os campos de pressões da mesma forma que os pressupostos.

Palavras Chaves: Hélice; Gestão Energética; CFD.

ABSTRACT

The Hurakan project, founded in 2011 by the State University of Santa Catarina (Universidade do Estado de Santa Catarina), participates in the university competition called Solar Challenge Brazil (Desafio Solar Brasil), which aims to improve the management of energy resources through the creation and development of a solar-powered catamaran. Considering the competition's proposal, it is up to the team to adapt to the challenges that surround this scenario. To achieve the best efficiency of the boat, exclusive propellers were developed based on the unique properties of navigation, following Mendes' (2021) project. The author developed a program routine that generates a B-Troost series propeller. Based on this, three propellers were generated and applied for each type of competition event. Among the options provided, given that the computational expense for Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation, a two-blade propeller was chosen. Subsequently, the data of the hydrodynamic distribution pressure were obtained and compared with the theory of Bernoulli's equation and conservation of mass. The results were similar and show the flow and pressure fields in accordance with the presuppositions.

Key Words: Propeller; Energy management, CFD.

INTRODUÇÃO

Ao longo da história, o desenvolvimento marítimo tem papel elementar no desenvolvimento das nações. Em suma, o crescimento do comércio exigiu melhorias nos meios de transporte, impulsionando avanços no setor de comunicações e transportes. No âmbito naval, a substituição da vela pelos motores de combustão interna trouxe consigo o surgimento dos hélices rotacionados, que se mostraram mais eficientes, menores, mais simples e menos propensos a danos do que as rodas de água. Em embarcações de transporte, o objetivo é utilizar hélices eficientes para diminuir os custos e aumentar a lucratividade e gestão energética.

Tendo em vista o contínuo desenvolvimento naval, alinhado com a necessidade de gestão energética em vários âmbitos industriais e sociais, é explorado estudos com foco na gestão energética de uma embarcação do tipo catamarã movida a energia solar. Quatro placas solares são instaladas entre os cascos da embarcação para carregar a bateria quando o barco está desligado e fornecer durante a operação. Destaca-se a elevada importância de um sistema elétrico eficiente e robusto para fornecer à embarcação a devida potência elétrica. No entanto, o desenvolvimento do dispositivo, denominado hélice, que transforma energia rotativa, dada pelo motor, em energia translacional, é de suma importância para o consumo de potência ao longo do funcionamento da embarcação.

Para aumentar a competitividade e adquirir conhecimentos adicionais, a equipe desenvolveu um projeto próprio de hélices otimizadas. É visado aumentar a competitividade no DSB através de um novo projeto de hélice - visando a construção três geometrias de hélices específicas para diferentes situações: uma com enfoque

para sprint, tendo em vista o desempenho; outra para endurance, focando na eficiência propulsiva; e uma terceira para distâncias intermediárias, buscando eficiência propulsiva. Além disso, complementa-se o desenvolvimento com uma Simulação Dinâmica de Fluidos (CFD) com o objetivo de analisar o desempenho das hélices.

FUNDAMENTAÇÃO

Sistema elétrico da embarcação

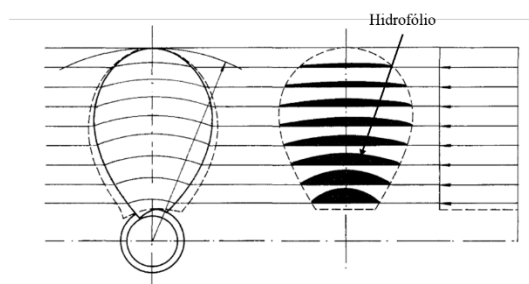
O sistema de energia da embarcação é alimentado por um banco de baterias composto por quatro baterias do modelo D51, com 12V de saída e 38 Ahr de capacidade. As baterias são ligadas em série, fornecendo uma tensão nominal de 48V e capacidade de 38 Ahr. Um conversor de potência é conectado após as baterias para controlar a tensão média do motor elétrico, permitindo assim, o controle da potência de trabalho. De modo que o conversor possui uma eficiência energética de aproximadamente 0.9 -, estando sujeita a variações devido à temperatura ambiente. Assim, o banco de baterias é diretamente conectado ao conversor, este que está ligado em paralelo ao conjunto de placas solares. Em seguida, o motor elétrico, modelo ME1004, é conectado. Ele possui uma eficiência energética de 9000W. Bem como, o sistema foi projetado para permitir que as placas solares carreguem a bateria quando o motor elétrico está inativo, e a bateria alimente o motor quando ele está em operação. As placas solares continuam gerando energia durante o funcionamento do motor, fornecendo um impulso adicional de potência, facilitando que a bateria mantenha a tensão de operação do motor.

Pode-se assumir-se que a quantidade de energia gerada pelas placas solares durante o tempo da prova é consideravelmente menor do que a capacidade da bateria. Este fenômeno serve como uma margem de segurança para evitar que a bateria se esgote completamente durante a prova, tendo em vista que essa simplificação foi feita porque a energia produzida pelas placas solares depende de fatores como a incidência solar e a limpeza das placas, que estão fora do controle durante a prova

Hélice

A hélice é um dispositivo rotativo, normalmente disposta na popa da embarcação, responsável pela propulsão por meio da transformação de energia rotativa em energia cinética translacional (TRINDADE, 2012). A pá da hélice, ao longo de sua extensão radial, é composta por seções de pá os quais tem papel fundamental no funcionamento da hélice (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011).

Figura 1 – Composição da hélice em torno de seções de pá.



Fonte: Stein (2023).

O propulsor, em seu estado rotativo, produz um gradiente de pressão entre as superfícies das pás. Este fenômeno de diferenças de pressões se baseia no Princípio de Bernoulli, dado pela equação (1), que, neste caso, desprezando a variação de altura do escoamento, quando a velocidade de uma partícula aumenta ao longo de uma linha de corrente, a pressão diminui. Além disso, esse fenômeno também ocorre devido ao princípio da conservação de massa dado pela equação (2), para um fluido incompressível (MOLLAND; TURNOCK, 2007).

$$P_o + \rho \frac{V_1^2}{2} + \rho gh_1 = P_2 + \rho \frac{V_2^2}{2} + \rho gh_2 \quad (1)$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2)$$

Conforme estes princípios, e dado que um propulsor possui infinitas seções na pá, conhecidas também como hidrofólio, ao rotacionar, as partículas de água que escoam pela parte convexa do hidrofólio percorrem um caminho maior, acelerando e criando uma região de baixa pressão. Esta região de baixa pressão acaba gerando o efeito de “sucção” do propulsor (STEIN, 2023).

Geometria de hélice

Conforme Stein (2023), hélices possuem séries sistemáticas que definem os seus parâmetros geométricos em função de parâmetros de desempenho. Entre as séries, destaca-se a série de Wageningen ou B-troost, sendo uma das mais utilizadas em projetos de propulsores navais (CARLTON, 2007). Esta série consiste em mais de 130 geometrias diferentes que foram definidas e construídas variando os seguintes parâmetros (KUIPER, 1992):

- Razão de áreas - razão entre a menor área que circunscreve a hélice e a soma das áreas das faces das pás;
- Diâmetro – duas vezes a distância do centro da hélice até o extremo da pá;
- Passo – distância em uma hélice percorre ao executar uma revolução;
- Número de pás – quantidade de pás na hélice.

A avaliação de desempenho dessas hélices foi realizada por meio de testes e diagramas de água aberta. O diagrama é construído com base em curvas dos coeficientes adimensionais K_t (Equação 3), K_q (Equação 4) e J (Equação 5), que são dependentes dos parâmetros geométricos mencionados anteriormente, bem como do empuxo, torque e velocidade da corrente livre (KUIPER, 1992).

$$K_t = \frac{T}{(\rho * n^2 * D^4)} \quad (3)$$

$$K_q = \frac{Q}{\rho * n^2 * D^5} \quad (4)$$

$$J = \frac{v}{(n * D)} \quad (5)$$

Métodos de Simulação Numérica

Conforme Alves (2007), os métodos numéricos são fundamentados na validação experimental ou prática por meio da formulação de um modelo a partir de princípios físicos, utilizando a técnica de discretização de um modelo contínuo. Segundo Stein (2023), durante discretização de um modelo, o conjunto de equações diferenciais de um domínio contínuo - que possuem infinitos graus de liberdade e que regem o problema - é transformado em equações algébricas no domínio discreto, em função de um número finito de graus de liberdade. De acordo com Alves (2007), existem algumas vantagens de se utilizar métodos numéricos como: redução de custo e tempo de projeto; elevado número de informações disponíveis após a solução; simular condições complexas; e viabilização de otimização. De acordo com Stein (2023), os principais métodos utilizados estão o Método das Diferenças Finitas (FDM), Método de Elementos Finitos (FEM) e Método de Volumes Finitos (FVM). Para simulações de dinâmica de fluidos computacional, o método de volumes finitos é comumente empregado, tendo vantagem em relação ao uso de memória, rapidez de processamento, especialmente quando se trata número de Reynolds alto. No FVM, as equações de governo de Navier-Stokes (equações parciais diferenciais), as equações de conservação de massa e energia, e as de turbulência são desenvolvidas de forma conservativa, e então, solucionadas diante de controle de volumes discretos.

O sistema de energia da embarcação é alimentado por um banco de baterias composto por quatro baterias do modelo D51, com 12V de saída e 38 Ahr de capacidade. As baterias são ligadas em série, fornecendo uma tensão nominal de 48V e capacidade de 38 Ahr. Um conversor de potência é conectado após as baterias para controlar a tensão média do motor elétrico, permitindo assim, o controle da potência de trabalho. De modo que o conversor possui uma eficiência energética de aproximadamente 0.9

-, estando sujeita a variações devido à temperatura ambiente.

Outros aspectos abordados, são as baterias recarregadas pelas placas solares antes das provas e durante a competição. A embarcação possui quatro placas solares modelo JKM265p-60, conectadas em paralelo sobre o casco, que geram em média 250W cada durante a incidência solar máxima. Ademais, um diodo elétrico é usado na saída das placas solares para permitir que os elétrons fluam apenas em direção ao motor ou à bateria -, mesmo quando as placas solares têm baixo potencial; como em baixa incidência solar ou quando há formação de sal sobre elas devido à evaporação da água do mar durante as provas.

Assim, o banco de baterias é diretamente conectado ao conversor, este que está ligado em paralelo ao conjunto de placas solares. Em seguida, o motor elétrico, modelo ME1004, é conectado. Ele possui uma eficiência energética de 9000W. Bem como, o sistema foi projetado para permitir que as placas solares carreguem a bateria quando o motor elétrico está inativo, e a bateria alimente o motor quando ele está em operação. As placas solares continuam gerando energia durante o funcionamento do motor, fornecendo um impulso adicional de potência, facilitando que a bateria mantenha a tensão de operação do motor.

À proporção que os cálculos foram realizados, assumiu-se que a quantidade de energia gerada pelas placas solares durante o tempo da prova é consideravelmente menor do que a capacidade da bateria. Este fenômeno serve como uma margem de segurança para evitar que a bateria se esgote completamente durante a prova, tendo em vista que essa simplificação foi feita porque a energia produzida pelas placas solares depende de fatores como a incidência solar e a limpeza das placas, que estão fora do controle durante a prova.

Ao realizar uma análise energética no motor, considerando-o em operação e a embarcação em velocidade de cruzeiro, enfrentando uma resistência constante à rotação. Sabendo que, a potência elétrica fornecida ao motor é determinada pela equação de Ohm, onde a corrente elétrica multiplicada pela tensão resulta na potência elétrica. Entende-se que a corrente elétrica que chega ao motor é relacionada à capacidade da bateria, conforme determinada equação que leva em consideração o tempo de descarga da bateria. No entanto, parte da energia fornecida pela bateria é dissipada como energia térmica pelo conversor de potência. Portanto, a eficiência energética do conversor de potência é considerada para calcular a corrente elétrica que chega ao motor.

Tendo em vista que o tempo de prova é relacionado ao tamanho da prova e à velocidade da embarcação através

da equação do movimento uniforme -, ao substituir as equações anteriores na equação de potência elétrica, é obtida a potência máxima em que o motor elétrico pode operar durante a prova, considerando a capacidade da bateria. Diante do exposto, foram analisadas as potências requeridas nos pontos mais críticos da prova, como a carga da bateria em 33% e incidência solar baixa, resultando em uma potência de operação de 0.7 kW. Também foi analisada a prova de sprint com a carga da bateria em 100%, resultando em uma potência máxima de 21,275 kW. No entanto, nessa situação, o motor elétrico tem uma limitação máxima de 10 kW.

Utilizando o software Maxsurf V11 e o desenho 3D da embarcação, foi feita uma simulação considerando todos os componentes e seus pesos. Essa etapa é de suma importância, pois os componentes afetam o centro de massa da embarcação, causando uma inclinação em relação ao plano da água, conhecida como *trim*. O *trim* tem influência na navegabilidade e estabilidade da embarcação, sendo um parâmetro importante a ser considerado para obter o melhor desempenho em diferentes condições de mar.

A simulação realizada utilizou da teoria do corpo fino, também chamada de *Slender body*. Dessa maneira, o casco da embarcação foi discretizado em uma malha de quadriláteros, onde pontos de origem foram posicionados no centro de cada quadrilátero -, as forças foram calculadas individualmente em cada origem, levando em consideração a inclinação com a superfície do casco. Assim, o software Maxsurf estimou a resistência ao avanço da embarcação em operação.

No panorama abordado, dentro do projeto do hélice surge uma complicação especial devido à velocidade de avanço da embarcação, uma vez que a eficiência do hélice é determinada pelo coeficiente de avanço, que é função da velocidade. Portanto, buscou-se uma maneira de encontrar esse coeficiente de avanço.

Inicialmente, considera-se a embarcação navegando a uma velocidade constante. Nessa situação, a força exercida pelo hélice na direção do deslocamento da embarcação tem o mesmo módulo -, mas em direção oposta à decomposição da força resultante das forças resistivas ao movimento no sentido de deslocamento da embarcação. Desta forma, é possível igualar o coeficiente de força propulsiva do hélice ao coeficiente da embarcação, definindo assim o coeficiente de binário, de avanço e eficiência.

Sabe-se que o coeficiente de força propulsiva é calculado considerando a resistência ao avanço da embarcação, que é obtida a partir da simulação do casco em movimento. O coeficiente redutor de força propulsiva, denotado por t^* , é uma função do número de hélices e do

coeficiente de esteira. O coeficiente de esteira da embarcação, ao ser estimado aproximadamente -, é função do número de hélices, do coeficiente de bloco, do volume de carena, da altura do calado e da correção do coeficiente de esteira causada pela aproximação.

Ademais, a correção do coeficiente de esteira é determinada pelo número de Froude, sendo nula se o número de Froude for menor que 0.2. Se não demonstrar tais características, é simplesmente calculada como 0.1 vezes a diferença entre o número de Froude e 0.2. Mantendo em vista que o número de Froude é calculado com base na velocidade da embarcação, a aceleração da gravidade e o comprimento da linha d'água.

Ao substituir as equações relevantes na equação que relaciona o coeficiente de avanço com a resistência ao avanço, é possível obter uma função quadrática que vincula essas variáveis. Essa função em específico, pode ser utilizada para encontrar o valor do coeficiente de avanço por meio do ponto de interseção das curvas de coeficiente de avanço e coeficiente de força propulsiva - essas curvas são conhecidas pelos diagramas de água livre da série B.

No entanto, quando se trabalha com muitas geometrias de propulsores e suas combinações, é inviável usar o método descrito acima. Nesse caso, é necessário utilizar um método numérico que permita a análise de um grande conjunto de geometrias. Para esse propósito, foi aplicada uma regressão na série B, simplificando o problema em duas séries que ao serem resolvidas, retornam os valores dos coeficientes de avanço e de binário.

Uma vez que se tenha conhecimento do coeficiente de avanço, é possível calcular os coeficientes de força propulsiva, de binário e a eficiência do propulsor. Em suma, essa abordagem é especialmente útil quando se deseja selecionar a melhor combinação de parâmetros a partir de diversas possibilidades.

Geração de malha

De acordo com Stein (2023), a geração da malha é uma etapa anterior à da solução de métodos numéricos e representa o domínio físico de forma discreta (MALALASEKERA; VERSTEEG, 2007). Esta ferramenta pode ser entendida como sendo uma divisão, em elementos geométricos, do domínio físico contínuo para um domínio discretizado, sendo indispensável para a solução em métodos de volumes finitos e elementos finitos Liseikin (2009).

Modelos de turbulência

Conforme Stein (2023), existem três regimes de escoamento de fluidos: laminar, transiente laminar-turbulento e turbulento (HAMI, 2021). O regime laminar é caracterizado por um fluxo estável, onde as partículas se movem em camadas finas ou lâminas (FOX *et al.*, 2014). O regime transiente ocorre durante a transição entre os regimes laminar e turbulento, apresentando pequenas deformações nas linhas de corrente (HAMI, 2021). Já o regime turbulento é caracterizado pela instabilidade do escoamento, o que transfere mais momento e energia ao sistema (FOX *et al.*, 2014). Para definir o comportamento de um fluido em movimento, é necessário conhecer as três componentes de velocidade e a pressão. Para solucionar esse problema de quatro incógnitas, pode ser utilizada as equações de continuidade, e as equações de Navier-Stokes (STEIN, 2023). No entanto, para resolver estas equações, utiliza-se de métodos numéricos. Entre eles, destaca-se o método das médias de Reynolds da Equação de Navier-Stokes (RANS). Este método considera que o escoamento, dado pelas quatro incógnitas anteriores, ocorre em um perfil médio de velocidades. Dentro dos métodos RANS, destaca-se o método SST k- ω , que nada mais é do que a junção do método k- ϵ , que melhor define o escoamento na corrente livre, com o método k- ω , que apresenta melhores resultados no escoamento próximo a parede, normalmente turbulento (STEIN, 2023).

No entanto, a definição do escoamento em regiões próximas a parede possui elevada complexidade, requerendo um custo computacional elevado, visto que, para capturar o regime turbulento e forças viscosas que o fluido exerce na parede da pá, é necessário um refino de malha (STEIN, 2023).

Para mensurar a qualidade da resolução de um resultado próximo a parede, utiliza-se o parâmetro y^+ , o qual é um adimensional em função das propriedades do fluido, da velocidade do escoamento e da distância da parede. Para o modelo SST k- ω , recomenda-se o valor de 1 (STEIN, 2023).

METODOLOGIA

Neste capítulo, será abordado os métodos de seleção de geometrias de hélice, de forma que se obtenha o desempenho mais eficiente para cada prova da competição DSB, e estratégias utilizadas para realizar a simulação em CFD. A hélice foi selecionada com base no trabalho realizado por Mendes (2022), onde o autor desenvolve uma técnica para geração geométrica de hélices da série B-Troost. A técnica se resume à delimitação de parâmetros de interesse e seus intervalos de trabalho, de acordo com limitações físicas da embarcação, teóricas da série de estudo B-Troost e práticas da competição DSB. Em especial, o parâmetro P/D,

geralmente considerado uma variável, foi tratado como uma constante, devido à relação de transmissão que não poderia ser alterada na embarcação. Para o cálculo da velocidade da embarcação, especialmente complicado por ser considerado um dado tanto de entrada quanto de saída para o projeto de hélice, são feitas iterações com velocidades aproximadas até que converjam para um valor. Primeiramente, para cada combinação de parâmetros, é estimado uma velocidade e calculado a resistência ao avanço da embarcação, a partir da função 6 abaixo, derivada de simulação do barco na água:

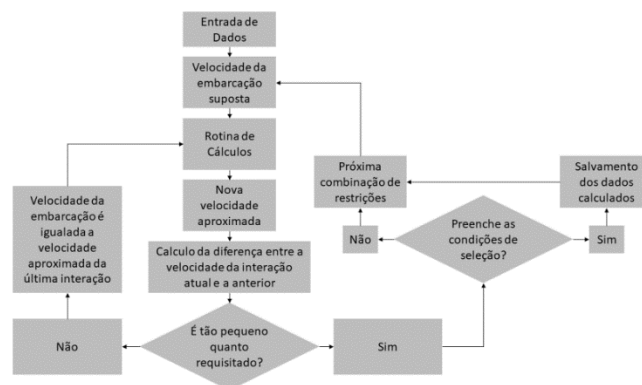
$$R_t(v) = -0,02v^6 + 0,65v^5 - 6,13v^4 + 25,53v^3 - 33,08v^2 + 24,27v - 1,97 \tag{6}$$

A partir de ambos os dados e da série sistemática B-Troost, é estimado a eficiência propulsiva e a potência (BHP) necessária para atingir a velocidade estimada no início. Por fim, com o valor de BHP, é possível estimar a velocidade da embarcação, a partir da função 7 abaixo, também extraída da simulação da embarcação em água.

$$v(BHP) = -2 \times 10^{-22}BHP^6 + 6 \times 10^{-18}BHP^5 - 9 \times 10^{-14}BHP^4 + 7 \times 10^{-10}BHP^3 - 2 \times 10^{-6}BHP^2 + 0,004 + 0,8681 \tag{7}$$

Então, é feita a diferença entre a velocidade estimada inicialmente e a resultante da equação, a fim de que seja tão pequena quanto o requisitado. A velocidade estimada inicialmente será alterada até que essa condição seja cumprida. Todo o processo foi feito a partir de uma rotina em Python, esquematizada abaixo na Figura 2, alternando os parâmetros iniciais a fim de obter as combinações que geram a maior eficiência do hélice. Esses parâmetros, então, são salvos em uma planilha de Excel para análise posterior.

Figura 2 – Esquema do algoritmo utilizado



Fonte: Mendes (2022)

Parâmetro	Valor
-----------	-------

*Este artigo foi desenvolvido com base nos trabalhos de Mendes (2022) e Stein (2023).

Diâmetro [mm]	300
Número de Pás	2
Razão Passo/Diâmetro	0,81
Razão de Áreas	0,3

A partir da geração da geometria, é possível realizar a simulação em CFD. Dado o custo computacional das simulações, optou-se por selecionar um propulsor com base no número de pás (2), resultando em um gasto computacional menor, visto que as outras hélices geradas por Mendes (2022) possuem um número de pás superior. A hélice selecionada para análise pode ser observada na Figura 2 assim como as suas propriedades geométricas na Tabela 1.

Para realizar a simulação em CFD, é necessário determinar um domínio estático e rotativo. A dimensão dos domínios, comumente, é determinada em função do diâmetro da hélice. Na Tabela 2, Stein (2023) realizou um levantamento dos tamanhos dos domínios de algumas literaturas que estudaram e realizaram simulação em CFD de propulsores navais.

Tabela 2 – Levantamento dos tamanhos dos domínios de literaturas em simulação CFD de propulsores navais.

Distância entrada-hélice	Distância a hélice – saída	Diâmetro Domínio rotativo	Diâmetro Domínio Estático	Autor
2,5D	4,5D	Não informado	6,5D	(HEYDARI; SADAT-HOSSEINI, 2020)
2D	6D	1,4D	1.8D	(MORGUT; NOBILE, 2015)
2D	2D	Não informado	3,5D	(TAYLOR et al., 2015)
3D	4D	Não informado	4D	(TU, 2019)
3D	5D	Não informado	5D	(SHOUMAN ; HELAL, 2021)

Fonte: Stein (2023).

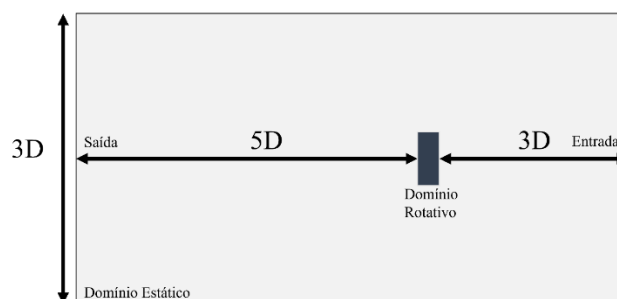
Ao analisar a Tabela 2, é possível observar um padrão consistente nos valores apresentados. No entanto, não foram identificadas convenções específicas em relação às dimensões dos domínios. Dessa forma, entendendo que é necessário simular uma condição próxima a realidade, sem que o tamanho dos domínios interfira nos resultados, foram determinadas as dimensões (Tabela 3). Porém, é importante ressaltar que, quanto maior o domínio, maior será o custo computacional (STEIN, 2023).

Tabela 3 – Dimensões dos domínios estático e rotativo

Domínio	Distância/Dimensão	Valor
Estático	Saída - Hélice	5D
Estático	Entrada - Hélice	3D
Estático	Diâmetro	3D
Rotativo	Diâmetro	1,2D
Rotativo	Comprimento	0,15D

Fonte: Stein (2023).

Figura 3 – Dimensões do Domínio Estático em relação ao diâmetro da hélice.



Fonte: Stein (2023).

Geração de Malha

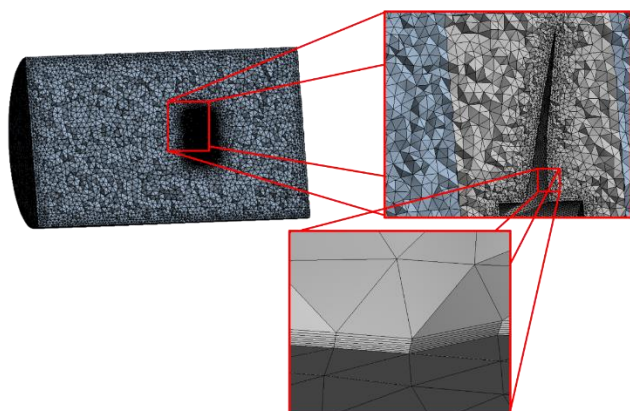
É de elevada importância que a discretização do problema seja realizada com uma qualidade que conduza à uma solução adequada do problema (STEIN, 2023). Nesse sentido, optou-se pelo uso da malha não-estruturada, com poliédricos, por se adequarem melhor a superfícies complexas e possibilitarem uma solução adequada em um menor tempo. Foram utilizadas as ferramentas *face sizing* na hélice, a ferramenta *contact sizing*, um *sizing* no domínio estático, e a ferramenta *inflation* nas paredes internas do domínio rotativo, as quais representam a hélice. Esta ferramenta incorpora à malha pequenos elementos normais à superfícies, melhorando a solução em baixo números de Reynolds (MURPHY, 1984).

Tabela 4 – Características da malha utilizada nos domínios estático e rotativo

Ferramenta	Domínio/Parede	Tamanho de elemento
Contact sizing	Estático e Rotativo	8 mm
Face sizing	Hélice	2 mm
sizing	Estático	20 mm
Inflation	Rotativo	0,025 mm (Primeira camada)

Fonte: Stein (2023).

Figura 4 – Malha Poliedrica gerada para simulação CFD



Fonte: Stein (2023).

Preparação da solução

Com base nas características dos modelos de turbulência, foi determinado que o modelo SST $k-\omega$ seria a escolha mais adequada para o modelo proposto devido à sua capacidade de gerar resultados adequados em escoamentos de corrente livre e próximos à parede. Além da consideração do modelo de turbulência, é essencial definir as condições de contorno para resolver o problema. De acordo com (MASOOMI; MOSAVI, 2021), o maior empuxo que a hélice sofre é quando o coeficiente de avanço é zero. Nesse sentido, foi definido uma velocidade de entrada muito pequena, de 0,1 m/s, com coeficiente de avanço $J=0,01$. Na Tabela 4 são descritas as condições de contorno utilizadas (STEIN, 2023).

Tabela 5 – Condições de contorno aplicadas nos domínios estático e rotativo.

Condição de Contorno	Valor	Local de Aplicação
Velocidade de entrada [m/s]	0,1	Domínio Estático
Pressão de Saída [Pa]	107000	Domínio Estático
Rotação [rpm]	0	Domínio Estático
Rotação [rpm]	1125	Domínio Rotativo
Time Step	0,0018s	Domínio Estático e Rotativo

Fonte: Stein (2023)

4-RESULTADOS

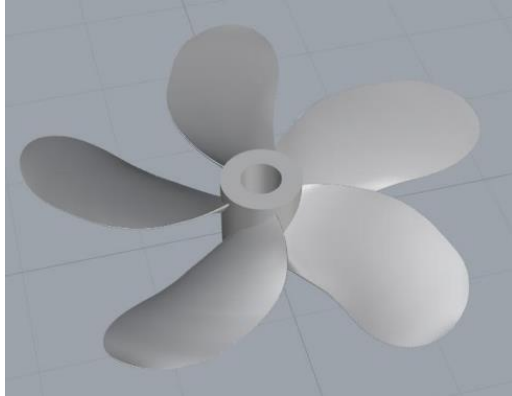
Foi conduzida uma análise de desempenho da embarcação em três tipos de provas: sprint, endurance e para distâncias intermediárias, a partir da combinação dos parâmetros otimizados. Com o objetivo de alcançar um desempenho ideal em cada uma dessas provas, foram desenvolvidas três hélices distintas.

Prova de Sprint

Devido à potência máxima do teste ser maior do que a potência do motor, durante o processo de aproximação de velocidade, uma velocidade superior ao limite é alcançada, impossibilitando a retenção dessa combinação de parâmetros. A geometria com melhor eficiência propulsiva foi selecionada, levando em consideração um tamanho de teste próximo a um quilômetro, nesse caso, três quilômetros

- Diâmetro (D) = 0,24m;
- Número de pás (Z) = 5;
- Razão de áreas (EAR) = 0,6;
- Razão passo-diâmetro (P/D) = 0,5;
- Eficiência propulsiva (η_0) = 0,47;
- Potência do motor (P_{motor}) = 9991,38 W.

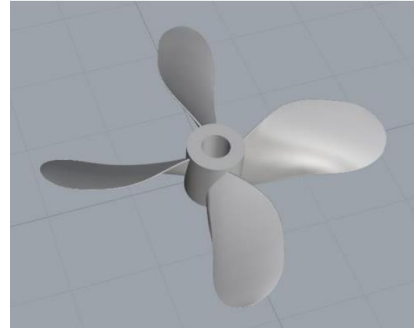
Figura 5 – Geometria dedicada a prova de sprint.



Fonte: Mendes (2022)

- Potência do motor (P_{motor}) = 1900 W

Figura 6 – Geometria dedicada a prova de endurance.



Fonte: Mendes (2022)

Prova de Endurance

A partir dos dados filtrados para a prova de 10 quilômetros, foram encontradas várias combinações de parâmetros que atenderam aos critérios estabelecidos. Destas, foi analisada aquela que possuía a maior eficiência propulsiva. No entanto, essa combinação era composta por uma hélice de 7 pás, o que traria complicações no processo de fabricação. Portanto, foi escolhida a geometria com a segunda maior eficiência propulsiva, cujos parâmetros são:

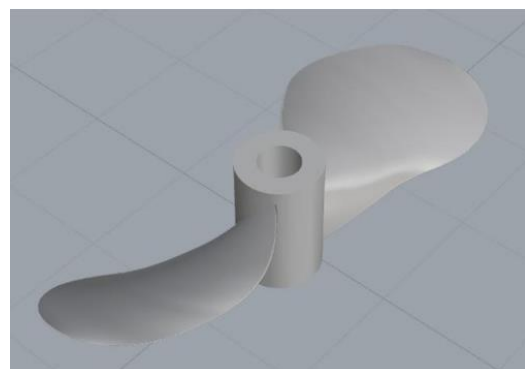
- Diâmetro (D) = 0,3m;
- Número de pás (Z) = 4;
- Razão de áreas (EAR) = 0,4;
- Razão passo-diâmetro (P/D) = 1,35;
- Eficiência propulsiva (η_0) = 0,68;

Distâncias intermediárias

Para uma faixa maior de distâncias otimizadas, foi escolhida uma distância mediana entre as outras provas. Dessa forma, a geometria otimizada para distâncias de 6 e 7 quilômetros foi selecionada, e a combinação que oferecesse a maior eficiência propulsiva foi escolhida. Os parâmetros dessa hélice são:

- Diâmetro (D) = 0,3m;
- Número de pás (Z) = 2;
- Razão de áreas (EAR) = 0,3;
- Razão passo-diâmetro (P/D) = 0,81;
- Eficiência propulsiva (η_0) = 0,77;
- Potência do motor (P_{motor}) = 4442,72W.

Figura 7 – Geometria dedicada a provas intermediárias.



Fonte: Mendes, 2022

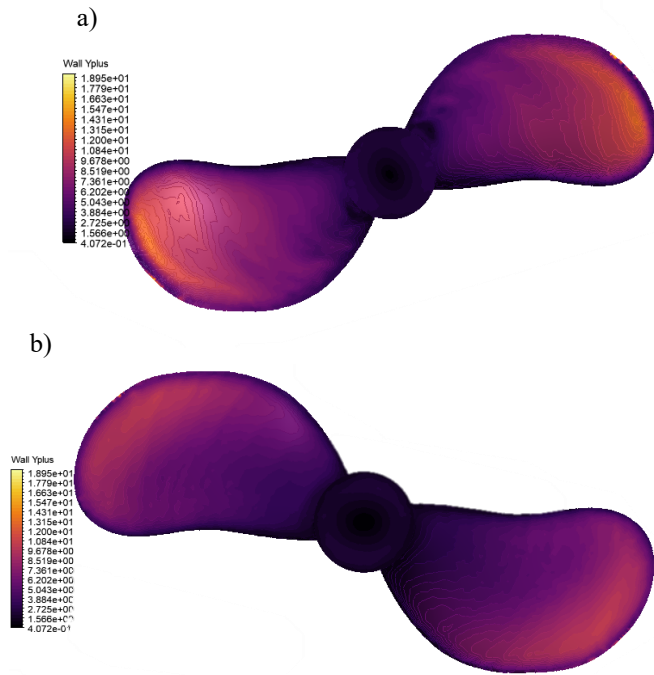
SIMULAÇÃO NÚMERICA POR CFD

A simulação em CFD foi realizada com tempo de simulação de 1,65s, baseado na estabilização dos

parâmetros residuais da simulação e pelo desenvolvimento do escoamento por todo domínio estático, até a saída (STEIN, 2023).

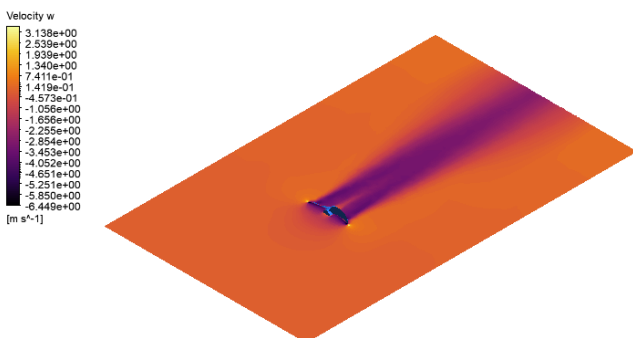
Stein (2023) alcançou valores máximo de 19,33 para o y^+ como observa-se na Figura 13. No entanto, os valores médios de y^+ ficam em torno de 10. Considerando que um refinamento adicional da malha resultaria em um maior custo computacional, foi decidido prosseguir com o estudo com base nesses resultados.

Figura 13 – Contornos de y^+ : (a) No lado sucção da hélice; (b) No lado de pressão da hélice.



Espera-se que haja um aumento de velocidade e um gradiente de pressão causado pela rotação do propulsor nos domínios. Esse comportamento pode ser observado pela Figura 8 e Figura 9. Além disso, pode-se observar na Figura 8 o aumento de velocidade do fluido assim que ele passa pela pá da hélice, e uma redução da velocidade à medida que ele se distancia do domínio rotativo (STEIN, 2023).

Figura 81 – Contorno de velocidade na direção Z.



Fonte: Stein (2023).

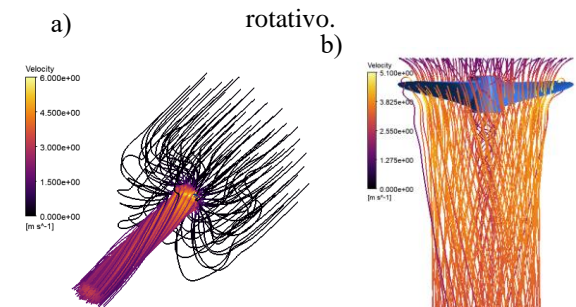
Figura 9 – Contorno da pressão no domínio rotativo



Fonte: Stein (2023)

Na Figura 10, é possível analisar as linhas de corrente do escoamento da hélice. Percebe-se que o escoamento de corrente livre apresenta um retorno na sua trajetória causado pela propulsor. Além disso, na Figura 10b, observa-se o aumento de velocidade do fluido assim que ele passa pela hélice (STEIN, 2023).

Figura 10 – Linhas de Corrente do escoamento partindo: (a) Entrada do domínio estático; (b) Entrada do domínio



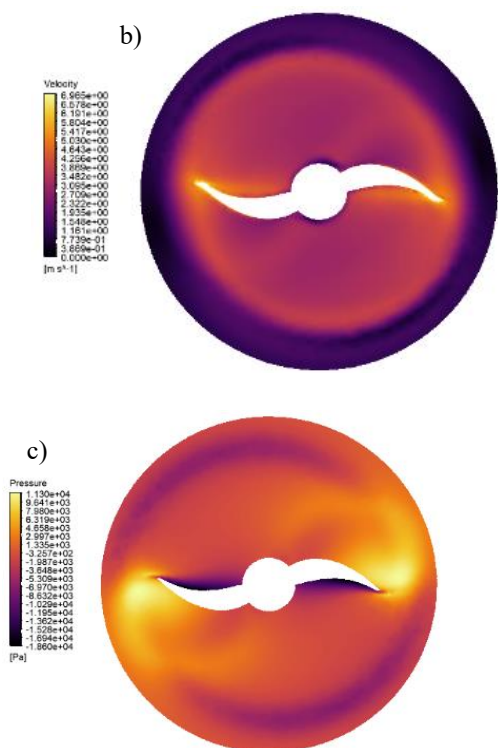
Fonte: Stein (2023)

Na Figura 11, pode-se observar o contorno velocidade de um plano perpendicular ao escoamento gerado pela hélice. Em (TAN *et al.*, 2019), foi observado pelo autor que o escoamento se concentra entre as pás (Figura 11), sendo que as linhas de corrente iniciam do domínio estático caminham à região de baixa pressão. No entanto, (TAN *et al.*, 2019) encontra as maiores velocidade no meio da pá, enquanto a Figura 10 mostra que as maiores velocidades se encontram no extremo da pá. Além disso, na Figura 10c, fica claro o gradiente de pressão que ocorre entre as duas faces da hélice.

Figura 11 – (a) Linhas de corrente no plano perpendicular ao escoamento axial; (b) Contorno da magnitude da velocidade no plano perpendicular ao escoamento axial;

*Este artigo foi desenvolvido com base nos trabalhos de Mendes (2022) e Stein (2023).

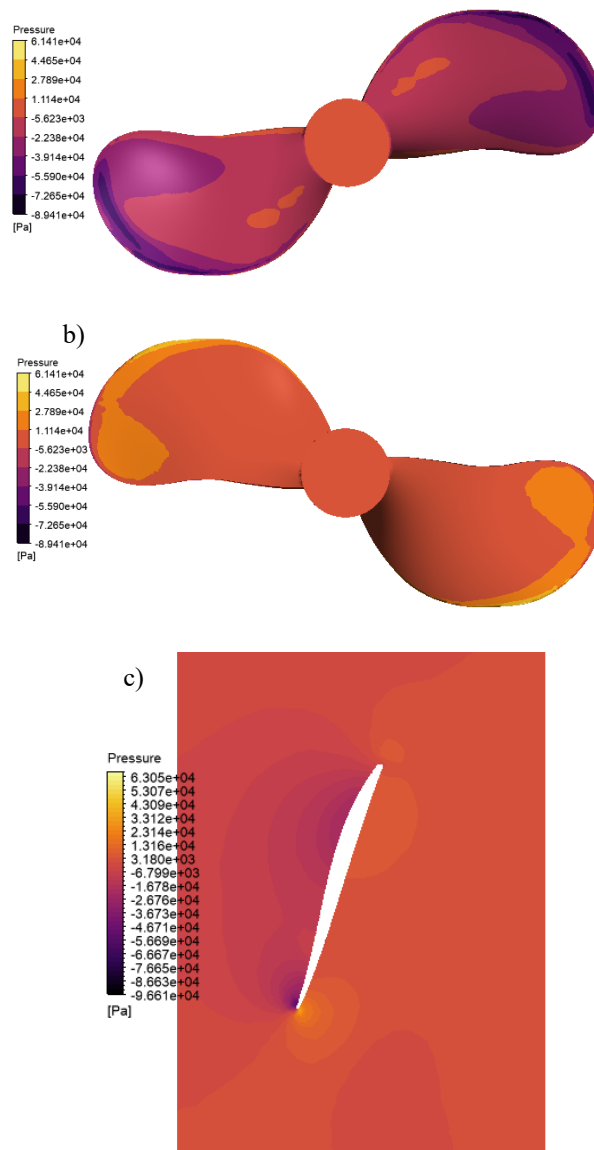
(c) Contorno do campo de pressão no plano perpendicular ao escoamento axial.



Fonte: Stein (2023)

Conforme Stein (2023), Na Figura 11, pode-se observar o padrão de pressão que atua no propulsor na região de pressão e de sucção. Conforme discutido anteriormente, espera-se um gradiente de pressão entre as faces da hélice devido aos princípios de Bernoulli e conservação de massa. Analisando a Figura 11a, é evidente que a face traseira da hélice exibe uma região de baixa pressão, sendo mais pronunciada nas extremidades da hélice. Por outro lado, na Figura 11b, vemos a face frontal da hélice apresentando pressões mais altas, especialmente nas pontas das pás. A Figura 11c confirma a existência do gradiente de pressão entre as faces, conforme a seção da hélice. Nessa seção, o perfil côncavo acelera o fluxo, resultando em uma zona de baixa pressão. Vários estudos, como os de (TAN *et al.*, 2019), (FITRIADHY *et al.*, 2020), corroboram esse comportamento e distribuição de pressão na hélice.

Figura 12 – Contorno de Pressão: (a) lado de baixa pressão da hélice; (b) lado de alta pressão da hélice; (c) em uma seção da hélice



Fonte: Stein (2023)

A partir da simulação, foi obtido o valor de 507 N em Z, o que representa o empuxo gerado. Conforme a Equação considerando que o empuxo gerado pela hélice é igual a força de arrasto quando a embarcação está em movimento retilíneo uniforme, tem-se que a embarcação alcança aproximadamente 20 km/h, o que resulta em um coeficiente de avanço de aproximadamente 1.

*Este artigo foi desenvolvido com base nos trabalhos de Mendes (2022) e Stein (2023).

Visando uma melhor gestão energética da embarcação Fênix durante a competição DSB, foram geradas 3 diferentes hélices com base em análises de velocidade e potência. A geração geométrica se deu por uma rotina desenvolvida em python, que leva em consideração a distância percorrida em cada tipo de prova, a resistência ao avanço da embarcação, e os parâmetros de potência do motor. Cada propulsor gerado tem um propósito diferente: uma para prova de sprint; uma para prova de longa duração; outra para prova de médias distâncias. A partir das geometrias, optou-se por realizar a simulação em CFD de uma das hélices: a de duas pás.

A simulação numérica em CFD, realizada no *Fluent*, demonstrou com clarezas os fenômenos físicos, dados pelo princípio de Bernoulli e da conservação de massa – essenciais para resolução de métodos RANS. Pode-se perceber claramente o comportamento o campo de pressões gerado pelo propulsor, assim como o comportamento do escoamento durante o funcionamento da hélice. Dada as análises realizadas, foi obtido o valor de 507 N de empuxo, o que, correlacionando com Mendes (2021), resulta em uma velocidade de avanço de 20 m/s, com coeficiente de avanço em torno de 1.

Dessa forma, pode-se concluir que os estudos realizados por Mendes (2021) e Stein (2023) contribuem de forma significativa para análise de desempenho e desenvolvimento de propulsores para a Equipe Hurakan, fundamentais para o desempenho da equipe no DSB.

6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFONSI, G. Navier – Stokes Equations for Turbulence Modeling. **Applied Mechanics Reviews**. v. 62, 2009.
- ALVES, L. M. **Método dos Elementos Finitos**. Curitiba, Março de 2007.
- AZWADI, N. *et al.* A Short Review on RANS Turbulence Models. **CFD Letters**. v.12, n.11, p. 83-96, 2020.
- CARLTON, J. Propeller Blade Strength. **Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering**, Londres, p. 1–8, 2018.
- DAVE, H. K.; DAWIN, J. P. **Fused Deposition Modeling Based 3D Printing**. Aveiro: Springer, 2021.
- DOERRY, N.; AMY, J.; KROLICK, C. History and the Status of Electric Ship Propulsion, Integrated Power Systems, and Future Trends in the U.S. Navy. **Proceedings of the IEEE**, v. 103, n. 12, p. 2243–2251, 2015.
- ELGHORAB, M. A. *et al.* Open Water Performance of a Marine Propeller Model Using CFD. 2013.
- FITRIADHY, A. *et al.* **CFD Prediction of B-Series Propeller Performance in Open Water**. v. 2, n. 2, p. 58–68, 2020.
- HURAKAN SOLARBOAT. Disponível em: <<https://www.equipehurakan.com.br>>. 2019.
- HEYDARI, M.; SADAT-HOSSEINI, H. Analysis of propeller wake field and vortical structures using k- ω SST Method. v. 204, n. April, 2020.
- LISEIKIN, V. D. **Grid Generation** Rudder and Control Surfaces.
- MASOOMI, M.; MOSAVI, A. The one-way fsi method based on rans-fem for the open water test of a marine propeller at the different loading conditions. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 4, 2021.
- MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. **Ship Resistance and Propulsion**. [s.l: s.n.].
- MORGUT, M.; NOBILE, E. Comparison of Hexa-Structured and Hybrid-Unstructured Meshing Approaches for Numerical Prediction of the Flow Around Marine Propellers Comparison of Hexa-Structured and Hybrid-Unstructured Meshing Approaches for Numerical Prediction of the Flow Around Mar. n. March, 2015.
- MURPHY, J. D. Turbulence modeling. p. 1–46, 1984.
- SHOUMAN, M. R.; HELAL, M. M. Influence of marine propeller geometry on turbulence model selection for CFD simulations. **Marine Technology Society Journal**, v. 55, n. 2, p. 150–164, 2021. TAN, Y. *et al.* Improved Performance Prediction of Marine Propeller: Numerical Investigation and Experimental Verification. v. 2019,

2019.

TAYLOR, P. *et al.* Ships and Offshore Structures Estimation of hull-propeller interaction of a self-propelling model hull using a RANSE solver. n. January, p. 37–41, 2015.

TU, T. N. Numerical simulation of propeller open water characteristics using RANSE method. **Alexandria Engineering Journal**, v. 58, n. 2, p. 531–537, 2019.