

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

ARTHUR TURMENA BAGGIO

PROCEDIMENTO PARA SELEÇÃO OTIMIZADA DE UM PROPULSOR DA SÉRIE
GAWN-BURRILL: ESTUDO DE CASO BABITONGA

Joinville

2024

ARTHUR TURMENA BAGGIO

PROCEDIMENTO PARA SELEÇÃO OTIMIZADA DE UM PROPULSOR DA SÉRIE
GAWN-BURRILL: ESTUDO DE CASO BABITONGA

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval., no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2024

ARTHUR TURMENA BAGGIO

PROCEDIMENTO PARA SELEÇÃO OTIMIZADA DE UM PROPULSOR DA SÉRIE
GAWN-BURRILL: ESTUDO DE CASO BABITONGA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 10 de dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Dr.(a)
Orientador(a)/Presidente

Dr.(a)
Membro(a)
Universidade xxxx

Dr.(a)
Orientador(a)
Universidade xxxxxx

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta de seleção de propulsores da série Gawn-Burrill, a qual foi desenvolvida com a principal finalidade de auxiliar na escolha do propulsor do novo casco da equipe de barcos solares Babitonga, da Universidade Federal de Santa Catarina. A embarcação analisada desloca cerca de 256 quilos, tem um comprimento total de 6 metros e foi projetada para alcançar a velocidade de 15 nós. O desenvolvimento realizado baseia-se nos fundamentos teóricos de projeto e seleção de propulsores abordados nos livros “Marine Propellers and Propulsion” (Jong Carlton) e “Ship Resistance and Propulsion” (Molland, Turnock e Hudson). A ferramenta foi construída na forma de uma planilha Excel contendo um modelo para a estimativa da resistência ao avanço da embarcação e um procedimento para a seleção do propulsor da série de Gawn-Burrill, baseados no método desenvolvido por Daniel Radojicic. Por fim, é realizada uma análise de incertezas baseada no método de análise de sensibilidade local. Como resultado, apresenta-se o propulsor com maior nível de eficiência (76,16%) capaz de atingir a velocidade requerida e que atende aos critérios de cavitação impostos para o projeto (10%).

Palavras-chave: Seleção de propulsor; Série de Gawn-Burrill; Cavitação.

ABSTRACT

This work presents the development of a propeller selection tool from the Gawn-Burrill series, which was developed with the main purpose of assisting in choosing the thruster for the new hull of the Babitonga solar boat team, from the Federal University of Santa Catarina. The vessel analyzed displaces around 256 kilograms, has a total length of 6 meters and was designed to reach 15 knots of speed. The development carried out is based on the theoretical foundations of the design and selection of propellers covered in the books "Marine Propellers and Propulsion" by Jong Carlton and "Ship Resistance and Propulsion" by Molland, Turnock and Hudson. The tool was built in the form of an Excel spreadsheet that comprises a model for estimating the vessel's resistance and a model for selecting the Gawn-Burrill series propeller, based on the method developed by Daniel Radojcic. Furthermore, an uncertainty analysis based on the local sensitivity analysis method is presented. As a result, the propeller with the highest level of efficiency (76.16%) is presented, capable of reaching the required speed and which meets the cavitation criteria imposed for the project (10%).

Keywords: Propeller selection. Gawn-Burrill series. Cavitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Decomposição das componentes da resistência ao avanço	14
Figura 2 – Regimes de navegação de uma embarcação	16
Figura 3 – Linha diretriz e linha de referência da pá	18
Figura 4 – Linha média, corda e bordos do hélice	19
Figura 5 – Passo do hélice	20
Figura 6 – Geometria do hélice	20
Figura 7 – Cavitação em uma pá de um propulsor	21
Figura 8 – Diagrama de águas livres de um propulsor	22
Figura 9 – Modelo I da série de Gawn-Burrill	24
Figura 10 – Modelo II da série de Gawn-Burrill	25
Figura 11 – Modelo III da série de Gawn-Burrill	25
Figura 12 – Modelo IV da série de Gawn-Burrill	26
Figura 13 – Diagrama de águas livres do modelo de Radojic para $Ad/Ao = 0.5$	27
Figura 14 – Curvas para K_T e K_q , considerando ΔK_T e ΔK_q	29
Figura 15 – Curvas de K_T para 10% de cavitação	30
Figura 16 – Curvas de K_T <i>Breakdown</i>	30
Figura 17 – Variáveis de entrada da planilha e parâmetros de saída	34
Figura 18 – Linhas básicas da embarcação.	35
Figura 19 – Variáveis de entrada para análise de casco	36
Figura 20 – Variáveis de entrada do casco na planilha	36
Figura 21 – Curvas de cavitação da série de Gawn-Burrill	37
Figura 22 – Casco da equipe Babitonga	38
Figura 23 – Casco da equipe Babitonga modelado no Maxsurf	38
Figura 24 – Números de Froude casco Babitonga	39
Figura 25 – Parâmetros geométricos do casco da equipe Babitonga	40
Figura 26 – Resistência ao avanço pelo Maxsurf	41
Figura 27 – Eficiência em função de J ($Ad/Ao = 0,9$, $P/d = 1,1$ e α de cavitação 0,5)	44
Figura 28 – K_T em função de J ($Ad/Ao = 0,9$, $P/d = 1,1$ e α de cavitação 0,5)	44

Figura 29 – K_q em função de J ($A_d/A_o = 0,9$, $P/d = 1,1$ e α de cavitação de 0,5)	45
Figura 30 – Resultado preliminar caso Babitonga	46
Figura 31 – Tabela de seleção do propulsor da equipe Babitonga	47
Figura 32 – Diagrama de águas livres do propulsor selecionado	48
Figura 33 – Curva de eficiência propulsor	48
Figura 34 – Alteração gradual da resistência	49
Figura 35 – Alteração de todos os parâmetros do propulsor em conjunto	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixa de aplicação da série de Gawn-Burrill	23
Tabela 2 – Faixa de aplicação do método de Radojcic em regime de cavitação	28

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS	13
1.1.1. Objetivo Geral	13
1.1.2. Objetivos Específicos	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1. RESISTÊNCIA AO AVANÇO.....	14
2.1.1. CALCULO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO	15
2.1.2. MÉTODO DE SAVITSKY	16
2.2 HÉLICE.....	17
2.2.1. GEOMETRIA DO HÉLICE	18
2.2.2. CAVITAÇÃO	21
2.3. CARACTERISTICAS DE UM HÉLICE EM AGUAS ABERTAS	21
2.4. SÉRIES SISTEMÁTICAS	23
2.4.1. SÉRIE SISTEMÁTICA DE GAWN-BURRILL	23
2.4.1.1 MODELO DE RADOJCIC	27
2.5. INTEGRAÇÃO CASCO HÉLICE.....	31
2.6. ANÁLISE DE INCERTEZAS	32
3. METODOLOGIA	33
3.1. DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL	34
3.1.1. IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DE GAWN-BURRILL	34
3.1.2. INTEGRAÇÃO DO CASCO À PLANILHA	35
3.1.3. ESTUDO DA CAVITAÇÃO	36
3.2. ESTUDO DO CASO: EQUIPE BABITONGA.....	37
3.3. OTIMIZAÇÃO DO PROPULSOR.....	41
3.4. ANÁLISE DE INCERTEZA DO RESULTADO	42
4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	43
4.1. VALIDAÇÃO DO ESTUDO REALIZADO.....	43
4.2. HÉLICE IDEAL PARA O CASO BABITONGA	46
4.3. ANÁLISE DE INCERTEZAS DE RESISTÊNCIA	49
5. CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	52

APÊNDICE A – COEFICIENTES POLINOMIAIS DE GAWN-BURRIL PARA REGIME DE AGUAS ABERTAS SEM CAVITAÇÃO.....	54
APÊNDICE B – COEFICIENTES POLINOMIAIS DE GAWN-BURRIL PARA REGIME DE AGUAS ABERTAS COM CAVITAÇÃO	55
APÊNDICE C – DIAGRAMAS DE RADOJCIC ($AD/A0 = 0.7$ E $P/D = 1.1$).....	56
APÊNDICE D – DIAGRAMAS DE RADOJCIC ($AD/A0 = 0.7$ E $P/D = 1.4$).....	57
APÊNDICE E – DIAGRAMAS DE RADOJCIC ($AD/A0 = 0.7$ E $P/D = 1.7$).....	58
APÊNDICE F – DIAGRAMAS DE RADOJCIC ($AD/A0 = 1.1$ E $P/D = 1.1$).....	59
APÊNDICE G – DIAGRAMAS DE RADOJCIC ($AD/A0 = 1.1$ E $P/D = 1.4$).....	60
APÊNDICE H – DIAGRAMAS DE RADOJCIC ($AD/A0 = 1.1$ E $P/D = 1.7$).....	61
APÊNDICE I – RESISTÊNCIAS DO CASCO BABITONGA (MAXSURF)	62

1. INTRODUÇÃO

Dado que o desempenho de uma embarcação depende fortemente da eficiência do propulsor, a otimização desse componente permite que o barco alcance seus objetivos de maneira mais ágil e econômica, maximizando a eficiência energética. Segundo Carlton (2007), o desempenho do propulsor está diretamente relacionado à eficiência de propulsão, que, por sua vez, depende de fatores como a forma do casco, as condições operacionais e a resistência ao avanço.

O hélice, embora tenha sido um dos primeiros sistemas de propulsão naval desenvolvidos, permanece amplamente utilizado na indústria naval devido a sua comprovada eficiência e versatilidade. Pois, ao longo dos anos, a tecnologia de hélices evoluiu significativamente em termos de design e materiais, permitindo maior eficiência hidrodinâmica e menores níveis de cavitação, otimizando o desempenho das embarcações e reduzindo o consumo de combustível (CARLTON, 2007).

Uma das formas de selecionar um propulsor consiste no uso de séries sistemáticas, que, segundo Trindade (2012), consistem de uma base de dados que auxiliam o projetista a entender os principais fatores que influenciam o desempenho de um hélice, sendo representadas por meio de diagramas que auxiliam na seleção das características mais apropriadas de um propulsor para uma dada aplicação.

Os primeiros testes extensivos realizados em propulsores de face reta foram feitos por Gawn em 1953. Já em 1957, Gawn e Burrill realizaram os mesmos testes em ambientes com cavitação. Desde então ocorreram várias tentativas de representar matematicamente as características hidrodinâmicas (coeficiente de empuxo K_T e coeficiente de torque K_Q) desses propulsores, além de melhorar os modelos computacionais de análise. (RADOJCIC; SIMIC; KALAJDZIC, 2009).

Em 1988, Radojic propôs um método capaz de descrever a série de Gawn-Burrill, através de equações para o regime com e sem cavitação. Dessa forma, este trabalho visa desenvolver uma planilha Excel que utiliza os modelos propostos por Radojic, que auxilie na seleção de um propulsor da série de Gawn-Burrill com a maior eficiência possível e que atenda aos critérios de cavitação.

Além disso, será realizado um estudo de caso considerando o novo projeto da equipe de barcos solares Babitonga do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina, no qual busca-se a seleção otimizada de um propulsor que apresente a máxima eficiência quando a embarcação navega na velocidade de serviço.

Por fim, será realizada uma análise de incertezas, focando na resistência do casco estudado, com o intuito de verificar a influência que os parâmetros utilizados exercem na eficiência do propulsor escolhido.

1.1. OBJETIVOS

Com o intuito de selecionar um propulsor da série Gawn-Burrill, para o novo casco da equipe Babitonga, propõem-se os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver uma ferramenta de seleção otimizada de propulsores da série Gawn-Burrill, com foco em encontrar o hélice com a melhor eficiência na velocidade de projeto da embarcação.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Estudar os principais parâmetros que descrevem o hélice, tais como passo, diâmetro, razão de áreas e velocidade de avanço;
- Descrever a série de Gawn-Burrill e sua área de atuação;
- Utilizando os modelos propostos por Radojic em 1988, desenvolver uma ferramenta no Excel que determine o hélice com a maior eficiência e que atenda aos critérios de cavitação da série;
- Estudar o caso Babitonga, utilizando a ferramenta desenvolvida para encontrar o hélice com a maior eficiência possível para a velocidade de projeto da embarcação;
- Realizar uma análise de incertezas focada na resistência do casco da equipe Babitonga, a fim de verificar a influência que os erros nessa estimativa exercem no projeto final do propulsor.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

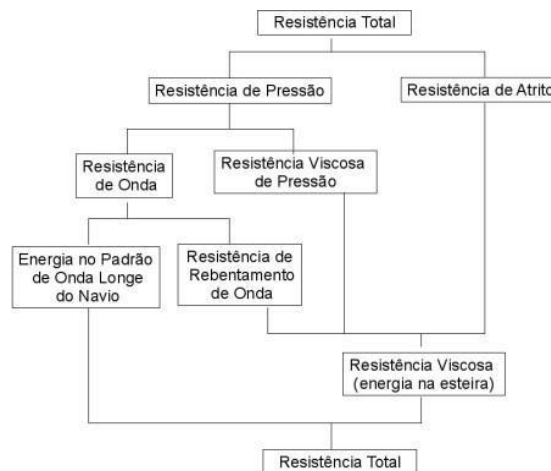
Neste capítulo serão descritos os fundamentos teóricos associados com a resistência ao avanço, geometria de um hélice, seleção de propulsor por série sistemática, otimização e análise de incertezas.

2.1 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

A resistência ao avanço de uma embarcação a uma dada velocidade corresponde a força requerida para rebocá-la, em águas calmas, naquela velocidade. (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017).

Segundo Trindade (2012), a resistência do navio tem origem complexa e, para facilitar a análise, é tradicionalmente decomposta em vários termos, tal como visto na Figura 1.

Figura 1 – Decomposição das componentes da resistência ao avanço.



Fonte: Trindade (2012).

Entre as componentes mostradas na Figura 1, destacam-se os três fenômenos físicos associados a resistência ao avanço de uma embarcação:

- Resistência de Onda: É influenciada pela forma do casco, especialmente na proa, criando um padrão de ondas à medida que a embarcação avança. Representa a energia utilizada para formar e sustentar as ondas geradas

pelo casco. (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017).

- Resistência viscosa de pressão: Ocorre devido à variação de pressão no torno do casco, sendo causada pela viscosidade da água. Possui maior influência em regiões onde a água flui mais lentamente, ou em zonas de baixa pressão, onde o fluxo de água tende a se separar da superfície do casco. (LARSSON; RAVEN, 2007).
- Resistência de atrito: É causada pela interação entre o casco e a camada limite, ou seja, a camada de água mais próxima à ele. (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017).

2.1.1 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO

O cálculo da resistência do avanço, pode ser desenvolvido de diferentes formas, sendo as mais conhecidas: *computational fluid dynamics* (CFD), ensaios com modelos, método de Savitsky e o método de Holtrop e Mennen (LINDBERGH; AHLSTRAND, 2020).

A fim de entender o método mais recomendado para um determinado estudo, o número de Froude pode ser utilizado, o qual é definido pela equação 1.

$$F_n = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

Onde:

F_n – Número de Froude

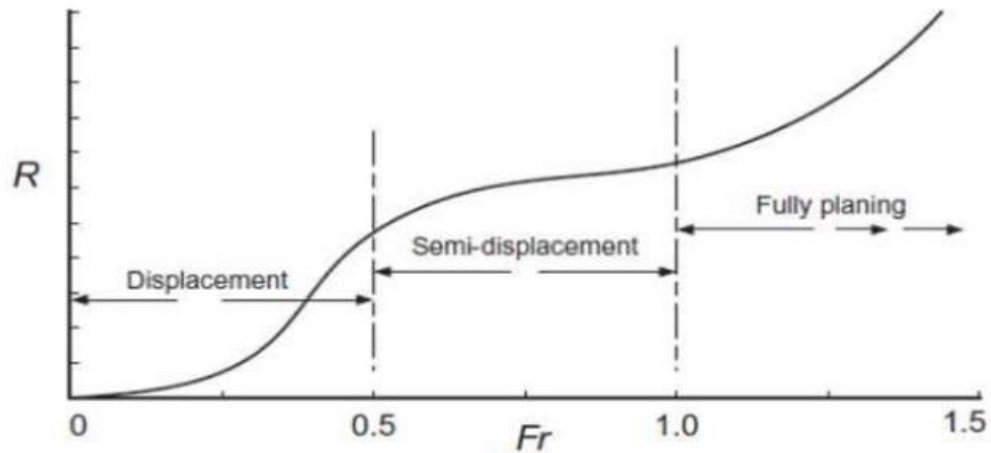
V – Velocidade da embarcação (m/s)

g – Aceleração da gravidade (m/s²)

L – Comprimento característico (m)

Além disso, segundo Lindbergh e Ahstrand (2020), números de Froude menores que 0,4 indicam regimes de deslocamento, enquanto que números de Froude maiores que 1 representam regimes de planeio pleno. Entre 0,4 e 1 a embarcação encontra-se em regime de semi-planeio.

Figura 2 – Regimes de navegação de uma embarcação



Fonte: Molland (2011).

2.1.2 MÉTODO DE SAVITSKY

O método de Savitsky (1954) é amplamente utilizado para estimar a resistência ao avanço de embarcações planantes (Froude > 1). O método leva em consideração o ângulo de trim (τ), o deslocamento (Δ), a velocidade (U), o ângulo de *deadrise* (β) e a boca da embarcação (B), tal como vistos nas equações 2, 3, 4, 5 e 6, mostradas a seguir.

$$D = \Delta \tan(\tau) + \frac{\varphi U^2 C_f L B^2}{2 \cos(\beta) \cos(\tau)} \quad (2)$$

Onde φ é definido em função do peso específico da água (γ) e da aceleração da gravidade (g), conforme a equação 3:

$$\varphi = \frac{\gamma}{g} \quad (3)$$

Outros parâmetros importantes para o método são a razão comprimento por boca molhada:

$$\nabla = \frac{L_k + L_c}{2B} \quad (4)$$

Onde:

L_k – Comprimento molhado da quilha

L_c – Comprimento molhado do chine

B – Boca

E, por fim, o coeficiente friccional C_f , definido na Equação 5.

$$C_f = \frac{0,075}{[\log_{10}(Re_v) - 2]^2} \quad (5)$$

Onde Re_v é o número de Reynolds em função da viscosidade cinemática da água (ν), da razão (∇) calculada na Equação 4, da velocidade (U), e da boca da embarcação (B), tal como visto na Equação 6.

$$Re_v = \frac{U \nabla B}{\nu} \quad (6)$$

2.2 HÉLICE

Além disso, segundo Carlton (2007), o hélice como conhecemos hoje, teve seus primeiros relatos no trabalho de Rober Hooke em 1681. Apesar de antigo, ele continua a ser um dos sistemas mais utilizados para a movimentação de embarcações.

Seu funcionamento baseia-se no fato de que a face da pá “empurra” a água criando uma zona de pressão maior e conseqüentemente, gerando no dorso uma pressão menor. Essa diferença no campo de pressões gera uma sustentação hidrodinâmica, a qual é responsável por movimentar a embarcação (CARLTON, 2007).

Já Padovezi (1997) afirma que “para uma grande parte das embarcações existentes no mundo, a questão do projeto de hélices está satisfatoriamente solucionada. As ferramentas teóricas satisfazem plenamente às expectativas dos projetistas, apresentando resultados muito próximos daqueles verificados em ensaios em escala reduzida ou escala real”.

2.2.1 GEOMETRIA DO HÉLICE

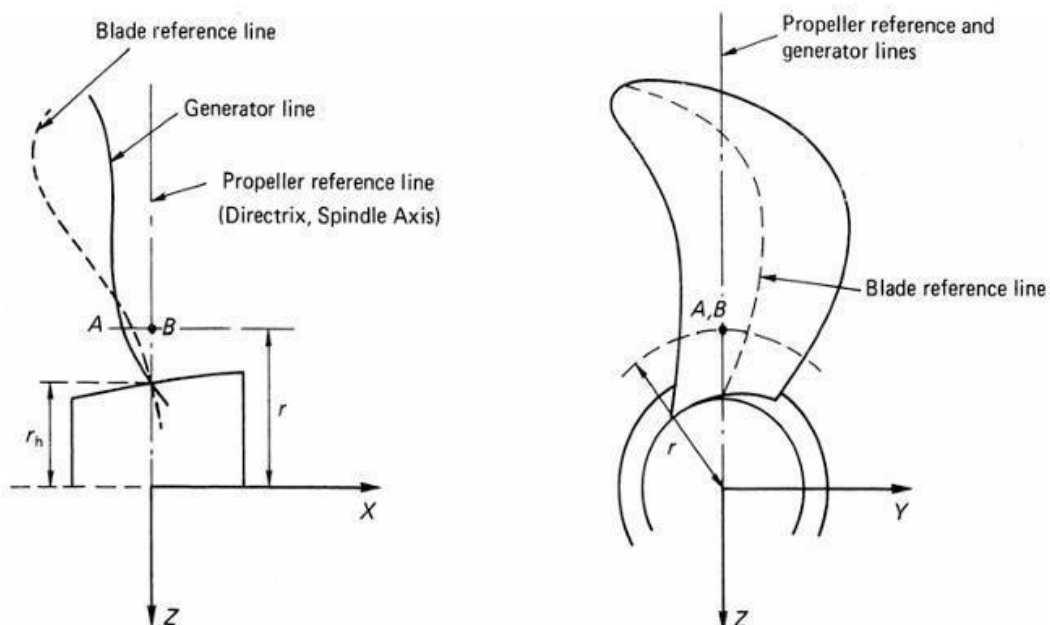
O hélice, por sua vez, pode ser entendido como um conjunto de pás distribuídas uniformemente em torno de um cubo, montado na extremidade de um eixo. (TRINDADE, 2012). Apesar de parecer simples, esse sistema apresenta uma geometria complexa que pode ser definida a partir de inúmeros parâmetros, os quais são determinantes para descrever o seu funcionamento, influenciando diretamente no desempenho da embarcação.

As características que descrevem um hélice variam de acordo com o tipo ou a função da embarcação, variando para projetos focados em: maior eficiência energética, redução de ruídos, aumento do torque, ou ainda, maiores velocidades de serviço.

Em relação a geometria, na Figura 3 é apresentada a linha de referência do propulsor (ou diretriz), que corresponde a linha ortogonal ao eixo de rotação, a linha de referência da pá, que diz respeito a linha central de todas as seções que formam a pá do hélice, e por fim, a linha geradora, a qual é a linha formada pela intersecção da pá com o plano do eixo do hélice.

É a partir das linhas de base que são definidos os parâmetros *rake* (a maior distância entre a linha geradora e a linha diretriz) e *skew* (maior ângulo entre a linha de referência da pá e a linha diretriz).

Figura 3 – Linha diretriz e linha de referência da pá.

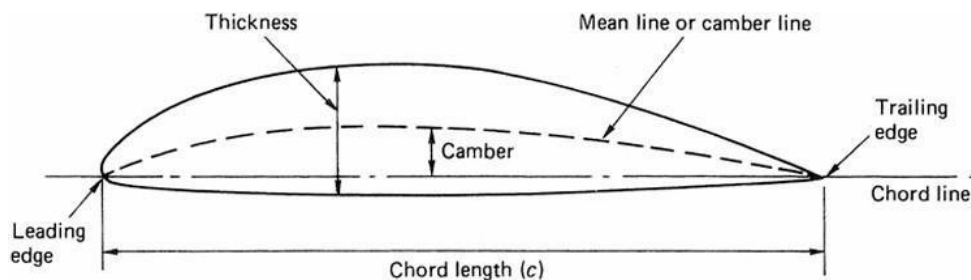


Fonte: Carlton, 2007.

Ademais, conforme pode ser visto na Figura 4, a pá do hélice possui um bordo de ataque (*Leading edge*), representado pela linha frontal, e um bordo de fuga (*trailing edge*), representado pela aresta oposta ao bordo de ataque. Por fim, para descrever um hélice é necessário definir ainda:

1. Linha média ou *Camber line*: Linha formada pelos pontos médios entre as faces, sendo medido perpendicularmente a curvatura. (CARLTON, 2007).
2. Corda média (*c*): Distância entre os pontos extremos da linha média localizados nos bordos de ataque e de fuga. (CARLTON, 2007).

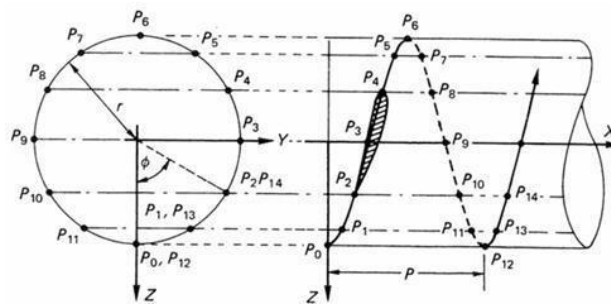
Figura 4 – Linha média, corda e bordos do hélice



Fonte: Carlton, 2007

3. Número de pás (*Z*): Geralmente variam de 2 a 4 pás para embarcações pequenas. (TRINDADE, 2012).
4. Diâmetro (*D*): Duas vezes a distância entre o centro do eixo de rotação do propulsor até o ponto mais externo de uma das pás.
5. *Pitch* ou Passo (*P*): Tradicionalmente definido como a distância percorrida longitudinalmente por um ponto localizado a 70% do raio do hélice durante uma rotação completa da pá (Figura 5).

Figura 5 – Passo do hélice.



Fonte: Carlton, 2007.

6. Área do disco (A_0):

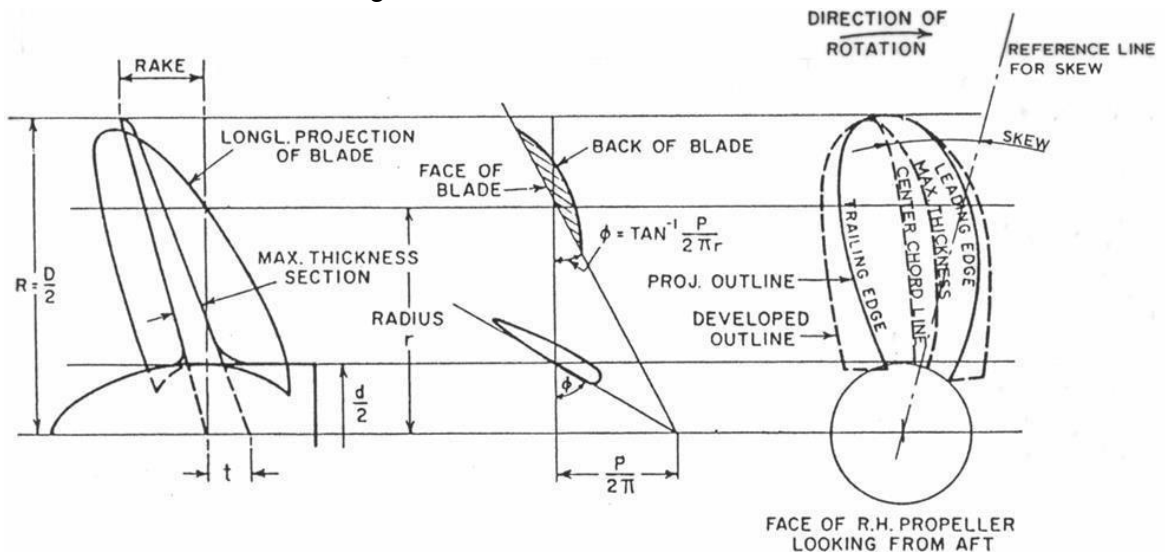
Pode ser calculada pela fórmula: $A_0 = \frac{\pi D^2}{4}$

Onde D é o diâmetro do hélice

7. Área expandida (A_e):

É calculada pela soma das áreas das faces das pás.

Figura 6 – Geometria do hélice.



Fonte: Molland, Turnock e Hudson, 2017 – Adaptada.

Além disso, cada pá possui dois lados, sendo a face (*face of blade*) a região de maior pressão, e o dorso (*face oposta*) a região de menor pressão. É justamente essa diferença de pressão que gera o empuxo do hélice (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017).

2.2.2 CAVITAÇÃO

A cavitação é um fenômeno geral da mecânica dos fluidos, que pode ocorrer quando um líquido, utilizado em uma máquina, está sujeito a variações de velocidade e pressão (CARLTON, 2007).

Em hélices navais, a cavitação é o fenômeno que ocorre quando a pressão da água na superfície do propulsor cai abaixo do nível da pressão de vapor, provocando a ocorrência e o colapso de bolhas na superfície das pás. O colapso das bolhas danificam a superfície das pás, diminuindo a eficiência e vida útil do propulsor.

Assim, de acordo com Molland, Turnock e Hudson (2017), a cavitação, em casos críticos, além de acarretar perda no empuxo do propulsor, pode impedir que o navio atinja a velocidade desejada.

Figura 7 – Cavitação em uma pá de um propulsor



Fonte: Carlton, 2007

2.3 CARACTERÍSTICAS DE UM HÉLICE EM ÁGUAS ABERTAS

Segundo Carlton (2007), as forças e momentos produzidos por um propulsor podem ser expressas por uma série de características adimensionais, que são generalizadas para uma geometria específica. Essas características adimensionais são descritas nas Equações 7, 8, 9 e 10.

- Coeficiente de empuxo: $K_T = \frac{T}{\rho n^4 D^4}$ (7)

- Coeficiente de torque: $K_Q = \frac{Q}{\rho n^4 D^5}$ (8)

- Coeficiente de avanço: $J = \frac{V_a}{nD}$ (9)

- Número de cavitação: $\sigma = \frac{p_0 - e}{\frac{1}{2}\rho V^4}$ (10)

Onde:

T corresponde ao empuxo;

Q corresponde ao torque;

V_a Corresponde a velocidade de avanço do propulsor;

ρ é a densidade do fluido;

n é a rotação do hélice;

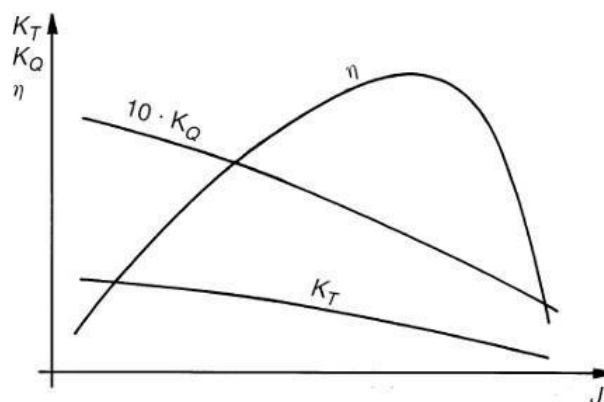
D é o diâmetro máximo do propulsor.

É justamente a partir desses coeficientes adimensionais que se obtém o valor da eficiência do propulsor operando em águas abertas:

- Eficiência em águas abertas: $n_0 = \frac{K_T J}{K_Q 2\pi}$ (11)

Desse modo, as curvas de K_Q e K_T em função de J contém as informações necessárias para definir o desempenho de um hélice em uma dada condição de operação (CARLTON, 2007).

Figura 8 – Diagrama de águas livres de um propulsor



Fonte: Trindade, 2012.

As curvas traçadas nesses diagramas (Figura 8) servem principalmente para a otimização do hélice e a determinação de seu ponto de funcionamento. Na prática,

essas curvas já não são utilizadas [...], mas sim os polinômios interpoladores que as descrevem, os quais permitem o cálculo computacional. Embora o trabalho inicial de registro desses coeficientes seja moroso e entediante, os processos de cálculo, automatização e otimização são facilitados uma vez que não é mais necessário realizar a consulta manual aos diagramas. (TRINDADE, 2012).

2.4 SÉRIES SISTEMÁTICAS

Ainda segundo Trindade (2012), uma série sistemática representa um conjunto de hélices obtidos pela variação sistemática de seus parâmetros geométricos. A criação de uma série sistemática objetiva gerar um banco de dados capaz de ajudar o projetista a entender a influência que as características geométricas exercem no desempenho de um hélice, além de resultar em diagramas que auxiliam na seleção de um propulsor para uma dada aplicação.

2.4.1 SÉRIE SISTEMÁTICA DE GAWN-BURRILL

Segundo Radojic, Simic e Kalajdzic (2009), os primeiros ensaios realizados de forma extensiva em propulsores de face plana foram realizados por Gawn em 1953, sendo que em 1957 Gawn e Burrill realizaram outros ensaios considerando a ocorrência de cavitação. Ao todo foram ensaiadas 37 geometrias, cujas características respeitaram as faixas de valores apresentadas na Tabela 1.

Os hélices dessa série são de simples manufatura e fácil manutenção, além de possuírem eficiências propulsivas superiores à 55% em ensaios de águas abertas ocorridos em ambientes com cavitação.

Tabela 1 – Faixa de aplicação da série Gawn-Burrill

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo
Número de pás (Z)	3	3
Razão de áreas A_d/A_0	0,5	1,1
Razão P/D	0,8	1,8

Fonte: Radojic, 1988

Desde sua criação, vários modelos matemáticos foram desenvolvidos para tentar automatizar a previsão de desempenho de propulsores dessa série. O primeiro modelo matemático foi proposto por Blount e Hubble (1981), seguido pelo modelo de Kozhukharov (1986) e de Radojicic (1988), sendo que todas as formulações foram desenvolvidas a partir da análise de regressões múltiplas. Já, em 2007, Koushan propôs a utilização de um novo modelo baseado em uma técnica conhecida como *artificial neural network* (RADOJCIC; SIMIC; KALAJDZIC, 2009).

Para um regime sem cavitação, o modelo de Blount e Hubble, apresenta um par de equações com 39 termos para K_T e 47 termos para K_Q . Já para o regime com cavitação, são utilizadas duas novas equações, restando ainda uma quarta equação que é utilizada para a região de transição entre as duas anteriores (Figura 9).

Figura 9 – Modelo proposto por Blount e Hubble

Model 1 – Blount & Hubble [3]

For non-cavitating conditions (Based on AEW data)

$$K_T = \sum_{n=1}^{39} \left(C_{T_n} \times (J)^{s_n} \times \left(\frac{P}{D} \right)^{t_n} \times (EAR)^{u_n} \times (z)^{v_n} \right)$$

$$K_Q = \sum_{n=1}^{47} \left(C_{Q_n} \times (J)^{s_n} \times \left(\frac{P}{D} \right)^{t_n} \times (EAR)^{u_n} \times (z)^{v_n} \right)$$

C_T, C_Q, s, t, u, v - coefficients for non-cavitating conditions

For cavitating conditions (Based on various sources)

$$K_T = 0.393 \times \tau_c \times EAR \times (1.067 - 0.229 \times \frac{P}{D}) \times (J^2 + 4.836)$$

$$K_Q = 0.393 \times Q_c \times EAR \times (1.067 - 0.229 \times \frac{P}{D}) \times (J^2 + 4.836)$$

For transition region:

$$\tau_c = 1.2 \times \sigma_{0.7R}$$

$$Q_c = 0.2 \times \frac{P}{D} \times \sigma_{0.7R}^{(0.7+0.32 \times EAR^{0.9})}$$

or fully developed cavitation:

$$\tau_c = 0.0725 \times \frac{P}{D} - 0.034 \times EAR$$

$$Q_c = \frac{0.0185 \times \left(\frac{P}{D} \right)^2 - 0.0166 \times \frac{P}{D} + 0.00594}{\sqrt[3]{EAR}}$$

Fonte: Radojicic, Simic e Kalajdzic, 2009 – Adaptado

Já o modelo de Kozhukharov utiliza os mesmos polinômios para o regime com e sem cavitação, porém os somatórios tem 121 termos para K_T e 116 para K_Q , dificultando sua implementação (Figura 10).

Figura 10 – Modelo proposto por Kozhukharov

Single equation for non-cavitating and cavitating conditions
(Based on KCA data)

$$K_T = \sum_{n=1}^{121} \left(A_1 \times \left(\frac{J-0.30}{2} \right)^{a_1} \times \left(0.45 + \frac{\ln(\arctg(\sigma))}{2} \right)^{b_1} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P/D-0.55}{1.5} \right)^{c_1} \times (EAR)^{d_1} \right)$$

$$K_T = \sum_{n=1}^{116} \left(B_1 \times \left(\frac{J-0.30}{2} \right)^{l_1} \times \left(0.45 + \frac{\ln(\arctg(\sigma))}{2} \right)^{p_1} \right. \\ \left. \times \left(\frac{P/D-0.55}{1.5} \right)^{q_1} \times (EAR)^{s_1} \right)$$

A, a, b, c, d, B, l, p, q, s – coefficients

Fonte: Radojic, Simic e Kalajdzic, 2009 – Adaptado

O terceiro modelo foi desenvolvido por Radojic e tinha como objetivo reduzir o número de termos dos modelos anteriores. Para isso, foram necessárias duas novas equações para representar o regime com cavitação. Portanto, para o regime sem cavitação o modelo apresenta um somatório de 16 termos para K_T e 17 para K_Q , além de outros dois com 20 termos para K_T e 18 para K_Q para o regime com cavitação (Figura 11).

Figura 11 – Modelo proposto por Radojic

For non-cavitating conditions (Based on KCA data)

$$K_T = \sum_1^{16} \left(C_T \times 10^e \times (DAR)^x \times \left(\frac{P}{D} \right)^y \times (J)^z \right)$$

$$K_Q = \sum_1^{17} \left(C_Q \times 10^e \times (DAR)^x \times \left(\frac{P}{D} \right)^y \times (J)^z \right)$$

C_T, C_Q, e, x, y, z - coefficients for non-cavitating conditions

Additional equations for cavitating conditions (Based on KCA data)

$$\Delta K_T = \sum_1^{20} \left(d_T \times 10^e \times (DAR)^x \times \left(\frac{P}{D} \right)^y \times (\sigma_{0.7R})^t \times (K_T)^u \right)$$

$$\Delta K_Q = \sum_1^{20} \left(d_Q \times 10^e \times (DAR)^x \times \left(\frac{P}{D} \right)^y \times (\sigma_{0.7R})^t \times (K_T)^u \right)$$

d_T, d_Q, e, s, v, t, u - coefficients for cavitating conditions

Fonte: Radojic, Simic e Kalajdzic, 2009 – Adaptado

Por fim, o modelo de Koushan separa os regimes com e sem cavitação em 4 polinômios, sendo dois com 34 termos para K_T e K_Q para o regime sem cavitação, e outros dois com 89 termos para K_T e 107 termos para K_Q para o regime com cavitação (Figura 12).

Figura 12 – Modelo proposto por Koushan

Model 4 – Koushan [6]

Separate equations for non-cavitating and cavitating conditions
(Based on KCA data)

$$Y = \frac{f_o \left(C + \sum_1^n \left(O_1 \times \tan h \left(a_1 + \sum_2^n h_2 \times (D_2 \times X_2 + E_2) \right) \right) \right) - G}{L}$$

Y - K_T or K_Q coefficient
a, C, D, E, G, h, L, O - constants (depend whether Y is K_T or K_Q and if cavitation is present or not)
X - Input variables in following order: J, DAR, P/D and σ

34 equation terms for both K_T and K_Q for non-cavitating conditions
89 and 107 terms respectively for cavitating conditions

Fonte: Radojic, Simic e Kalajdzic, 2009 – Adaptado

Em resumo, o modelo de Koushan, apesar de ser o mais recente, apresenta equações separadas para os regimes com e sem cavitação, cuja divisão artificial, pode não representar de forma assertiva os propulsores da série de Gawn-Burrill.

Já o modelo de Kozhukharov possuiu um número elevado de termos e apresenta resultados instáveis. Enquanto que o modelo de Blount e Hubble tem a vantagem de ser mais simples e representar bem propulsores em condições de cavitação extrema. Por fim, o modelo de Radojic é o que melhor representa propulsores da série de Gawn-Burrill em regiões sem cavitação. (RADOJCIC; SIMIC; KALAJDZIC, 2009).

2.4.1.1 MODELO DE RADOJCIC

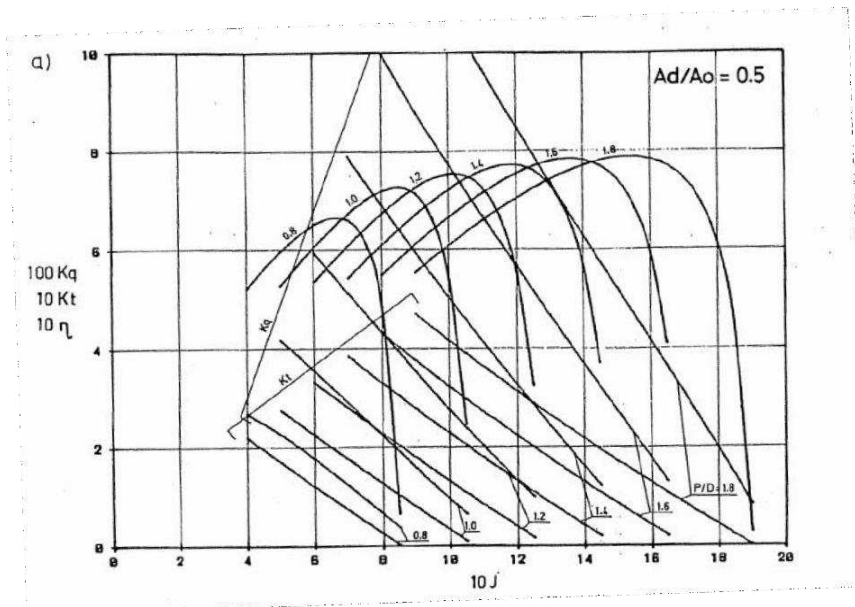
O modelo de Radojic (1988), como descrito anteriormente, utiliza das equações 12 e 13 para descrever os coeficientes de empuxo (K_T) e torque (K_Q) quando o hélice opera no regime sem cavitação.

$$K_T = \sum_1^{17} 10^e \left(A_d/A_0 \right)^x (P/D)^y \quad (12)$$

$$K_Q = \sum_1^{17} 10^e \left(A_d/A_0 \right)^x (P/D)^y \quad (13)$$

Usando os coeficientes mostrados no Apêndice A é possível gerar os diagramas de águas livres para uma dada geometria de um propulsor da série Gawn-Burrill, tal como exemplificado na Figura 13.

Figura 13 – Diagrama de águas livres de Radojic (1988) para $A_d/A_0 = 0,5$



Fonte: Radojic, 1988.

Sabe-se que os dados experimentais sobre propulsores operando em regime com cavitação são muito menos confiáveis do que os dados coletados em regimes sem cavitação, pois em ambientes que simulam a cavitação, em muitos casos, é difícil obter repetibilidade nos experimentos e, portanto, torna-se mais difícil encontrar uma modelagem matemática confiável para os resultados. (Radojic, 1988). Em seu modelo, Radojic (1988) utiliza outros dois polinômios para representar o desempenho do propulsor no regime com cavitação, sendo eles:

$$\Delta K_T = \sum_1^{20} (d_t 10^e (Ad/Ao)^s (\delta_R)^t (K_t)^u (P/D)^v) \quad (14)$$

$$\Delta K_Q = \sum_1^{18} (d_q 10^e (Ad/Ao)^s (\delta_R)^t (K_t)^u (P/D)^v) \quad (15)$$

Os coeficientes dos polinômios acima são apresentados no Apêndice B. No entanto, é importante observar que os valores obtidos nestes polinômios precisam ser descontados do valor inicial de K_t e K_q (Equações 12 e 13), tal como mostrado nas Equações 16 e 17.

$$\Delta K_T = K_T - K_{T_{cav}} \quad (16)$$

$$\Delta K_Q = K_Q - K_{Q_{cav}} \quad (17)$$

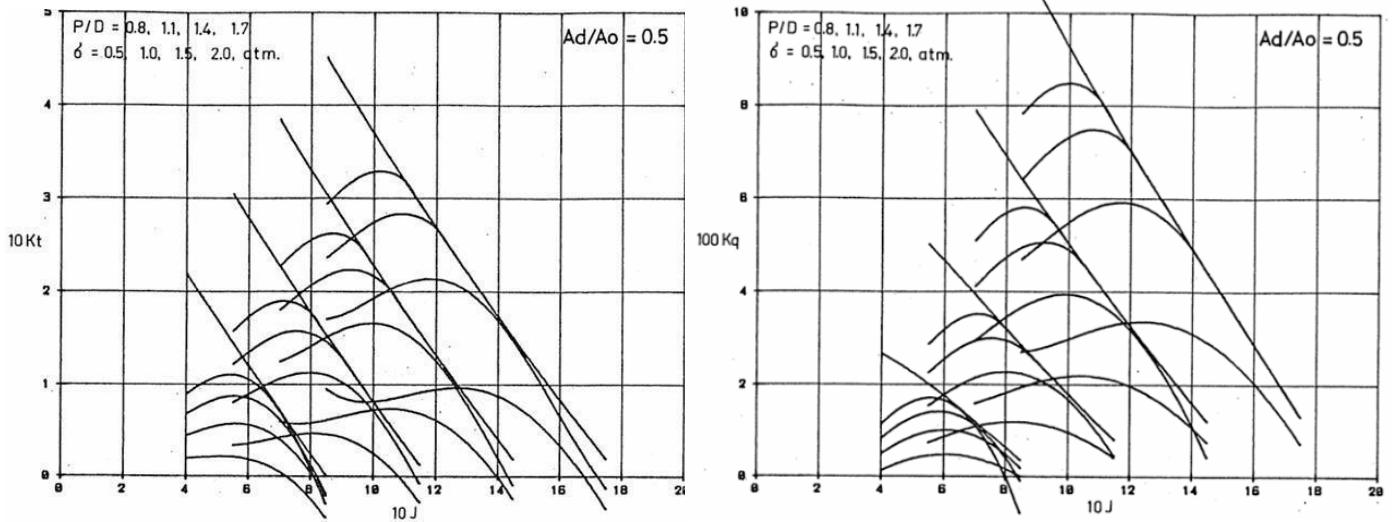
Por essa razão, a faixa de aplicação do método de Radojic mostrada na Tabela 2 precisa considerar ambos os modelos, incluindo o funcionamento no regime com cavitação.

Tabela 2 – Faixa de aplicação do método de Radojic em regime com cavitação

Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo
Número de pás (Z)	3	3
Delta de cavitação (δ_0)	0,5	-
Razão de áreas A_d/A_0	0,5	1,1
Razão P/D	$1,25 - 0,3 (Ad/A0) - 0,2\delta_0$	1,8
Coeficiente de avanço (J)	0,3	-
Eficiência em águas abertas (η_0)	0,2	-

Fonte: Radojic, 1988 – Adaptado

Assim como no modelo anterior, o modelo de Radojic (1988) permite gerar as curvas para K_t e K_q (Figura 14) considerando a influência da ocorrência da cavitação, a qual é modelada por meio das parcelas ΔK_t e ΔK_q .

Figura 14 – Curvas para K_T e K_Q , considerando ΔK_T e ΔK_Q 

Fonte: Radojic, 1988.

As curvas de cavitação do modelo são estimadas a partir do parâmetro δ_R , que representa a cavitação em $0,7R$, sendo R o raio da pá do hélice. O valor do parâmetro δ_R pode ser estimado em função de J e de δ_0 :

$$\delta_r = \delta_0 J^2 / J^2 + 4,84 \quad (18)$$

$$\delta_0 = 2(p - e) / \rho V_a^2 \quad (19)$$

Onde:

- δ_0 – Numero de cavitação baseado na velocidade de avanço;
- J – Coeficiente de avanço.
- ρ – Densidade da água;
- e – Pressão de vapor da água;
- p – passo;
- V_a – Velocidade de avanço do propulsor.

Por fim, o parâmetro δ_R é então utilizado para estimar a curva de cavitação máxima a partir da seguinte equação:

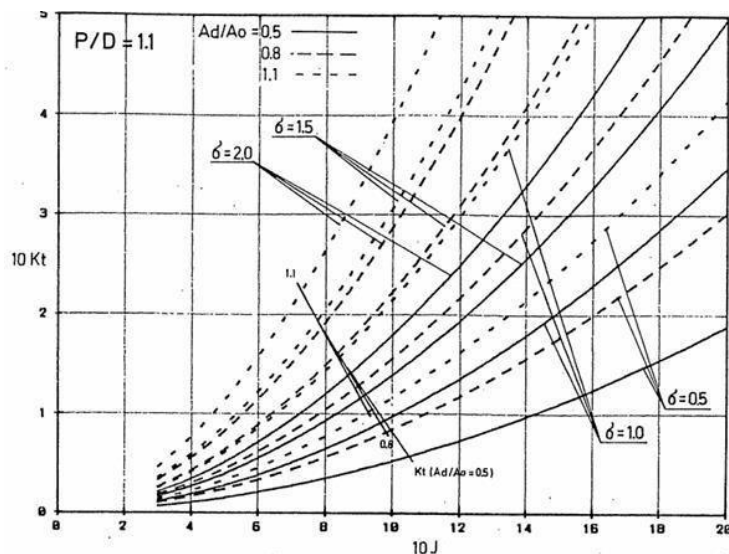
$$K_{T_{BD}} = 0,2745 * \delta_R (Ad/Ao). [1,067 - 0,229(P/D)](J^2 + 4,84) \quad (20)$$

No entanto, Radojic (1988), cita em seu trabalho que a análise de cavitação pode ser simplificada se for considerada a função representada na Equação 21.

$$t_c = K \delta_R \quad (21)$$

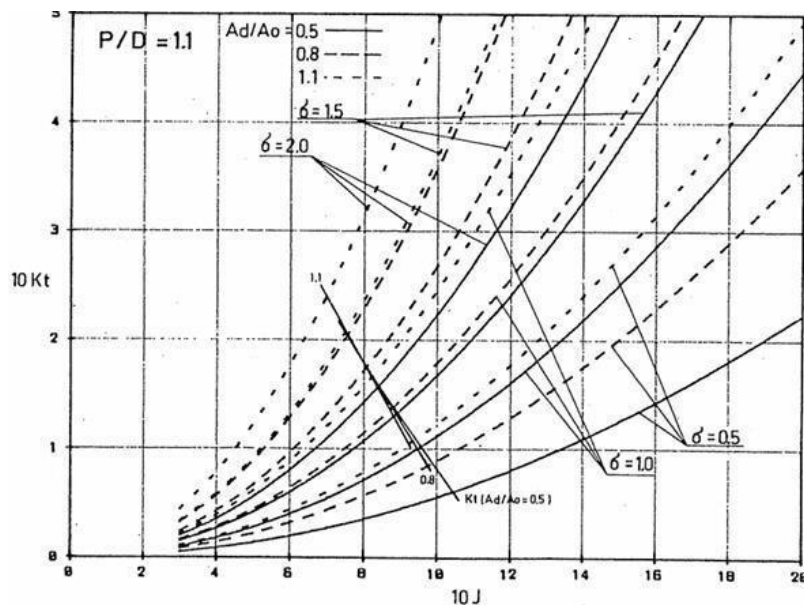
Onde o valor do parâmetro K representa os diferentes níveis de cavitação, sendo 0,7 para a curva de cavitação máxima, 0,55 para a curva de 10% de cavitação, e 0,36 para a curva de 2,5% de cavitação. Portanto, a Equação 19 pode ser substituída pela Equação 20 para estimar as curvas de cavitação de um propulsor. As Figuras 15 e 16 apresentam os gráficos que descrevem as curvas de cavitação.

Figura 15 – Curvas de K_T para 10% de cavitação



Fonte: Radojic, 1988

Figura 16 – Curvas de K_T Breakdown



Fonte: Radojicic, 1988.

Portanto, como mencionado na seção 2.2.2, o propulsor a ser selecionado precisa atuar abaixo do limite de cavitação desejado, para poder garantir que o desempenho obtido atinja o objetivo do projeto. Vale ressaltar que, segundo Radojicic (1988), a ocorrência de 10% de cavitação na pá é considerada normal para propulsores da série Gawn-Burriel.

2.5 INTEGRAÇÃO CASCO HÉLICE

Até o presente momento, o modelo matemático utilizado para a seleção do propulsor considera que o mesmo esteja trabalhando em águas abertas, ou seja, sem considerar a influência exercida pela presença do casco da embarcação. Porém, ao ser instalado em uma embarcação, o fluxo de água que atua no propulsor é bastante afetado pelo casco, influenciando em seu desempenho.

Nesse sentido, Molland (2017) pontua que propulsores reais operam em águas que sofreram perturbação pela passagem ao redor do casco, e que por essa razão possuem vetores de velocidade diferentes da velocidade do casco. Esse novo vetor de velocidades é chamado de velocidade de avanço (V_a), sendo esse campo de velocidades o responsável pelo empuxo e torque do propulsor medidos durante o ensaio de águas abertas.

O fluido em movimento na direção do propulsor é conhecido como *wake* (esteira), e pode ser definido como a diferença entre a velocidade do casco (V) e a velocidade de avanço do hélice (V_a), tal como visto na Equação 22.

$$w = \frac{V - V_a}{V} \quad (22)$$

Além da influência do *wake*, o funcionamento do propulsor também causa uma modificação no campo de pressão a ré da embarcação, o que amplia a resistência ao avanço do casco. Tal influência é medida por meio do parâmetro t , definido pela Equação 23.

$$t = 1 - \frac{R_T}{T} \quad (23)$$

Sendo assim, o valor da resistência ao avanço do casco estimado pelo método descrito na seção 2.1.2 deve ser adimensionaliza para incluir os efeitos decorrentes da presença do propulsor, tal como mostrado na Equação 24.

$$K_{T_{Casco}} = \frac{R_T(1+MR)}{(1-t)\rho V_a^2 D^2} \quad (24)$$

Onde:

- RT – Resistência do casco na velocidade de serviço;
- Va – Velocidade de avanço da embarcação;
- MR – Margem de resistência (varia entre 0,15 e 0,25);
- t – Coeficiente de redução da força propulsora;
- ρ – Massa específica da água;
- D – Diâmetro máximo do hélice;
- J – Coeficiente de avanço.
-

O ponto de operação J do propulsor para um casco operando a uma dada velocidade é determinado quando o valor de $K_{T_{CASCO}}$ se iguala ao valor de $K_{T_{PROPULSOR}}$, ou seja, quando a curva do $K_{T_{CASCO}}$ intercepta a curva do $K_{T_{PROPULSOR}}$.

2.6 ANÁLISE DE INCERTEZAS

Segundo COOLEMAN (2022), não existem medições perfeitas, s e n d o q u e todas as medições contêm erros. Portanto, em qualquer análise ou modelo matemático é necessário compreender a imprecisão e avaliar o quanto o resultado estimado pode estar distante do resultado real.

Neste sentido, a utilização de métodos como a análise de sensibilidade possui relevância, já que propõem que o experimentalista gere variações dos parâmetros de entrada que possam conter incertezas, de forma a mapear as alterações no resultado final, a fim de estimar ou até adequar o resultado, prevendo possíveis falhas na medição dos parâmetros de entrada de um modelo.

3 METODOLOGIA

Inicialmente, para o desenvolvimento deste projeto, foi realizado um estudo aprofundado sobre o funcionamento e o processo de seleção de propulsores, a fim de entender quais parâmetros devem ser priorizados para obter a maior eficiência possível para um propulsor que trabalha em uma determinada faixa de operação.

Além disso, a revisão bibliográfica mostrou que a utilização de séries sistemáticas é o meio mais eficiente para se selecionar um propulsor. Sendo assim, optou-se pela série de Gawn-Burrill, cuja faixa de aplicação é similar aquela utilizada neste trabalho.

A partir da fundamentação teórica apresentada no capítulo anterior, será desenvolvida uma planilha de cálculos no programa Excel, a qual visa aplicar o método de Radojic e buscar o propulsor com a maior eficiência possível para uma determinada condição de operação da embarcação.

Para a validação da planilha desenvolvida, serão testados os exemplos contidos no livro, cujos gráficos de desempenho serão reconstruídos com intuito de avaliar o funcionamento da ferramenta e validar o desenvolvimento computacional realizado.

Uma vez validado o método, um estudo de caso será realizado com o novo casco da equipe de barcos solar Babitonga do campus de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina, chamado de “Sambaqui”. Esse casco será modelado no programa Maxsurf para que a resistência ao avanço possa ser estimada. A seguir, a planilha desenvolvida será utilizada para definir o propulsor de maior eficiência que atende aos critérios de cavitação estabelecidos para o projeto.

A modelagem do casco no programa Maxsurf será realizada considerando pequenas modificações no modelo 3D fornecido pela equipe Babitonga, as quais tiveram que ser feitas para que a modelagem realizada no programa Rhinoceros seja lida adequadamente pelo Maxsurf.

Por fim, será realizada uma análise de incerteza em relação aos parâmetros utilizados como entrada para a planilha, buscando quantificar o quanto a incerteza nos dados de entrada influenciam nas características e no desempenho do propulsor selecionado. Busca-se assim obter-se um projeto robusto, que não sofra perdas significativas de desempenho em virtude das incertezas existentes nos parâmetros utilizados.

3.1 DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL

3.1.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DE RADOJCIC

Utilizando o programa Excel, foi construída uma ferramenta de seleção de propulsores, capaz de encontrar o hélice com a maior eficiência possível, variando os parâmetros adimensionais J , P/D e A_d/A_0 , dentro dos limites de validade da série Gawn-Burrill.

Conforme pode ser visto na Figura 17, os parâmetros de entrada para o cálculo da planilha são o valor de J , a razão de área A_d/A_0 e a relação passo-diâmetro P/D . Tais parâmetros são definidos inicialmente de forma arbitrária e a planilha calcula os valores de K_T , K_Q e a eficiência em águas abertas n_0 usando as equações 13, 14 e 11 respectivamente.

Durante o processo de otimização, os parâmetros A_d/A_0 e P/D são variados até que a melhor combinação seja alcançada. Já o valor de J é definido iterativamente para cada combinação de A_d/A_0 e P/D estudada, de modo a estabelecer o ponto de operação de cada propulsor analisado.

Figura 17 – Variáveis de entrada da planilha e parâmetros de saída

Variáveis			Intervalo de validade	
			Min	Máx
J	1.150784		0.3	-
Ad/A0	0.5		0.5	1.1
P/D	1.477402		0.8	1.8

kT	kQ	nO
0.191203	0.045975	0.7617

Fonte: Autor, 2024

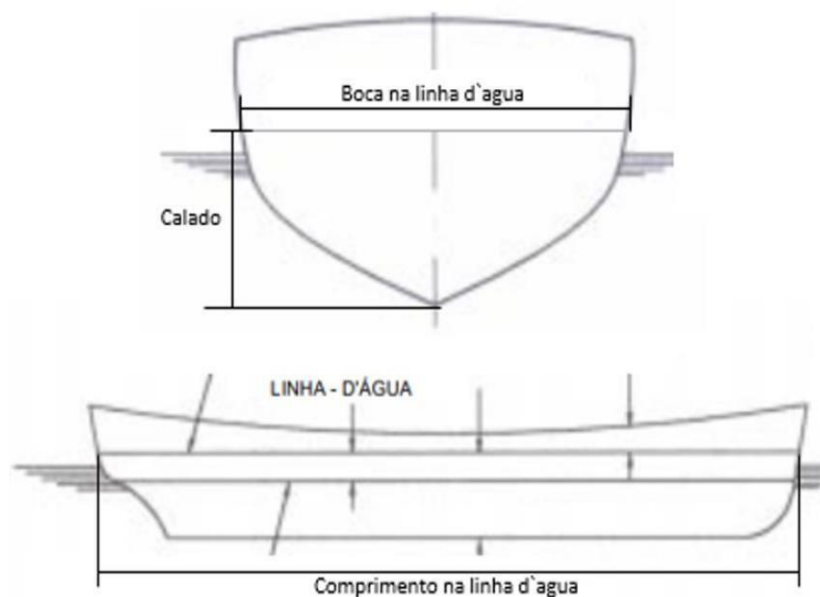
Destaca-se que nesta etapa de análise, a planilha não realiza nenhuma verificação dos parâmetros de entrada utilizados, nem dos parâmetros de saída resultantes.

3.1.2 INTEGRAÇÃO DO CASCO À PLANILHA

Para realizar a seleção do propulsor ótimo para um caso específico, a planilha necessita dos dados de resistência do casco a ser considerado. Além da resistência (em Newton), é necessário que sejam fornecidos: a velocidade (em nós) do ponto de operação, além dos parâmetros geométricos do casco (Figura 18):

- Comprimento na linha d'água (L_{wl}) em metros;
- Boca na linha d'água (B_{wl}) em metros;
- Calado de operação (T) em metros;
- Coeficiente prismático (C_p);
- Margem de resistência (entre 0,1 e 0,2);
- Diâmetro máximo do hélice (D_{hmax}) em metros.

Figura 18 – Linhas básicas da embarcação.



Fonte: Marinha do Brasil, 2005 – Adaptado

Utilizando o modelo descrito na fundamentação teórica e os parâmetros de entrada definidos pelo usuário, a planilha calcula o valor do coeficiente de esteira (w) e o coeficiente de redução da força propulsora (t), para, por fim, determinar o valor do $K_{T_{casco}}$ (Figuras 19 e 20).

Figura 19 – Variáveis de entrada para análise de casco

Variáveis de entrada do casco	
CP	0.71
L	5.978
B	0.857
T	0.108
Dhélice max	0.25
Resultado	
Kt casco	0.1912032
w	0.284184
t	0.0446331

Fonte: Autor, 2024

Figura 20 – Variáveis de entrada do casco na planilha

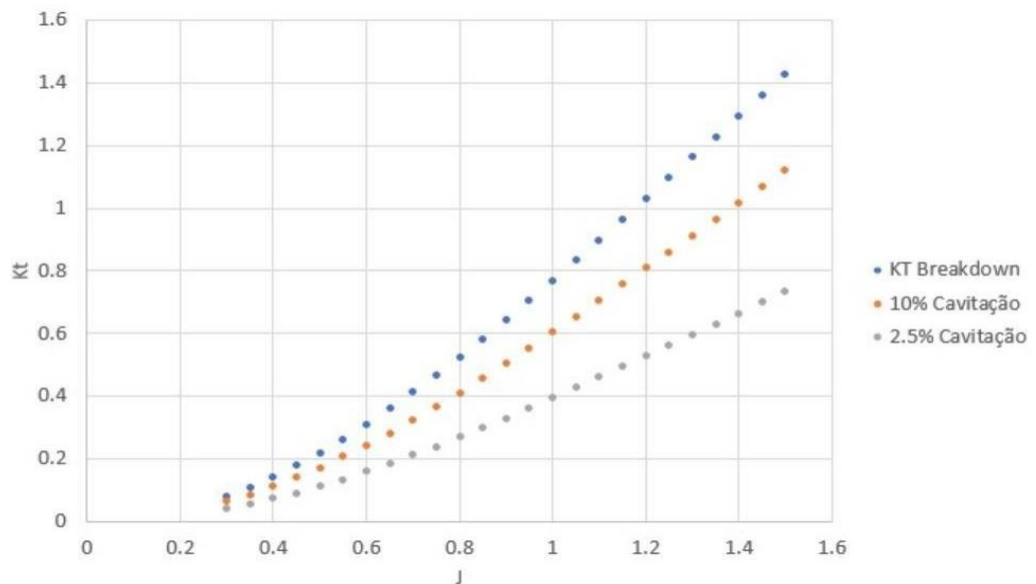
Dados de entrada do casco	
Velocidade	15 kts
Resistência	440.23 N

Fonte: Autor, 2024.

3.1.3 ESTUDO DA CAVITAÇÃO

A análise de cavitação é feita considerando as Equações 18 e 20, para J variando de 0,3 a 1,75, sendo apresentada na forma da Figura 21.

Figura 21 – Curvas de cavitação da série de Gawn-Burrill



Fonte: Autor, 2024

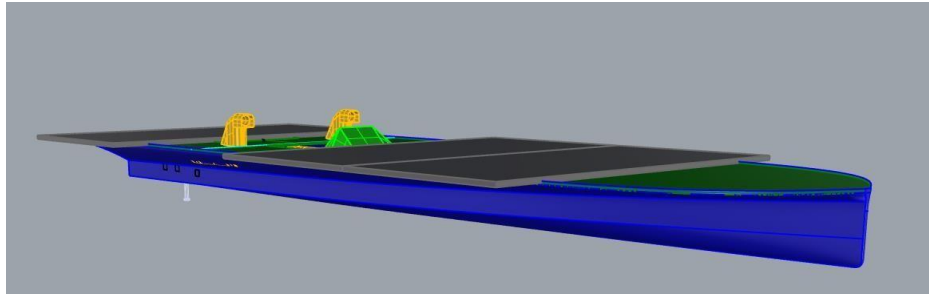
Uma vez determinado o J de operação e seu respectivo valor de KT , é possível utilizar o gráfico da Figura 21 para avaliar o nível de cavitação do propulsor. Assim, se o KT do propulsor for menor que o $K_{T_{BREAKDOWN}}$, $K_{T_{10\%}}$, e $K_{T_{2,5\%}}$, o propulsor encontrado não sofrerá nenhum tipo de cavitação na condição de operação considerada.

3.2 ESTUDO DE CASO: EQUIPE BABITONGA

Paralelamente ao desenvolvimento da planilha de cálculos da série Gawn-Burrill, também foi feita uma análise da resistência ao avanço do casco da equipe Babitonga.

O método utilizado para a estimativa da resistência do casco foi o método de Savitsky, o qual encontra-se implementado no programa Maxsurf. Destaca-se que um modelo 3D do casco foi fornecida pela equipe, a qual utilizou o programa Rhinoceros para a modelagem (Figura 22).

Figura 22 – Casco da equipe Babitonga

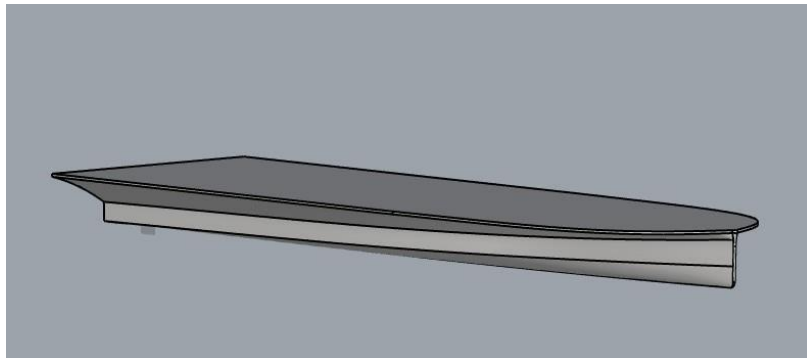


Fonte: Autor, 2024

Para que fosse possível realizar as análises de resistência, o modelo 3D da equipe, mostrado na Figura 22, precisou ser adaptado, já que alguns elementos não estavam sendo importados corretamente pelo Maxsurf, podendo influenciar na análise.

Assim, as placas solares, o painel, a rabetta e o sistema de refrigeração foram removidos. Por fim, as superfícies restantes foram unidas, de forma que o novo modelo se tornasse um único corpo sólido, que pudesse ser lido sem problemas pelo programa Maxsurf (Figura 23).

Figura 23 – Casco da equipe Babitonga modelado no Maxsurf

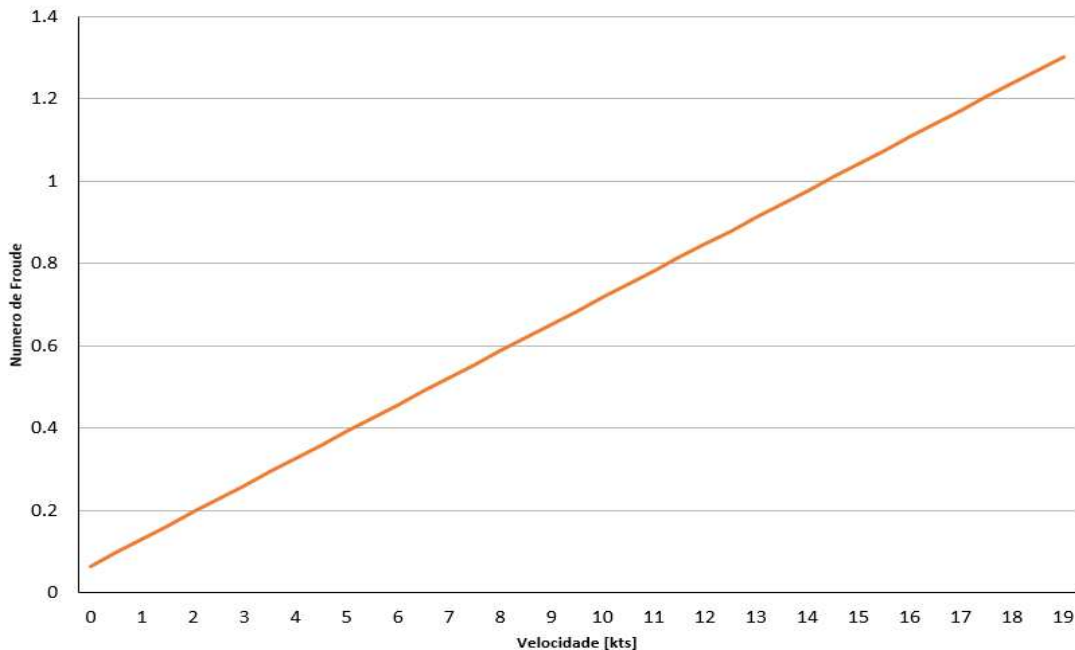


Fonte: Autor, 2024

O casco remodelado foi inserido no programa Maxsurf e os valores de LCG (distância longitudinal do centro de gravidade) e calado foram adicionados, seguindo os dados fornecidos pela equipe.

Para determinar o melhor método a ser utilizado para o casco em questão, realizou-se uma análise dos números de Froude, considerando velocidades entre 0,5 e 10 metros por segundo. Para essa análise foi utilizada a Equação 1, sendo que os resultados são mostrados no gráfico da Figura 24.

Figura 24 – Números de Froude do casco Babbitonga



Fonte: Autor, 2024.

A partir deste gráfico é possível perceber que para velocidades acima de 15 nós, o casco apresenta números de Froude superiores a 1 e, portanto, pode ser analisado como um casco planante. É importante ressaltar que a embarcação em estudo ainda não atingiu velocidades superiores a 7 nós e, portanto, o seu comportamento na velocidade de 15 nós só poderá ser estimado de forma teórica. Diante desse cenário, conforme descrito na fundamental teórica, a estimativa da resistência será seguirá a proposta de Lindbergh e Ahstrand (2020) e o método de cálculo de Savitsky (1954).

Após a seleção do método, é necessário inserir os parâmetros geométricos do casco no programa. Segundo os dados fornecidos pela equipe, o valor de LCG considerado foi de 2,3 metros em relação a popa e o calado de 108 mm.

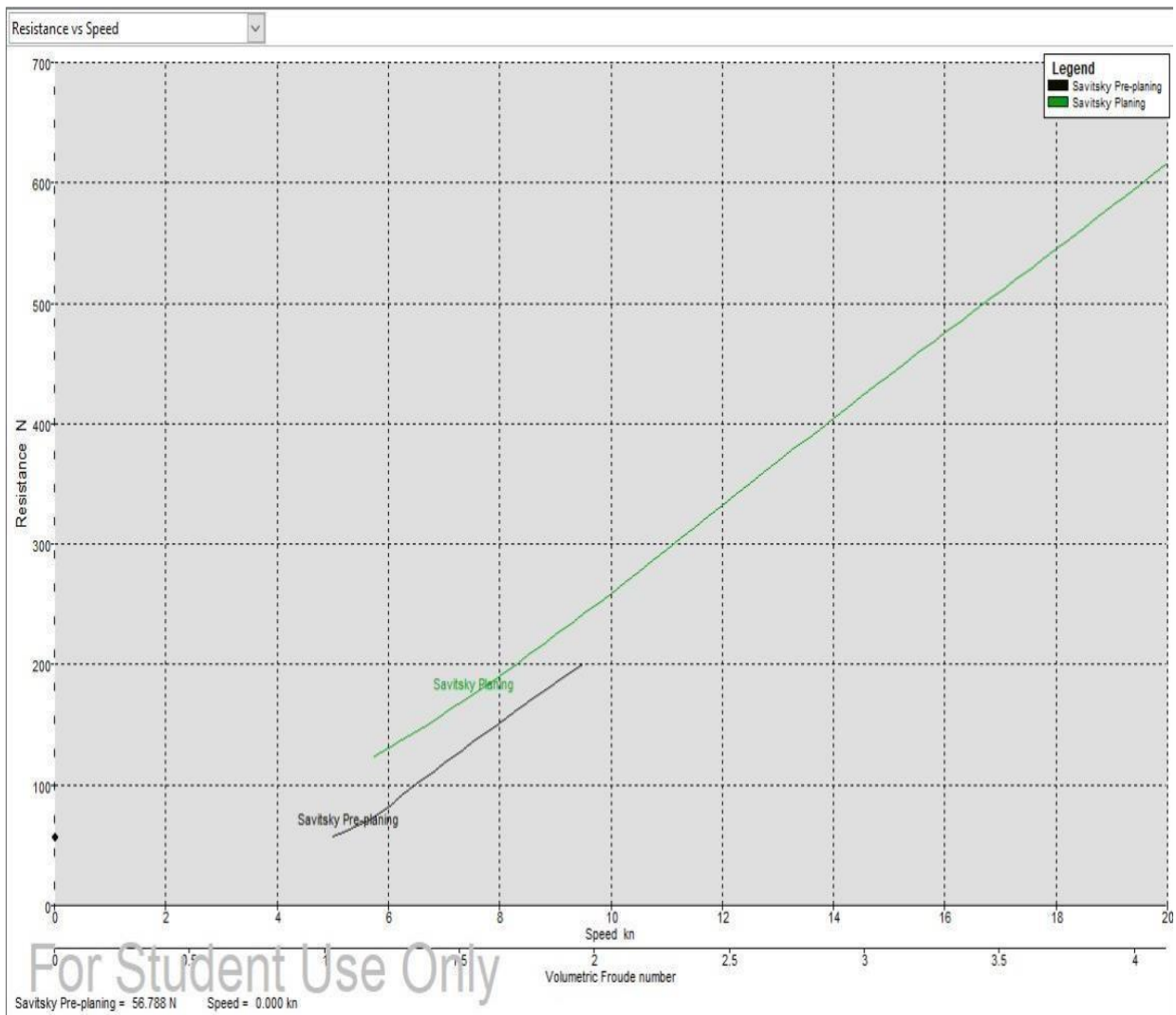
Inicialmente, na Figura 25, podem ser vistos os resultados obtidos na análise hidrostática realizada pelo programa Maxsurf, enquanto que na Figura 26 é mostrada a curva de resistência ao avanço calculada para o casco analisado e cujos valores são mostrados no Apêndice I.

Figura 25 – Parâmetros geométricos do casco da equipe Babitonga

	Item	Value	Units	Savitsky	Savitsky	Slender body
1	LWL	5.978	m	5.978	5.978	--
2	Beam	0.857	m	0.857	0.857	--
3	Draft	0.108	m	--	--	--
4	Displaced volume	0.256	m ³	0.256	0.256	--
5	Wetted area	4.002	m ²	4.002	--	4.002
6	Prismatic coeff. (Cp)	0.71		--	--	--
7	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.692		--	--	--
8	1/2 angle of entrance	7	deg.	7	--	--
9	LCG from midships(+ve for'd	-0.7	m	--	-0.7	--
10	Transom area	0.033	m ²	0.033	--	--
11	Transom wl beam	0.857	m	--	--	--
12	Transom draft	0.04	m	--	--	--
13	Max sectional area	0.06	m ²	0.06	--	--
14	Bulb transverse area	0.025	m ²	--	--	--
15	Bulb height from keel	0	m	--	--	--
16	Draft at FP	0.085	m	--	--	--
17	Deadrise at 50% LWL	13.4	deg.	--	13.4	--
18	Hard chine or Round bilge	Round bilge		--	--	--
19						
20	Frontal Area	0	m ²			
21	Headwind	0	kn			
22	Drag Coefficient	0				
23	Air density	0.001	tonne/			
24	Appendage Area	0	m ²			
25	Nominal App. length	0	m			
26	Appendage Factor	1				
27						
28	Correlation allowance	0.0004			Varies with	0.0004
29	Kinematic viscosity	0.00000118	m ² /s			
30	Water Density	1.0259	tonne/			

Fonte: Autor, 2024.

Figura 26 – Resistência ao avanço pelo Maxsurf



Fonte: Autor, 2024

A velocidade de operação escolhida para o projeto foi de 15 nós, resultando em uma resistência ao avanço de aproximadamente 440 N. Esse valor de velocidade foi definido pela equipe, visto que é o objetivo teórico que se pretende alcançar durante as próximas competições.

3.3 OTIMIZAÇÃO DO PROPULSOR

Para que fosse possível encontrar o propulsor com a maior eficiência nas condições de operação, foi utilizada a ferramenta *Solver* do Excel, optando pelo algoritmo “GRG não Linear”. Essa ferramenta permite maximizar ou minimizar um valor, neste caso a eficiência, obedecendo a um conjunto de restrições impostas pelo usuário. Os limites utilizados para a otimização realizada neste trabalho correspondem

a faixa de validade do modelo de Radojic, aos critérios de cavitação e ao valor de K_T do casco da equipe:

1. $J \geq 0,3$;
2. $0,5 \geq Ad/Ao \geq 1,1$;
3. $0,5$ (se não existir cavitação) ou $1,25 - 0,3 (Ad/A0) - 0,2\delta_0 \geq P/D \geq 1,8$;
4. $K_{T_{casco}} = K_{T_{propulsor}}$;
5. $K_{T_{propulsor}} \leq K_{T_{10\% cavitação}}$.

Os limites considerados para a razão passo-diâmetro (P/D) precisam ser separados em dois regimes. O primeiro, onde não ocorre cavitação, possui um valor mínimo de 0,5. Já com a ocorrência de cavitação, o novo limite mínimo passa a ser de $1,25 - 0,3 (Ad/A0) - 0,2\delta_0$.

Vale ressaltar que é somente durante o processo de otimização que a planilha verificará os valores fornecidos e os resultados obtidos. Antes deste processo a planilha irá realizar os cálculos mesmo que os valores sejam irreais por estarem fora dos limites impostos pela série Gawn-Burrill

3.4 ANÁLISE DE INCERTEZA DO RESULTADO

Devido ao fato do casco da equipe Babitonga apresentar números de Froude no limite do método de Savistky, ou seja, muito próximos a 1, foi realizado um estudo de incerteza em relação a medição desta resistência, visando estimar o impacto que uma variação neste valor causa na eficiência do propulsor selecionado.

Para esta avaliação foi utilizado o método de análise de sensibilidade, que consiste em alterar gradativamente os valores de entrada de um algoritmo e mapear a variação dos resultados, mapeando a relevância da variação da resistência ao avanço do casco em relação à eficiência do hélice selecionado, bem como das características geométricas escolhidas.

Inicialmente, variou-se individualmente os valores de resistência, bem como dos coeficientes de esteira “w” e de redução da força propulsiva “t” de -30% a +30% em intervalos de 10%, mantendo os parâmetros geométricos do hélice selecionado.

Uma segunda análise foi realizada alterando os 3 parâmetros ao mesmo tempo,

nos mesmos intervalos de -30% a +30%. Mas, nesse caso, uma nova otimização para encontrar o novo propulsor ideal foi realizada para cada nova combinação de parâmetros analisada.

Por fim, todos os valores foram sistematizados e tabelados, permitindo quantificar a robustez do projeto realizado frente a incertezas existentes na estimativa da resistência ao avanço do casco.

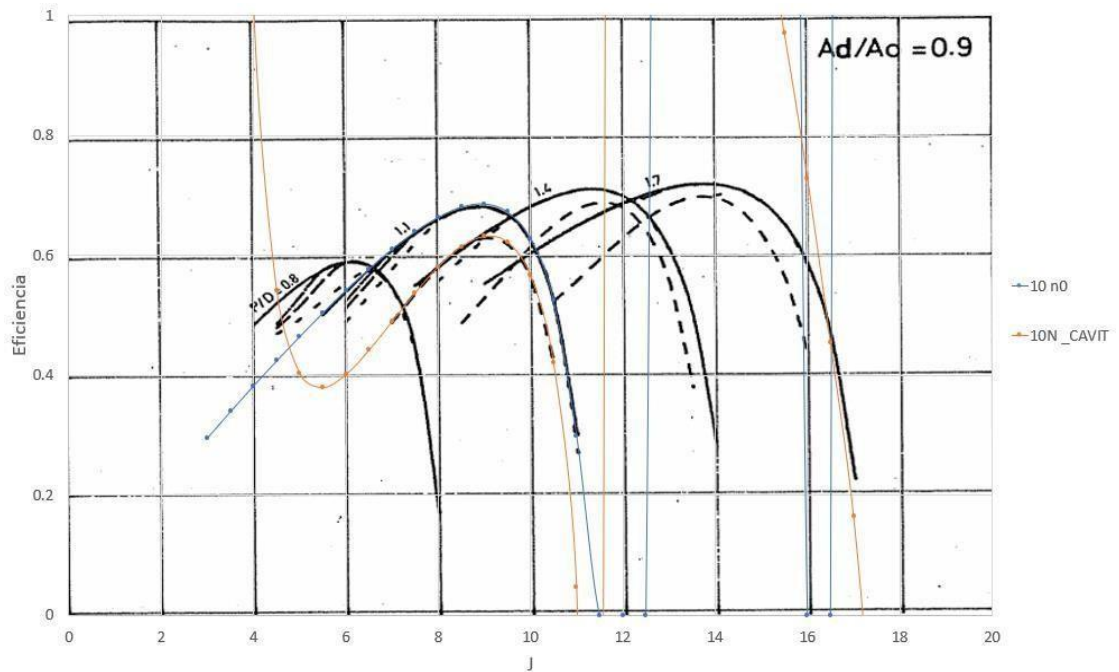
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 VALIDAÇÃO DO ESTUDO REALIZADO

Com o intuito de verificar o funcionamento da ferramenta, foi realizado uma validação comparando-se os gráficos presentes em Radojic (1988) com aqueles gerados pela planilha desenvolvida neste trabalho. Alguns dos resultados obtidos podem ser vistos nas Figuras 27, 28 e 29.

Na Figura 27 é apresentado em preto as curvas de eficiência em função de J do modelo original de Radojic (1988) para as razões de P/D de 0,8, 1,1, 1,4 e 1,7, mantendo uma razão de áreas A_D/A_0 de 0,9. Considerando apenas a razão P/D de 1,1, em azul está representado o resultado da eficiência sem cavitação, enquanto que em laranja é mostrada a eficiência do propulsor com cavitação, ambas calculadas pelo modelo implementado neste trabalho.

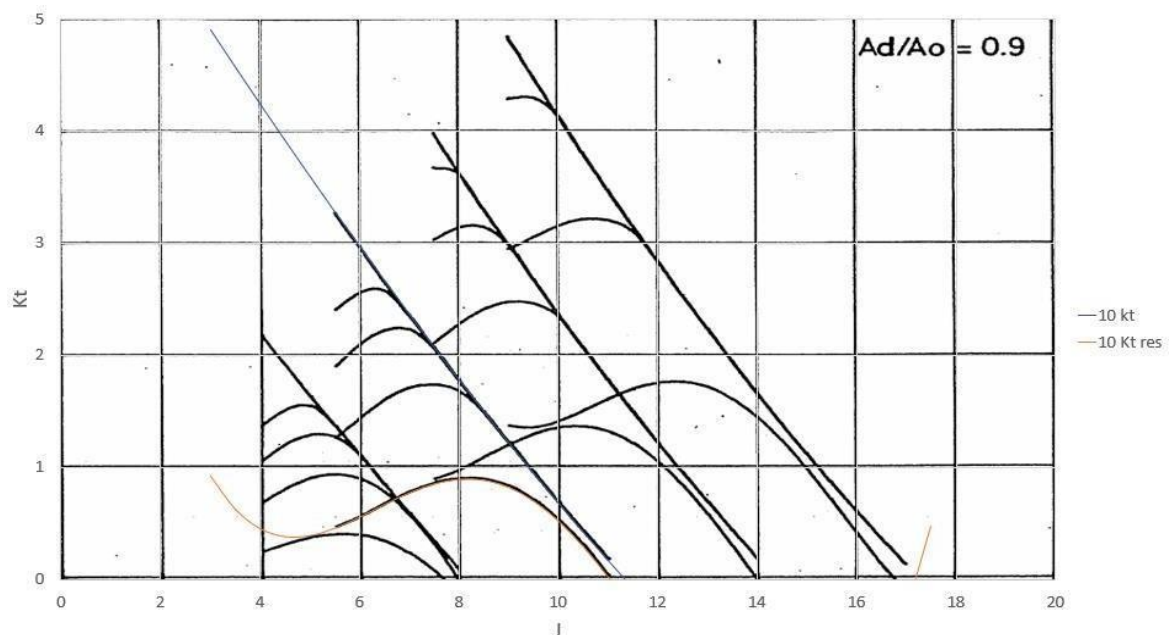
Figura 27 – Eficiência em função de J ($A_d/A_o = 0,9$, $P/d = 1,1$ e α de cavitação 0,5)



Fonte: Autor, 2024

Já a Figura 28 apresenta em preto as curvas de K_T em função de J do modelo original de Radojic (1988) para as mesmas razões de P/D de 0,8, 1,1, 1,4 e 1,7, considerando uma razão de áreas A_D/A_0 de 0,9. A curva em azul representa o valor obtido pelo modelo implementado neste trabalho para o coeficiente K_T , enquanto que a curva em laranja, o K_T resultante quando há cavitação.

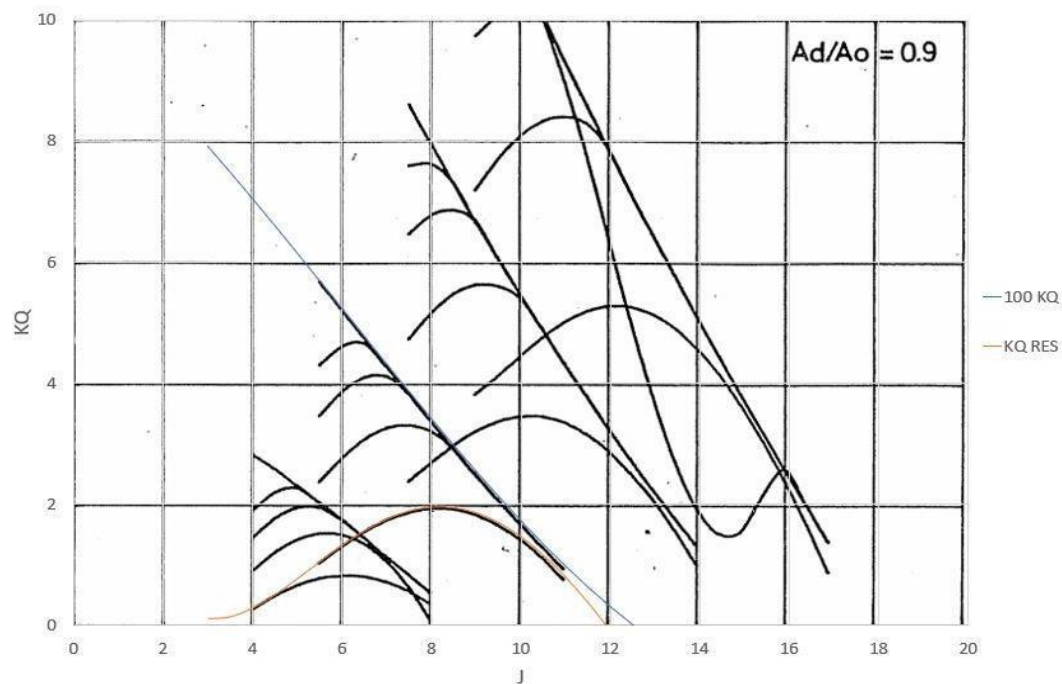
Figura 28 – K_T em função de J ($A_d/A_o = 0,9$, $P/d = 1,1$ e α de cavitação de 0,5)



Fonte: Autor, 2024

Por fim, a Figura 29 representa a análise realizada para os valores de K_q . Mais uma vez, em preto as curvas de K_q em função de J do modelo original de Radojicic (1988) para as faixas de P/D de 0,8, 1,1, 1,4 e 1,7, considerando uma razão de áreas A_D/A_0 de 0,9. A curva em azul representa o valor obtido pelo modelo implementado neste trabalho para o coeficiente K_q , enquanto em laranja, o K_q resultante quando há cavitação.

Figura 29 – K_q em função de J (para $A_D/A_0 = 0,9$, $P/d = 1,1$ e α de cavitação de 0,5)



Fonte: Autor, 2024

Durante o processo de validação, foram testados diversos pontos de operação da embarcação, sendo que tais resultados podem ser vistos nos Apêndices C, D, E, F e G deste trabalho.

Observando-se os resultados obtidos durante a análise de validação, percebe-se que a planilha desenvolvida consegue reproduzir, com erro insignificante, os resultados encontrados na referência original. Porém, é importante mencionar que a planilha desenvolvida utiliza uma faixa de valores de J maior que a referência, assim, nota-se que as curvas, por vezes, extrapolam os resultados, encontrando valores irreais e que não podem ser utilizados. Tal comportamento, no entanto, não influencia na seleção do propulsor ideal, visto que, durante o processo de otimização, o valor de J é limitado a faixa de validade do modelo.

4.2 HÉLICE IDEAL PARA O CASO BABITONGA

Considerando o estudo de caso descrito no capítulo anterior, o resultado obtido pelo programa, após a otimização, para o novo casco da equipe Babitonga, é apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Resultado preliminar caso Babitonga

RESULTADO				
kt			0.1912032	
kq			0.0459751	
J			1.15	
Ad/A0			0.5	
P/D			1.48	
Eficiencia			76.17%	
2.5% cavitação		APROVADO		
10% cavitação		APROVADO		
Cavitação máxima		APROVADO		

Fonte: Autor, 2024.

Observando os resultados mostrados na Figura 30, é possível observar que a planilha desenvolvida encontrou um propulsor com um valor de 76,17% de eficiência na velocidade de operação de 15 kts, o qual possui a razão de área (A_d/A_0) de 0,5 e a razão P/D de 1,48, além de apresentar 0% de cavitação.

Sendo assim, os valores encontrados podem ser utilizados para definir os parâmetros geométricos do propulsor da equipe Babitonga. Uma vez determinada a geometria básica do propulsor, resta determinar o diâmetro a ser utilizado no projeto.

Buscando uma combinação de diâmetro e rotação que permita o correto acoplamento com o motor, foi realizada uma análise paramétrica considerando diâmetros entre 50 mm e 300 mm, cujos resultados são mostrados na Figura 31. Destaca-se que o valor de 300 mm corresponde ao máximo diâmetro que pode ser acomodado na embarcação sem que as regras da competição sejam infringidas.

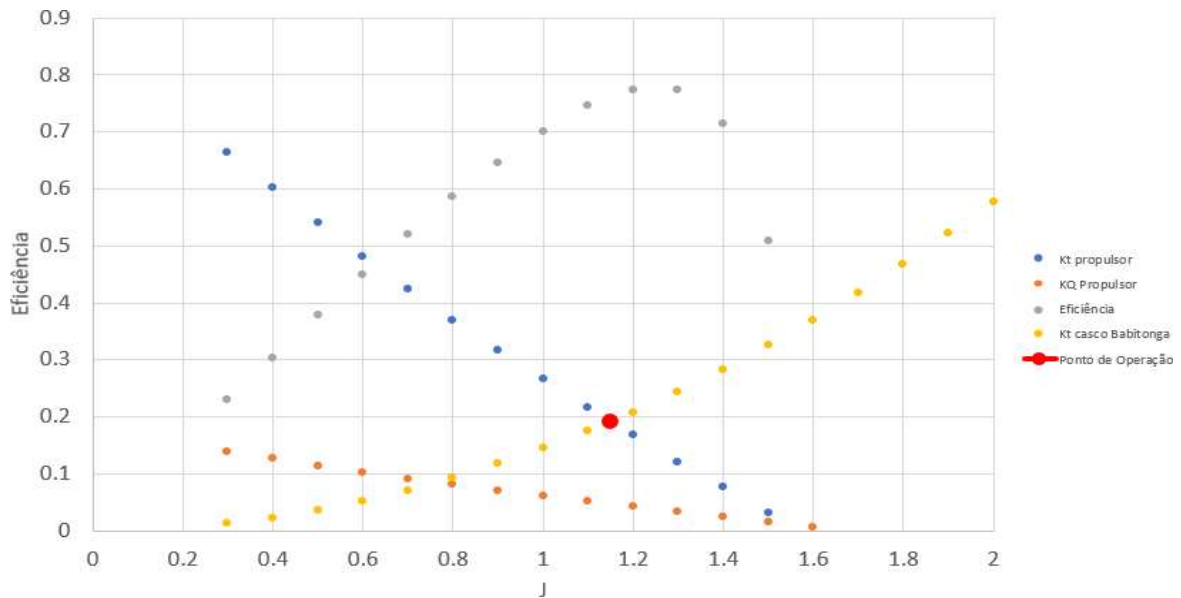
Figura 31 – Tabela de seleção do propulsor da equipe Babitonga

D(mm)	RPM	Pitch (mm)
50	5735.39	73.87545
60	4779.49	88.65054
70	4096.71	103.42563
80	3584.62	118.20072
90	3186.33	132.97581
100	2867.7	147.7509
110	2607	162.52599
120	2389.75	177.30108
130	2205.92	192.07617
140	2048.35	206.85126
150	1911.8	221.62635
160	1792.31	236.40144
170	1686.88	251.17653
180	1593.16	265.95162
190	1509.31	280.72671
200	1433.85	295.5018
210	1365.57	310.27689
220	1303.5	325.05198
230	1246.82	339.82707
240	1194.87	354.60216
250	1147.08	369.37725
260	1102.96	384.15234
270	1062.11	398.92743
280	1024.18	413.70252
290	988.861	428.47761
300	955.899	443.2527

Fonte: Autor, 2024.

A partir desses dados e considerando as informações obtidas junto a equipe sobre a rotação do motor (4000 RPM) e o sistema de redução (1:3), foi selecionado um propulsor com 210mm de diâmetro e 310mm de passo, cujos diagramas de águas livres são apresentados na Figura 32, onde o ponto vermelho destaca o ponto de operação da embarcação na velocidade de 15 nós.

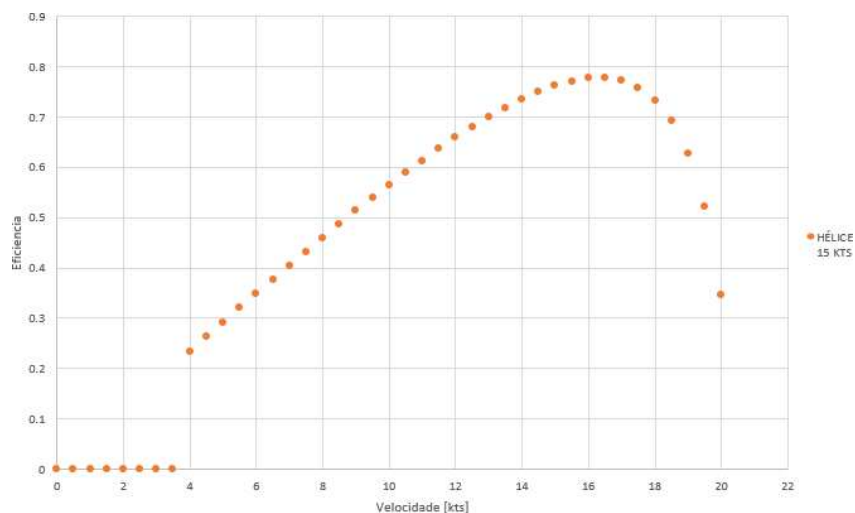
Figura 32 – Diagrama de águas livres do propulsor selecionado



Fonte: Autor, 2024.

A partir dos gráficos da Figura 32 e utilizando o algoritmo desenvolvido, torna-se possível isolar a curva de eficiência do propulsor em função da velocidade da embarcação, a qual pode ser vista na Figura 33.

Figura 33 - Curva de eficiência do propulsor



Fonte: Autor, 2024.

Analisando o gráfico da Figura 33, percebe-se que o propulsor se comporta muito bem em velocidades próximas à desejada, alcançando eficiência máxima de 77,7% em 16,5 nós, atendendo, assim, às expectativas da equipe em relação ao objetivo inicial. No entanto, destaca-se que a 7 nós (velocidade atual da embarcação) a eficiência do propulsor é de apenas 40,5%.

4.3 ANÁLISE DE INCERTEZAS DA RESISTÊNCIA

Para verificar a robustez do hélice selecionado para o caso da equipe Babbitonga, foi realizado uma análise de incertezas.

Primeiramente foi realizada a alteração manual e individual dos valores do coeficiente de esteira (w), do coeficiente de redução da força propulsora (t) e da resistência ao avanço, sem que os coeficientes geométricos do propulsor fossem alterados. Durante essa análise, cada parâmetro foi alterado isoladamente, considerando desde valores 30% menores até valores 30% maiores, em intervalos de 10%. Os resultados obtidos são sintetizados na Figura 34.

É importante observar que nessa primeira análise, os valores de razão de área (A_d/A_0) e razão passo-diâmetro (P/D) correspondem aqueles obtidos no processo de otimização descrito na seção anterior.

Figura 34 – Alteração gradual da resistência

Variação %	RESISTENCIA	Eficiencia	Dif (%)		w	Eficiencia		t	Eficiencia	Dif (%)
-30%	308.161	0.7766	1.95%		0.20203	0.7755	1.81%	0.03124	0.7626	0.12%
-20%	352.184	0.7731	1.50%		0.23089	0.7770	2.00%	0.03571	0.7623	0.08%
-10%	396.207	0.7680	0.82%		0.25975	0.7711	1.23%	0.04017	0.7620	0.04%
Prop. Encontrado	440.23	0.7617			0.28861	0.7617		0.04463	0.7617	
10%	484.253	0.7548	-0.90%		0.31747	0.7440	-2.33%	0.0491	0.7614	-0.04%
20%	528.276	0.7476	-1.85%		0.34633	0.7249	-4.83%	0.05356	0.7611	-0.08%
30%	572.299	0.7402	-2.82%		0.37519	0.7032	-7.68%	0.05802	0.7608	-0.12%

Fonte: Autor, 2024

Inicialmente observa-se que variações no coeficiente de esteira exercem a maior influência no desempenho do propulsor, podendo alterar o valor em mais de 7%, enquanto variações no coeficiente de redução da força propulsora causam efeito marginal no desempenho do propulsor.

Nota-se que, mesmo com variações consideráveis de até 30% nos valores de resistência utilizados, o propulsor encontrado sofre uma perda de apenas 2,82% em sua eficiência. Já para uma resistência até 30% menor, o propulsor pode ser mais eficiente, chegando a 77,66% de eficiência.

A seguir uma segunda análise foi realizada, desta vez buscando avaliar como a variação nos parâmetros de entrada afetam a otimização das características geométricas do propulsor.

Nessa segunda análise, após os parâmetros de entrada serem alterados, um novo processo de otimização foi conduzido, selecionando um novo propulsor ótimo para cada

caso estudado. Os resultados obtidos nesse processo são sintetizados na Figura 35, que apresenta os novos parâmetros de entrada, bem como as características de cada propulsor selecionado.

Figura 35 – Alteração de todos os parâmetros do propulsor em conjunto

	VARIACÃO (%)						
	-30	-20	-10	0	10	20	30
J	1.33064	1.26480	1.20509	1.15081	1.10139	1.05651	1.01589
Res	308.16100	352.18400	396.20700	440.23000	484.25300	528.27600	572.29900
w	0.20203	0.23089	0.25975	0.28861	0.31747	0.34633	0.37519
Ae/A0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
t	0.03124	0.03571	0.04017	0.04463	0.04910	0.05356	0.05802
P/D	1.63332	1.57882	1.52669	1.47745	1.43135	1.38881	1.35010
NO	78.10%	77.51%	76.85%	76.17%	75.47%	74.77%	74.07%
VARIACÃO DO RESULTADO	2.53%	1.75%	0.90%	-	-0.92%	-1.84%	-2.76%

Fonte: Autor, 2024.

Os resultados da segunda análise mostraram variações menores, com diferenças inferiores a 3% na eficiência dos propulsores selecionados. Isso ocorre pois cada novo processo de otimização é capaz de buscar o melhor propulsor para cada combinação de parâmetros de entrada, compensando as variações impostas ao modelo.

É interessante observar que a medida que a resistência ao avanço aumenta, o propulsor ótimo passa a ter um menor valor de P/D, mantendo a relação Ae/Ao nos menores valores possíveis.

5 CONCLUSÃO

O hélice possui influência determinante no desempenho de uma embarcação, fazendo com que a correta seleção do propulsor tenha grande importância em um projeto. Paradoxalmente, os métodos utilizados para projeto de propulsores são escassos, bastante complexos e necessitam de conhecimento e experiência do projetista.

Durante a execução deste trabalho foi apresentado uma revisão de conceitos básicos de propulsores navais, incluindo os fundamentos de hélices, os principais parâmetros geométricos que descrevem uma pá, bem como uma breve discussão sobre a cavitação e seu efeito no desempenho de um propulsor.

Além disso, apresentou-se a série Gawn-Burrill, discutindo a aplicabilidade, a faixa de validade, o funcionamento e os possíveis modelos computacionais existentes para descrevê-la.

A planilha construída utilizou o método de Radojic (1988) para os cálculos dos coeficientes de avanço e torque, servindo como um facilitador para o processo de seleção de um propulsor da série Gawn-Burrill. Além de facilitar o processo, a planilha permite que técnicas de otimização sejam empregadas, automatizando e aprimorando os projetos realizados.

O processo de validação demonstrou que a planilha desenvolvida é capaz de reproduzir os resultados da literatura com erros insignificantes.

A seguir foi realizado um estudo de caso referente a seleção do propulsor para o novo casco da equipe Babitonga. Utilizando a planilha desenvolvida, foi possível selecionar o propulsor que entrega a maior eficiência possível na velocidade de operação esperada para o projeto e que respeita os limites de cavitação impostos.

Por fim, a análise de incertezas realizada mostrou a influência que possíveis erros nos parâmetros de entrada causam nas características e no desempenho do propulsor selecionado para o projeto.

REFERÊNCIAS

- BARNABY, Sydney W. **Marine propellers**. 3. ed. Nova Iorque: E. & F. N. Spon, 1891.
- CARLTON, John. **Marine propellers and propulsion**. 2. ed. Grã-Bretanha: Elsevier, 2007.
- COLEMAN, Hugh W.; STEELE, W. Glenn. **Experimentation and uncertainty analysis for engineers**. 2. ed. Nova Iorque: Wiley-Interscience, 1998.
- FONSECA, Maurílio M. **Arte Naval**. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, 2005.
- GERR, Dave. **Propeller Handbook**: the complete reference for choosing, installing and understanding boat propellers. Camden: International Marine, 1989.
- KAMIENSKI, Marcos Alexandre. **Análise Experimental de Hélices: Ensaio Simplificado de Tração Estática**. 2016. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.
- LINDBERGH, Elian; AHSTRAND, Felicia. **Method to Predict Hull Resistance in the Process of Designing Electric Boats**. Estocolmo: X Shore, 2020.
- MENDES, Elisa Rego. **Procedimentos para Seleção Otimizada de um Propulsor da Série B**. 2015. 81 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.
- MOLLAND, A.; TURNOCK, S.; HUDSON, D. **Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power**. USA: Cambridge University Press, 2011.
- PADOVEZI, C. **Aplicação de resultados de escala real no projeto de hélices de embarcações fluviais**. 87 f. 1997. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1997.
- RADOJCIC, Dejan. **Reflections on Power Prediction Modeling of Conventional High-Speed Craft**. Belgrade: Springer, 2018.
- RADOJCIC, Dejan. **Optimal preliminary propeller design using nonlinear constrained mathematical programming technique**. Southampton: Ship Science Report, 1985

RADOJCIC, Dejan; SIMIC, Aleksandar; KALAJDZIC, Milan. Fifty Years of the Gawn-Burril KCA propeller series. **The International Journal of Small Craft Technology**, Belgrado, v. 151, set. 2009.

RADOJCIC, Dejan. **Mathematical Model of Segmental Section Propeller Series for Open-Water and Cavitating Conditions Applicable** In: SNAME PROPELLERS '88 SYMPOSIUM, 5., 1988, Virginia. Simposio. Jersey: Sname, 1988.

SAVITSKY, Daniel. Hydrodynamic design of planing hulls. **Marine Technology and SNAME News**, v. 1, n. 04, p. 71-95, 1964.

TRINDADE, J. **Hidrodinâmica e Propulsão**: engenharia de máquinas marítimas. [S. l.]: ENIDH, 2012.

**APÊNDICE A – COEFICIENTES POLINOMIAIS DE GAWN-BURRIL PARA REGIME DE
ÁGUAS ABERTAS SEM CAVITAÇÃO**

$$K_t = \sum_1^{16} C_t \cdot 10^e (Ad/Ao)^x \cdot (P/D)^y \cdot (J)^z$$

$$K_q = \sum_1^{17} C_q \cdot 10^e (Ad/Ao)^x \cdot (P/D)^y \cdot (J)^z$$

C_t	e	x	y	z
0.1193852	0	0	0	0
-0.6574682	0	0	0	1
0.3493294	0	0	1	0
0.4119366	0	0	1	1
-0.1991927	0	0	2	1
5.8630510	-2	0	2	2
-1.1077350	-2	0	2	3
-0.1341679	0	1	0	0
0.2628839	0	1	0	1
-0.5217023	0	1	1	1
0.2970728	0	1	2	0
6.1525800	-2	2	1	3
-2.4708400	-2	2	2	3
-4.0801660	-3	1	6	0
4.1542010	-3	1	6	1
-1.1364520	-3	2	6	0

C_q	e	x	y	z
1.5411660	-3	0	0	0
0.1091688	0	0	0	1
-0.3102420	0	0	0	2
0.1547428	0	0	0	3
-4.3706150	-2	0	1	0
0.2490295	0	0	1	2
-0.1594602	0	0	1	3
8.5367470	-2	0	2	0
-9.5121630	-2	0	2	1
-9.3203070	-3	0	2	2
3.2878050	-2	0	2	3
5.4960340	-2	1	0	1
-4.8650630	-2	1	1	0
-0.1062500	0	1	1	1
8.5299550	-2	1	2	0
1.1010230	-2	2	0	3
-3.1517560	-3	2	2	2

**APÊNDICE B – COEFICIENTES POLINOMIAIS DE GAWN-BURRIL PARA REGIME DE
ÁGUAS ABERTAS COM CAVITAÇÃO**

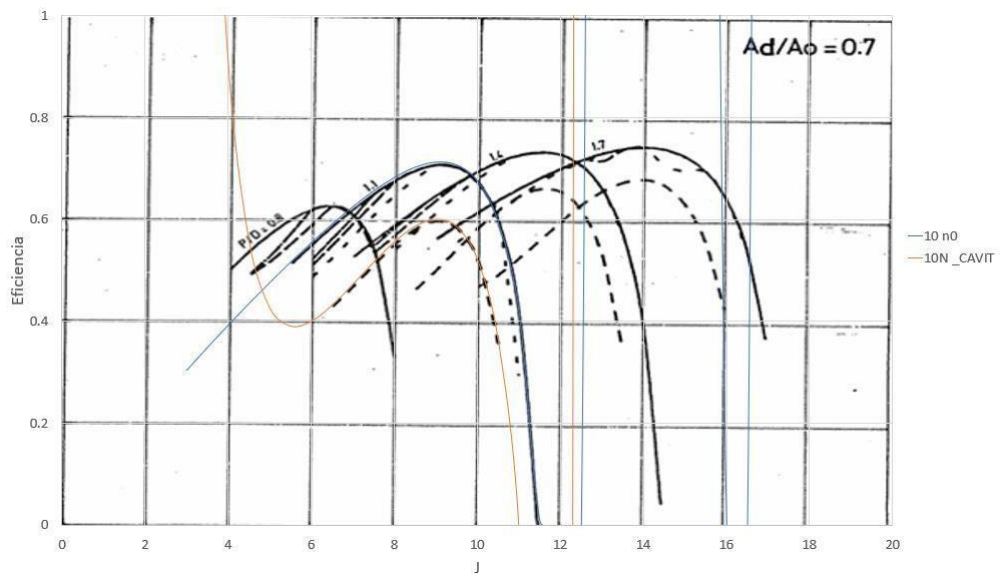
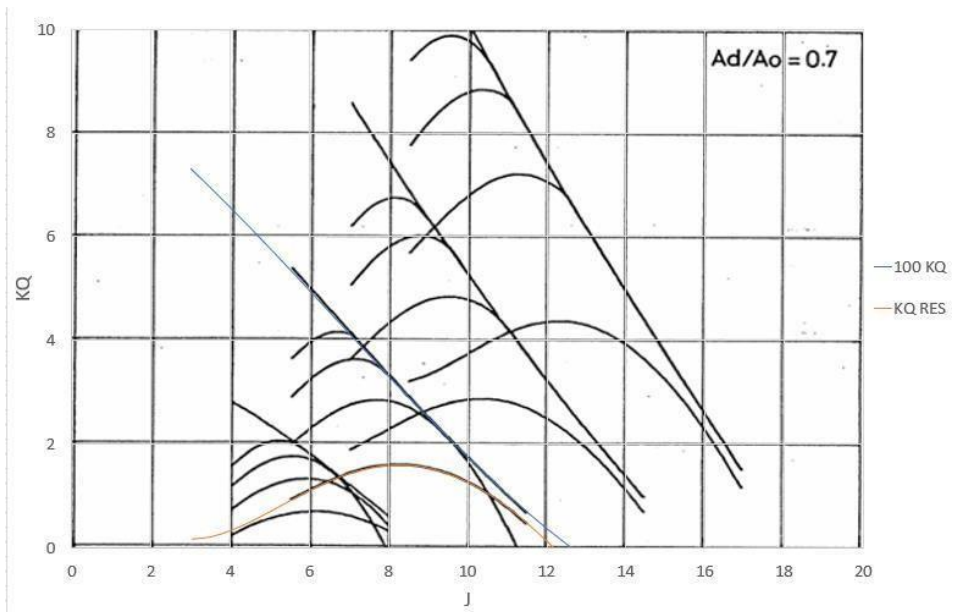
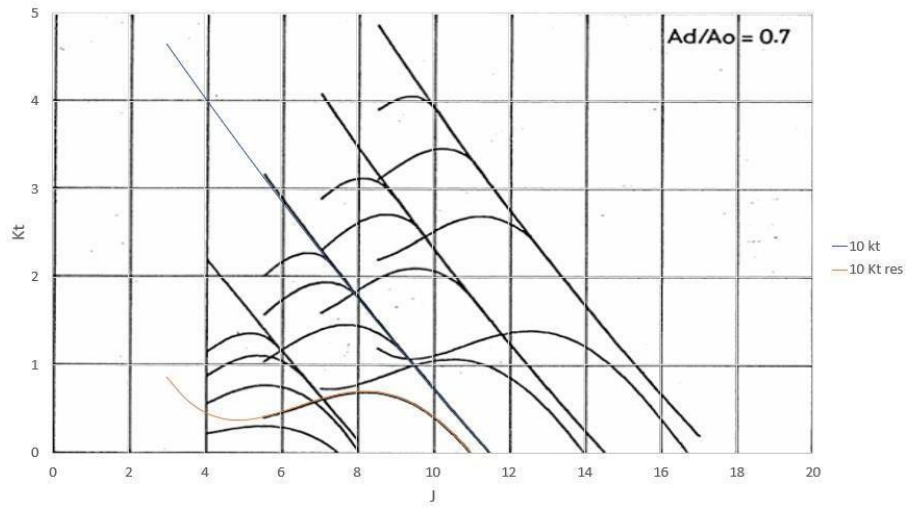
$$\Delta K_t = \sum_1^{20} d_t 10^{e(Ad/Ao)^s} \cdot (\sigma_R)^t \cdot (K_t)^u \cdot (P/D)^v$$

$$\Delta K_q = \sum_1^{18} d_q 10^{e(Ad/Ao)^s} \cdot (\sigma_R)^t \cdot (K_t)^u \cdot (P/D)^v$$

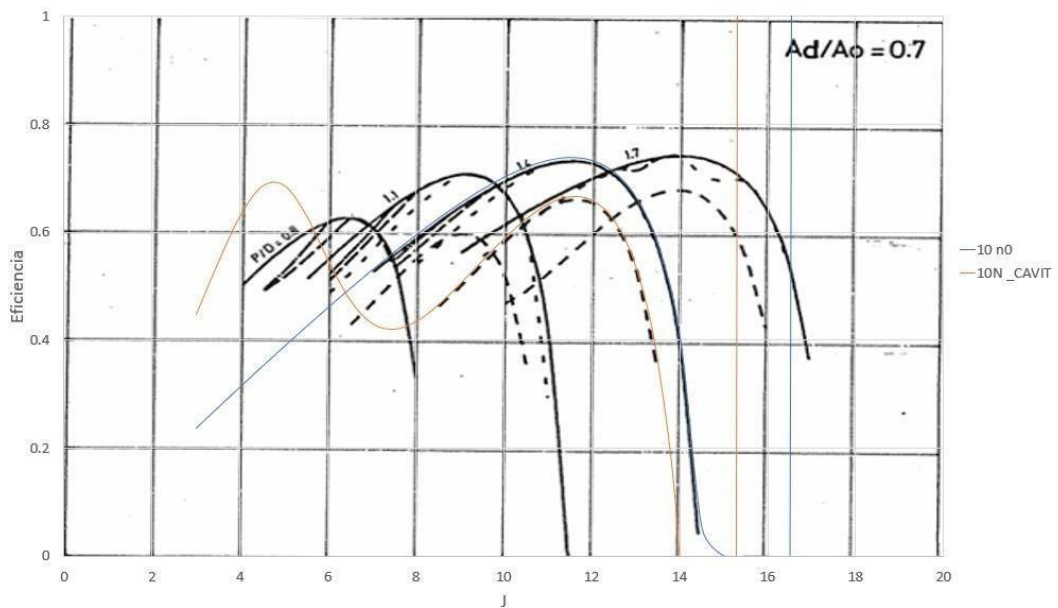
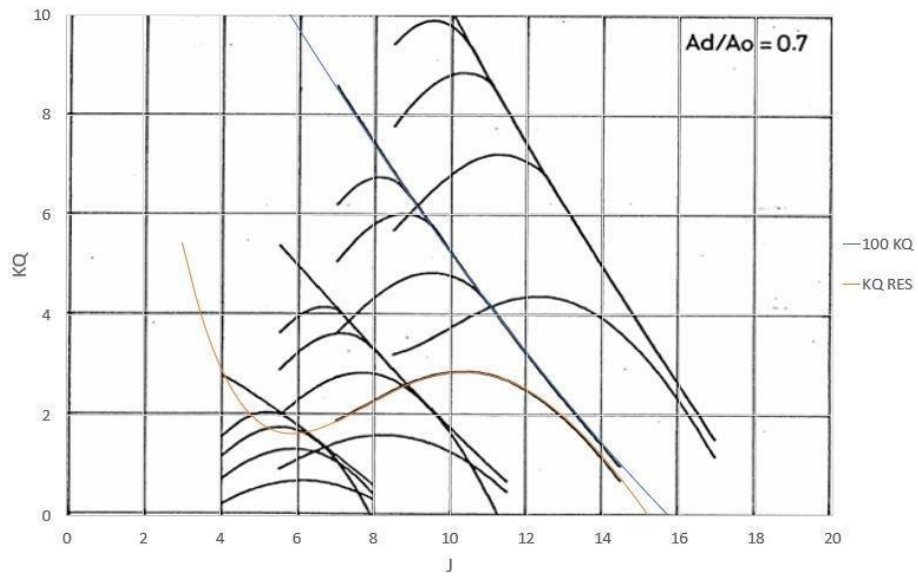
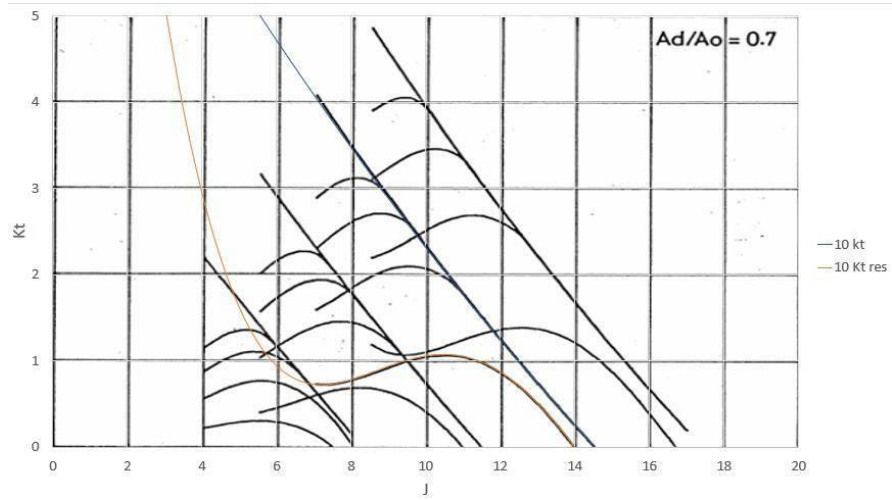
d_t	e	s	t	u	v
6.688144	-2	0	0	0	0
3.579195	0	0	0	2	0
-5.700350	0	0	0	3	0
-1.359994	0	1	1	0	0
-8.111903	0	1	1	1	0
4.770548	1	1	1	3	0
-2.313208	-1	2	1	0	0
-1.387858	1	2	1	2	0
4.992201	1	2	1	3	0
-7.161204	1	2	1	4	0
1.721436	1	2	2	0	0
2.322218	1	2	2	1	0
-1.156897	2	2	2	2	0
5.014178	-2	0	0	0	2
-6.555364	-2	0	0	1	2
2.852867	-1	1	0	1	1
-8.081759	-1	1	1	0	1
8.671852	1	3	2	5	0
-3.727835	1	3	3	0	0
8.043970	1	3	3	1	0

d_q	e	s	t	u	v
4.024475	-3	0	0	0	0
1.202447	-1	0	0	2	0
-9.836070	-2	1	1	0	0
-8.318840	-1	1	1	1	0
5.098177	0	1	1	3	0
-5.192839	-1	2	1	1	0
2.641109	0	2	2	0	0
-1.688934	1	2	2	3	0
4.928417	-2	0	0	1	1
1.024274	-2	0	0	0	2
-1.194521	-1	0	1	1	1
5.498736	-2	1	0	1	1
-2.488235	-1	1	1	0	1
-5.832879	-1	0	0	5	0
1.503955	-1	0	3	0	0
-3.316121	0	3	3	0	0
3.890792	0	3	3	1	0
1.682032	1	3	3	3	0

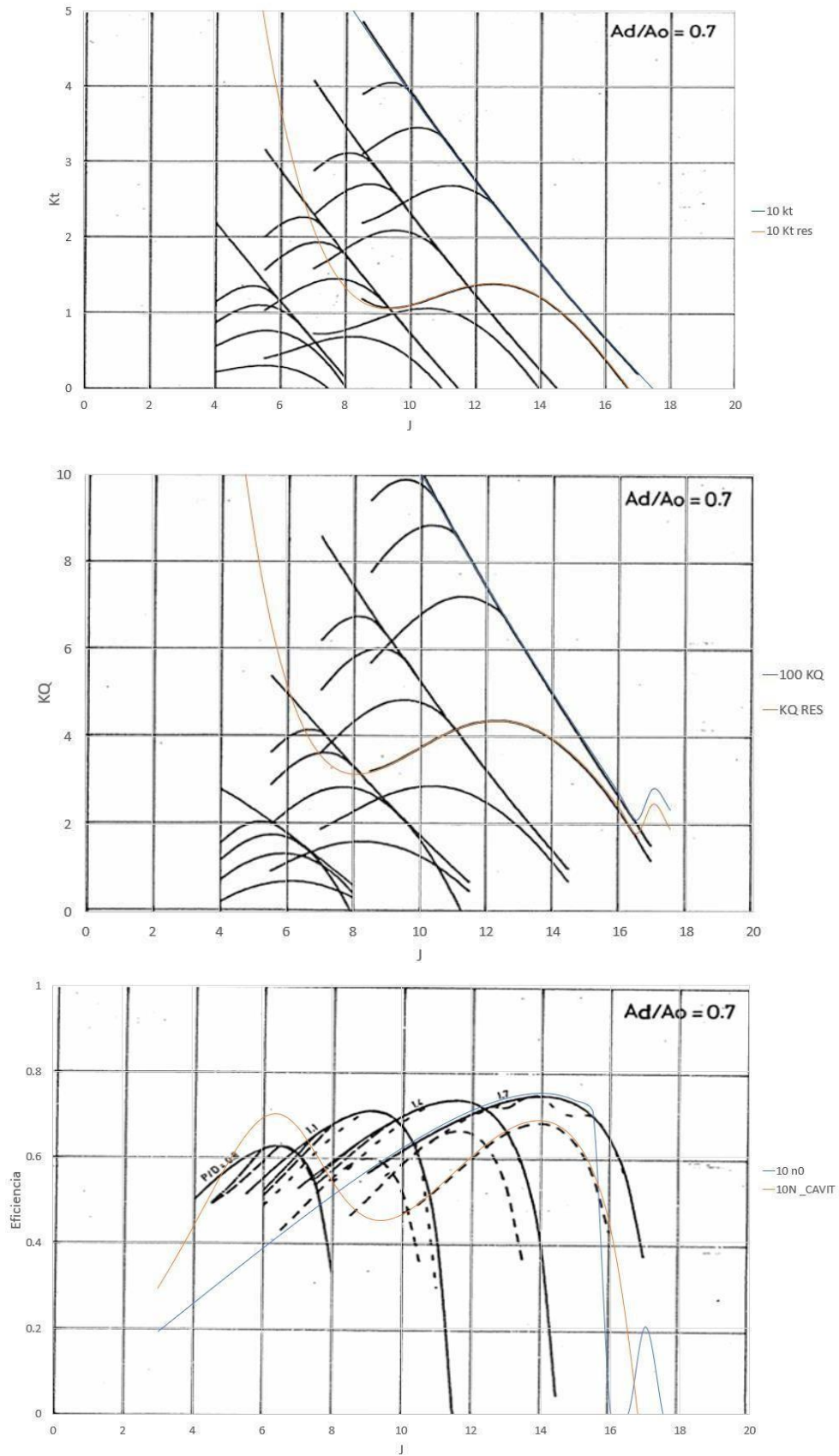
APÊNDICE C – DIAGRAMAS DO MÉTODO DE RADOJCIC PARA $Ad/Ao = 0,7$ E $P/D = 1,1$



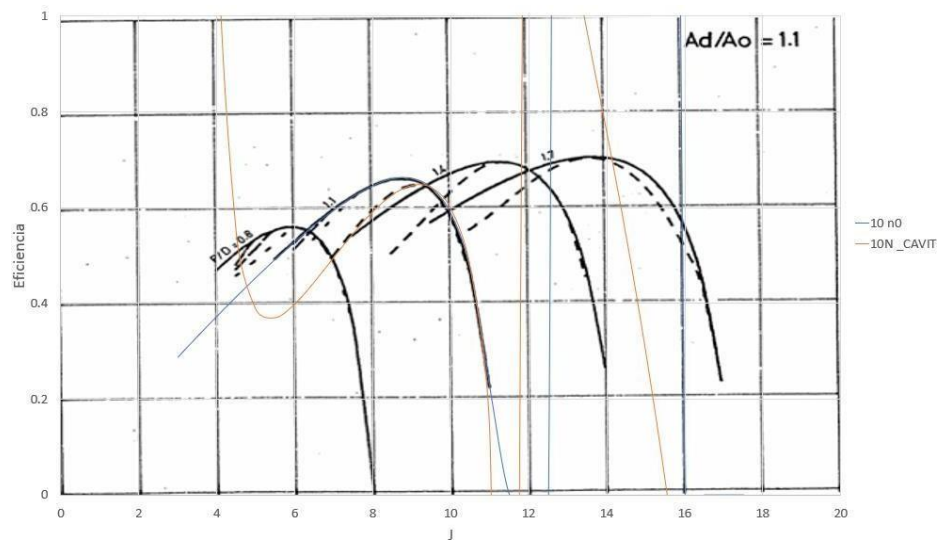
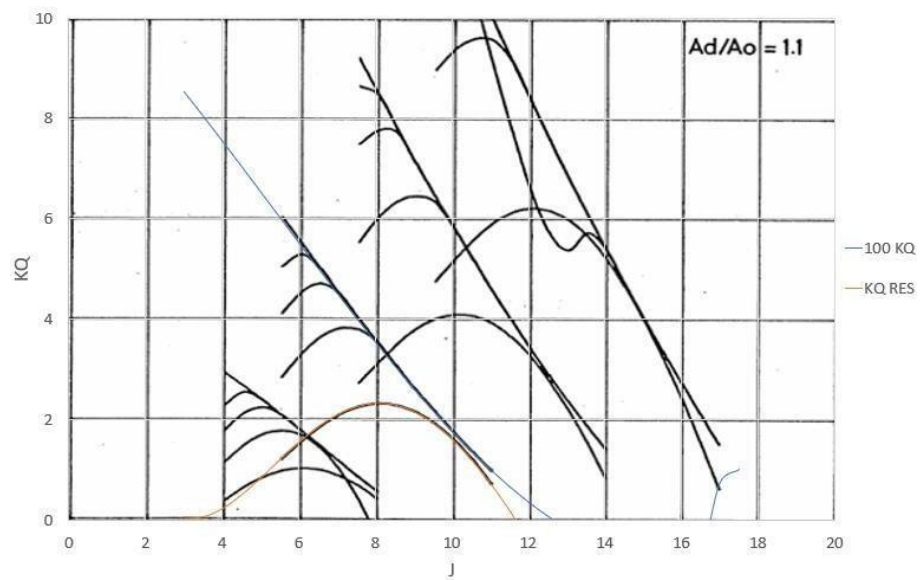
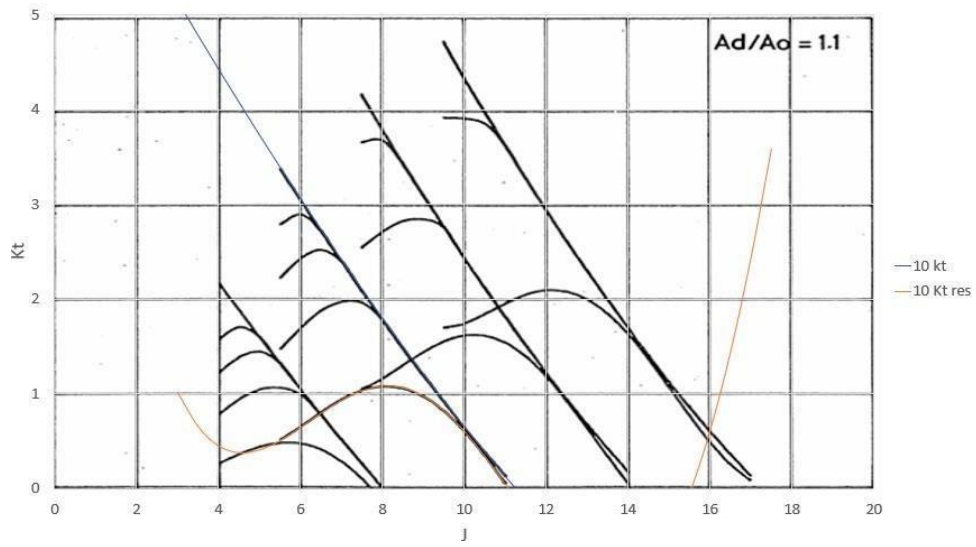
APÊNDICE D – DIAGRAMAS DO MÉTODO DE RADOJCIC PARA $Ad/Ao = 0,7$ E $P/D = 1,4$



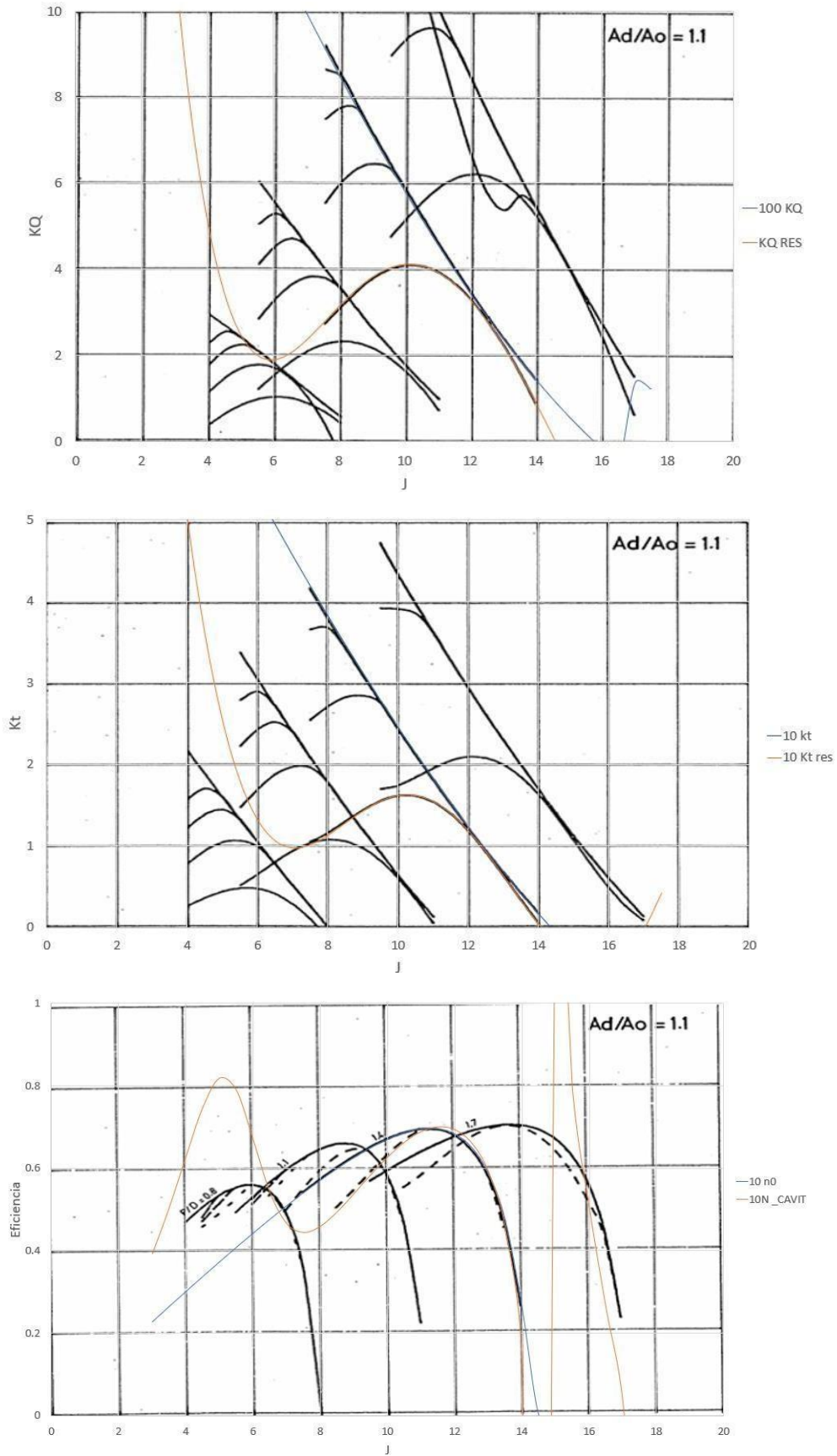
APÊNDICE E – DIAGRAMAS DO MÉTODO DE RADOJCIC PARA $AD/A_0 = 0,7$ E $P/D = 1,7$



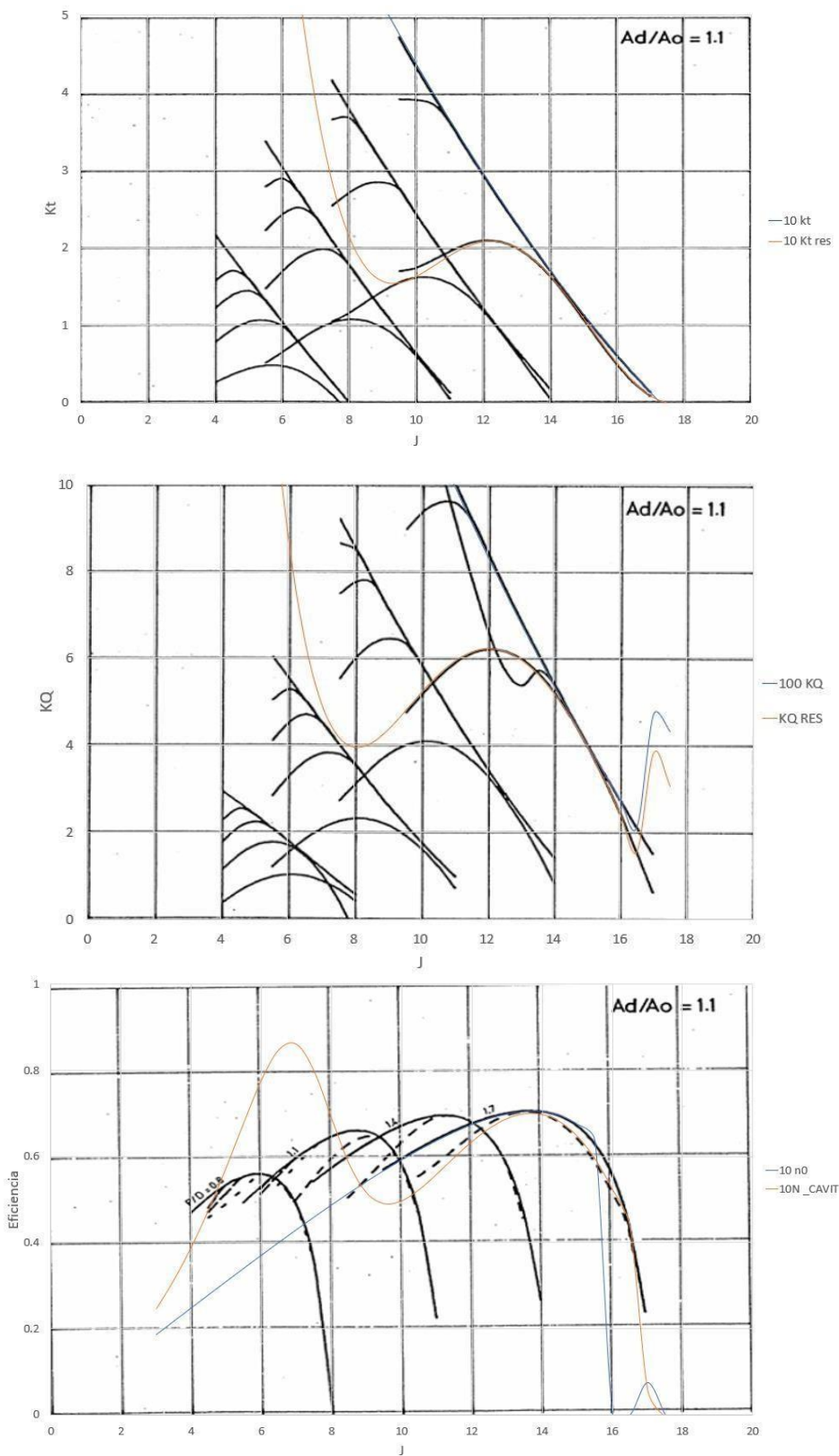
APÊNDICE F – DIAGRAMAS DO MÉTODO DE RADOJCIC PARA $Ad/Ao = 1,1$ E $P/D = 1,1$



APÊNDICE G – DIAGRAMAS DO MÉTODO DE RADOJCIC PARA $Ad/Ao = 1,1$ E $P/D = 1,4$



**APÊNDICE H – DIAGRAMAS DO MÉTODO DE RADOJCIC PARA $Ad/Ao = 1,1$
E $P/D = 1,7$**



APÊNDICE I – RESISTÊNCIAS DO CASCO BABITONGA OBTIDAS PELO SOFTWARE MAXSURF

Velocidade (kts)	Resistência (N)
6	130,33
6,5	144,37
7	159,12
7,5	174,53
8	190,53
8,5	207,07
9	224,07
9,5	241,46
10	259,17
10,5	277,14
11	295,29
11,5	313,56
12	331,88
12,5	350,19
13	368,44
13,5	386,59
14	404,61
14,5	422,49
15	440,23
15,5	457,83
16	475,32
16,5	492,74
17	510,13
17,5	527,53
18	545
18,5	562,59
19	580,34
19,5	598,3
20	616,5