

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

PEDRO DE PIETRO MENDES

AUTOMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE SELEÇÃO DE PROPULSORES DA SÉRIE
KAPLAN PARA MAXIMIZAR O EMPUXO EM BOLLARD PULL APLICADO A
MODELOS DE REBOCADORES EM ESCALA REDUZIDA

Joinville
2022

PEDRO DE PIETRO MENDES

AUTOMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE SELEÇÃO DE PROPULSORES DA SÉRIE
KAPLAN PARA MAXIMIZAR O EMPUXO EM BOLLARD PULL APLICADO A
MODELOS DE REBOCADORES EM ESCALA REDUZIDA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Naval, no curso Engenharia Naval da
Universidade Federal de Santa Catarina,
Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Weihmann

Joinville
2022

PEDRO DE PIETRO MENDES

**AUTOMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE SELEÇÃO DE PROPULSORES DA SÉRIE
KAPLAN PARA MAXIMIZAR O EMPUXO EM BOLLARD PULL APLICADO A
MODELOS DE REBOCADORES EM ESCALA REDUZIDA:**

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

Joinville (SC), 14 de Fevereiro de 2022, .

Prof^a. Dra. Viviane Lilian Soethe
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Lucas Weihmann, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Dr. Eng.
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto, Dr.
Eng.
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

O projeto do sistema propulsivo influencia diretamente no desempenho de uma embarcação, sendo seu correto dimensionamento fundamental para se atingir os objetivos do projeto. No cenário de embarcações que operam sob altos carregamentos em baixas velocidades, tipicamente rebocadores, torna-se interessante desenvolver o sistema propulsivo de forma a entregar o maior empuxo na condição de *bollard pull*. Durante as fases de projeto de uma embarcação, séries sistemáticas são amplamente utilizadas para o dimensionamento dos hélices. Dentre estas séries destaca-se a Série Kaplan, cujos hélices operam em conjunto com tubulões e sua aplicação é ideal em operações que requerem elevado empuxo em baixas velocidades. O objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de uma ferramenta computacional de automatização do processo de seleção de hélices da Série Kaplan, associados ao tubulão 19A, capaz de encontrar as características do hélice que consiga entregar o maior empuxo na condição de *bollard pull*, e que respeite as restrições de potência do motor e limites de cavitação. Partindo do hélice selecionado que maximiza o empuxo em *bollard pull*, a ferramenta permite estimar a velocidade máxima desenvolvida pela embarcação em corrida livre, a partir da geometria do casco e de dados confiáveis da resistência ao avanço. Apesar da Série Kaplan ser amplamente utilizada no projeto de embarcações em escala real, este trabalho contempla a análise do sistema propulsivo de um rebocador nautimodelo utilizado na competição DUNA (Desafio Universitário de Nautidesign). Foram realizados ensaios em um tanque de prova simplificado, para avaliar o desempenho de empuxo do nautimodelo, possibilitando comparar os resultados obtidos com os dados teóricos. Os resultados obtidos levantaram questionamentos à respeito de se realizar o projeto para condição de *bollard pull* adotando coeficiente de avanço nulo, principalmente pela divergência entre os resultados obtidos no teste prático e aqueles previstos no projeto, contudo evidenciou a importância de se ter um processo de construção e fabricação tão rigoroso quanto a fase de projeto. Apesar das divergências, a ferramenta desenvolvida mostra-se bastante eficiente em etapas iniciais de projeto para análise dos diagramas em águas abertas dos hélices da Série Kaplan, permitindo desenvolver diferentes metodologias para seleção de propulsores tendo esta ferramenta computacional como base e levando em consideração os questionamentos levantados neste trabalho.

Palavras-chave: Bollard Pull, Corrida Livre, Série Kaplan, Nautimodelo, DUNA.

ABSTRACT

The propulsion system design directly influences the performance of a vessel, and its correct dimensioning is fundamental to achieve the project objectives. In the scenario of vessels that operate under high loads at low speeds, typically tugs, it becomes interesting to develop the propulsion system in order to deliver the greatest thrust in the bollard pull condition. During the design phases of a vessel, systematic series are widely used for propeller design. Among these series, the Kaplan Screw Series stands out, whose propellers operate in combination with nozzles and its application is ideal in operations that require high thrust at low speeds. The objective of this work is to introduce the development of a computational tool for automating the selection process of a Kaplan Series propeller, in combination with nozzle 19A, capable of finding the characteristics of a propeller that can deliver the greatest thrust in the bollard pull condition, and that respects engine power restrictions and cavitation limits. Starting from the selected propeller that maximizes the thrust in bollard pull, the tool allows to estimate the maximum speed developed by the vessel in free running, from the hull geometry and reliable data of ship resistance. Although the Kaplan Series is widely used in the design of full-scale vessels, this work includes the analysis of the propulsive system for a small scale model of a tug used in the DUNA (University Challenge of Nautidesign) competition. Tests were carried out in simplified test tank, to evaluate the thrust performance of the model, making it possible to compare the results obtained with the theoretical data. The obtained results raised questions about the design for the *bollard pull* condition adopting $J=0$, mainly by the divergence between the results obtained in the practical test and those predicted in the design, however evidenced the importance of having a construction and manufacturing process as rigorous as the design phase. Despite the divergences, the tool developed has shown to be very efficient in initial design stages for the analysis of the open water diagrams of Kaplan Series propellers, allowing the development of different methodologies for propeller selection using this computational tool as a basis and taking into account the questions raised in this work.

Keywords: Bollard Pull, Free Run, Kaplan Series, small scale model, DUNA..

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha família pelo apoio, sem palavras para vocês. Amor e admiração incondicionais. Amo vocês eternamente.

Às minhas grandes amigas Marina Santochi e Laura Masotti, pelo apoio e motivação principalmente durante o fim deste ciclo que se encerra, sem julgamentos, só amor e parceria. Vocês são luz, amo vocês demais.

Ao meu amigo e colega Matheus Farah, que me ajudou muito durante a formação, tanto em questões acadêmicas como nas questões da vida.

À Anny e seus pais, Paulo e Maura, por me rodearem de amor e me apoiarem como poucos durante boa parte da faculdade. Obrigado família.

Ao pessoal da organização do DUNA, agradeço pelo apoio durante a realização dos testes práticos.

Ao pessoal da Equipe *Seven Seas*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre mantiveram o sorriso no rosto e a esperança até nas situações mais intensas. Especialmente aqueles que estiveram ao meu lado durante o período do DUNA, Gabriel e Maria e me ajudaram muito na realização dos experimentos.

Um salve especial às equipes do DUNA: Cabanos, Tucunaré e Poli. Obrigado pelas vivências durante o período da competição e pelo apoio durante a realização dos experimentos.

Agradeço ao meu orientador, Lucas Weihmann, por me guiar durante o desenvolvimento deste trabalho sempre com muita paciência e dedicação, muito obrigado pelo aprendizado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rebocador com propulsão convencional de 2 hélices.	17
Figura 2 – Rebocador com propulsão azimutal de 2 hélices.	18
Figura 3 – Lâminas verticais móveis de um propulsor cicloidal.	18
Figura 4 – Rebocador de Propulsão Cicloidal.	19
Figura 5 – Diferença de pressão no perfil.	20
Figura 6 – Bosso,plano do propulsor e linhas principais.	21
Figura 7 – Perfil de seção de pá.	22
Figura 8 – Passo do hélice.	23
Figura 9 – Equipamento de teste para águas abertas com hélices associados a tubulões.	25
Figura 10 – Diagrama em águas abertas para o hélice Ka 4-70 da Série Kaplan associado ao tubulão 19A no primeiro quadrante.	27
Figura 11 – Diagrama de Burril.	31
Figura 12 – Parcelas das potências de uma embarcação.	32
Figura 13 – Fluxograma do funcionamento da seleção do hélice em bollard pull.	38
Figura 14 – Fluxograma da estimativa da velocidade de serviço máxima.	39
Figura 15 – Display da planilha Série Kaplan para condição de bollard pull.	40
Figura 16 – Display da planilha Série Kaplan para condição de corrida livre.	41
Figura 17 – Diagrama de águas abertas para o Ka 4-70 com P/D de 0.6	42
Figura 18 – Análise da transferência de potência motor-transmissão-hélice	43
Figura 19 – Parâmetros de saída do desempenho do propulsor analisado.	44
Figura 20 – Curvas de tendência dos limites de cavitação do Diagrama de Burril.	45
Figura 21 – Análise da cavitação e indicador de aprovação ou reprovação do limite estipulado.	46
Figura 22 – Curva de potência do motor 101410212 da Imobras utilizado na competição.	50
Figura 23 – Sistema de transmissão do modelo	50
Figura 24 – Esquema do ensaio de bollard pull.	55
Figura 25 – Dados de rotação x empuxo do hélice Ka 4-70 da Equipe Cabanos.	56
Figura .1 – Coeficientes dos polinômios da Série Kaplan	65
Figura .2 – Coeficientes dos polinômios da Série Kaplan	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de w e t - Oortmerssen	29
Tabela 2 – Características hidrostáticas do modelo para o calado de projeto . .	49
Tabela 3 – Transferência de potência motor-transmissão-hélice da Equipe Cabanos.	51
Tabela 4 – Parâmetros de saída do desempenho do propulsor selecionado pela Equipe Cabanos	52
Tabela 5 – Transferência de potência motor-transmissão-hélice resultado da automatização	52
Tabela 6 – Parâmetros de saída do desempenho do propulsor resultado da automatização.	53
Tabela 7 – Parâmetros de saída do desempenho do propulsor resultado da automatização para o hélice Ka 4-70.	54
Tabela 8 – Itens utilizados no ensaio de bollard pull.	54

LISTA DE SÍMBOLOS

x	Coordenada longitudinal do sistema cartesiano	[m]
Z	Número de pás	
D	Diâmetro máximo do hélice	
$\frac{P}{D}$	Razão de passo	
A_0	Área do disco	[m^2]
A_E	Área expandida	[m^2]
$\frac{A_E}{A_0}$	Razão de áreas	
A_P	Área projetada	[m^2]
K_T	Coeficiente de empuxo	
K_{TN}	Coeficiente de empuxo do tubulão	
K_Q	Coeficiente de torque	
J	Coeficiente de avanço	
T	Empuxo fornecido pelo hélice	[N]
T_N	Empuxo fornecido pelo tubulão	[N]
Q	Torque no eixo do propulsor	[$N.m$]
n	Rotação do hélice	[rps]
V_a	Velocidade de avanço	[m/s]
n_o	Eficiência do propulsor em águas abertas	
V_s	Velocidade de serviço	[m/s]
T_{req}	Empuxo requerido pela embarcação	[N]
R_T	Resistência do casco da embarcação	[N]
w	Coeficiente de esteira	

t	Coeficiente de redução da força propulsiva	
C_P	Coeficiente prismático	
F_n	Número de Froude	
L	Comprimento	[m]
B	Boca	[m]
T	Calado	[m]
LCB	Posição longitudinal do centro de flutuação	[m]
MR	Margem de resistência	
ρ	Massa específica do fluido	[kg/m ³]
τ_c	Coeficiente de Burril	
σ	Número de cavitação	
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h	Profundidade do hub do hélice	[m]
P_{atm}	Pressão atmosférica	[N/m ²]
P_v	Pressão de vapor da água salgada	[N/m ²]
EHP	Potência efetiva	[W]
THP	Potência de empuxo	[W]
PHP	Potência absorvida pelo hélice	[W]
SHP	Potência do eixo	[W]
BHP	Potência de máquina	[W]
n_h	Eficiência do casco	
n_t	Eficiência da transmissão	
n_p	Eficiência do propulsor	
n_{p0}	Eficiência do propulsor em águas abertas	
n_{rr}	Eficiência relativa rotativa	
c_p	Coeficiente propulsivo	

$K_{Q_{eixo}}$	Coeficiente de torque no eixo de saída da transmissão	
V_{fluido}	Velocidade do fluido	$[m/s]$
n_{fluido}	Velocidade de rotação do fluido	$[rps]$
Q_{fluido}	Torque no fluido	$[N.m]$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL	14
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	BOLLARD PULL	15
2.2	TIPOS DE REBOCADORES	16
2.2.1	Rebocadores com propulsão convencional	16
2.2.2	Rebocadores com propulsão azimutal	17
2.2.3	Rebocadores com propulsão cicloidal	18
2.3	SISTEMA DE PROPULSÃO	19
2.3.1	Propulsor do tipo hélice	20
2.3.2	Geometria do hélice	20
2.4	SÉRIES SISTEMÁTICAS DE HÉLICES	23
2.4.1	Coeficientes de desempenho do propulsor	24
2.4.2	O polinômio de interpolação dos resultados experimentais da Série Kaplan	26
2.5	O PROJETO DE HÉLICES POR SÉRIES SISTEMÁTICAS	28
2.6	CRITÉRIO DE CAVITAÇÃO	30
2.7	POTÊNCIAS E EFICIÊNCIAS	32
3	METODOLOGIA	35
4	IMPLEMENTAÇÃO	37
4.1	DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL	41
4.1.1	Diagrama de Águas Abertas	41
4.1.2	Dados do Motor	42
4.1.3	Velocidade de rotação de operação	43
4.1.4	Cavitação	44
4.1.5	Estimativa da velocidade máxima de serviço	46
4.1.6	Automatização da seleção do propulsor	47
5	TESTE PRÁTICO COM O REBOCADOR NAUTIMODELO	49
5.1	CARACTERÍSTICAS DO CASCO E DO SISTEMA PROPULSIVO DO REBOCADOR NAUTIMODELO	49
5.2	PREPARAÇÃO DO MODELO E EQUIPAMENTOS	54
5.3	ENSAIO DE <i>BOLLARD PULL</i>	55
5.3.1	Resultados do ensaio de <i>bollard pull</i>	55
5.3.2	Análise do ensaio de <i>bollard pull</i>	56

5.4	ANÁLISE DO PROJETO PARA CONDIÇÃO DE <i>BOLLARD PULL</i> ASSUMINDO $J=0$	58
6	CONCLUSÃO	60
6.1	SUGESTÃO DE TRABALHO FUTURO	61
	REFERÊNCIAS	63
	ANEXO A	65

1 INTRODUÇÃO

O propulsor é o principal mecanismo na transferência de potência mecânica do motor em força propulsiva. As soluções propulsivas são diversas, mas utilizam-se os hélices predominantemente como meio de propulsão sendo que para o projeto do sistema propulsivo deve-se levar em consideração aspectos como o fenômeno de cavitação, eficiência e desempenho do propulsor (TRINDADE, 2012).

O método das séries sistemáticas são amplamente utilizadas para o dimensionamento de um hélice e contemplam um conjunto de hélices obtidos por variação sistemática de parâmetros geométricos. Para o dimensionamento de hélices são utilizados os diagramas dos hélices obtidos por ensaios experimentais que auxiliam na seleção dos parâmetros mais apropriados para uma dada aplicação (MENDES, 2015).

No caso de projeto de rebocadores, uma das principais formas de avaliar seu desempenho é determinar sua capacidade de tração estática (propulsão teórica que o propulsor desenvolve a uma velocidade de avanço nula e máxima rotação do motor), condição denominada *bollard pull*. Esta condição não pode ser alcançada na prática, principalmente pelo fato de que os hélices alteram a velocidade da água a medida que giram.

Como este tipo de embarcação de serviço na maior parte do tempo opera em baixas velocidades sob altos carregamentos, a utilização de hélices associados a tubulões é ideal quando se busca aumentar o empuxo fornecido pelo propulsor. Estes dutos são empregados com o objetivo de regularizar o escoamento sobre o hélice e consequentemente reduzir as oscilações de empuxo e torque (PADOVEZI, 1997).

Neste contexto, o presente documento tem o objetivo de desenvolver um procedimento automatizado de seleção dos parâmetros de um hélice da Série Kaplan, associado ao tubulão 19A, que forneça o maior empuxo na condição de *bollard pull*, partindo de um motor pré-definido e respeitando o limite de cavitação estipulado pelo projetista. Partindo desta seleção em *bollard pull*, será estimada a velocidade máxima que o rebocador poderá atingir em corrida livre, com base em dados de entrada da geometria do casco e resistência ao avanço.

A ferramenta computacional na qual os procedimentos deste estudo foram implementados foi desenvolvida no Excel, permitindo ao projetista selecionar automaticamente as características geométricas de um propulsor da Série Kaplan que maximizem o empuxo na condição de *bollard pull*.

Além da ferramenta computacional desenvolvida, testes práticos com um rebocador nautimodelo foram realizados de forma a analisar o desempenho de um hélice da Série Kaplan. O rebocador nautimodelo foi projetado pela Equipe Cabanos para competir no DUNA (Desafio Universitário de Nautidesign), o qual é realizado pelo Curso de Engenharia Naval do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina, envolvendo diversas faculdades de engenharia do Brasil, especialmente estudantes de engenharia naval. Nesta competição, os rebocadores nautimodelos são submetidos às provas de força, manobra e velocidade. Desta forma, o projeto do sistema propulsivo deve ser realizado de modo a definir o propulsor que consiga fornecer o máximo empuxo estático possível, com boa manobrabilidade e que navegue a uma velocidade satisfatória, respeitando a parcela de potência que pode ser entregue pelo motor ao eixo do hélice, considerando possíveis perdas na transmissão e os limites de cavitação.

Ao final do trabalho espera-se obter um procedimento consistente para a seleção de um propulsor da Série Kaplan, além do desenvolvimento de uma ferramenta que possibilite análises automatizadas para condição de *bollard pull*. Como resultado secundário espera-se verificar através de testes práticos de desempenho, com o rebocador nautimodelo construído, se os valores calculados no projeto para empuxo estático estão coerentes e criar discussões sobre esta análise.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um procedimento automatizado para seleção de um hélice da Série Kaplan associado ao tubulão 19A, que forneça maior empuxo na condição de *bollard pull*, respeitando restrições de motorização e cavitação.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender o procedimento de seleção de um propulsor utilizando séries sistemáticas;
- Estimar a velocidade de serviço máxima da embarcação em corrida livre.
- Utilizar a ferramenta computacional desenvolvida de forma a analisar as características de operação de um hélice selecionado por uma equipe de competição do DUNA.
- Realizar ensaio em um tanque de prova simplificado para avaliar o desempenho de empuxo estático do sistema;
- Comparar os resultados dos ensaios com os valores previstos no projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos que se baseiam o procedimento desenvolvido, tais como características do propulsor, condição de *bollard pull*, projeto baseado em séries sistemáticas e o fenômeno de cavitação.

2.1 BOLLARD PULL

O bollard pull pode ser traduzido como tração estática e representa a capacidade de tração estática de uma embarcação, ou seja, é a tração máxima que o propulsor atinge a uma velocidade de avanço nula e rotação máxima do motor. Esta condição é um estado "abstrato" que não pode ser alcançada em operação real devido a dois fatores: primeiro porque os hélices alteram a velocidade da água à medida que giram e segundo pelo fato dos motores não conseguirem atingir máxima RPM em velocidades de reboque devido a uma relação RPM versus torque de diminuição (CANDIDO, 2012).

O teste de bollard pull é realizado através de um cabo amarrado à embarcação e a um ponto fixo na margem. Com a potência máxima desenvolvida, para a medição da tração é utilizada uma célula de carga. Ainda que esta condição nunca seja atingida em operações reais, fornece um meio simples de se aproximar de uma condição de reboque (CANDIDO, 2012).

Embarcações que desenvolvem operações com altos carregamentos e baixas velocidades, como rebocadores, navios offshore, navios de pesca de arrasto, normalmente são projetados com critérios de tração estática, sendo o Certificado Bollard Pull uma peça importante na venda, entrega e contratos comerciais destes tipos de embarcações (BENTO, 2017).

Durante os testes, para que estes sejam validados deve-se certificar sobre a segurança do local, da tensão de ruptura do cabo, das condições climáticas e o procedimento do ensaio, onde estas são regulamentados por sociedades classificadoras, uma vez que pode afetar diretamente o resultado do teste.

No Brasil o ensaio de tração estática é regulamentado pela Diretoria de Portos e Costas de Marinha através das normativas NORMAM 01 ou NORMAM 02, dependendo se a embarcação atua em mar aberto ou na navegação interior. Este teste é obrigatório para qualquer embarcação de reboque em mar aberto, enquanto no caso de rebocadores empregados na navegação interior, é obrigatório caso possuam

potência instalada maior que 300 hp.

2.2 TIPOS DE REBOCADORES

Rebocadores são embarcações de serviço projetadas para empurrar, puxar e rebocar barcas ou navios durante suas manobras. Estas embarcações são caracterizadas pelos motores potentes e alta capacidade de manobra.

Segundo Fragoso e Cajaty (2002) , as características principais de um rebocador é a sua potência e a força de tração estática. Outras características como estabilidade, deslocamento, tipo de propulsão e posição dos propulsores, quando combinadas com a potência e o bollard pull, vão definir a manobrabilidade do rebocador, suas limitações e principais qualidades.

Baseando-se no tipo de propulsão, os rebocadores podem ser classificados como: rebocadores com propulsão convencional, rebocadores com propulsão azimutal ou rebocadores com propulsão cicloidal.

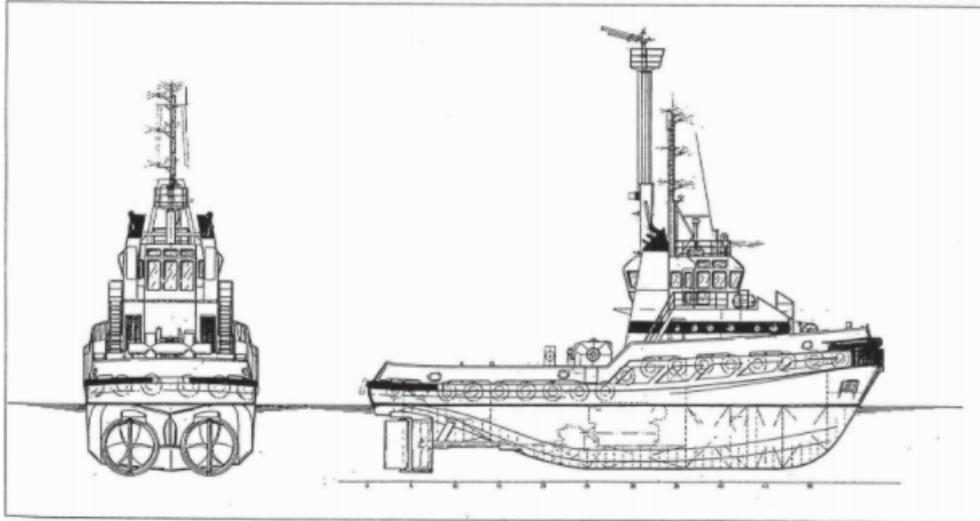
2.2.1 Rebocadores com propulsão convencional

Apesar de ser uma concepção mais antiga, rebocadores com propulsão convencional ainda estão em atividade, sendo encontrados em muitos portos. Podem ser utilizados um ou mais hélices fixos. Sua capacidade de manobra é limitada quando comparada com os outros tipos de propulsão.

A sua utilização requer atenção constante nas situações que possam comprometer sua estabilidade, comumente durante o reboque através de uma corda, condição na qual o rebocador fica sujeito ao *girting* (quando o navio começa a rebocar o rebocador, podendo ocasionar seu emborcamento). Outro ponto negativo refere-se ao empuxo fornecido pelo hélice operando a ré na condição de bollard pull, o qual geralmente é muito menor que o empuxo a vante na mesma condição (HENSEN, 2003).

A associação de tubulões aos hélices são comuns em embarcações de reboque, como pode ser visto na Figura 1, cujas operações são caracterizadas por demandar altos carregamentos, operando com baixas velocidades. Os tubulões aumentam o empuxo e conseqüentemente o bollard pull do sistema propulsivo, possibilitando ganhos na faixa de 15 a 25% em operações de empurrar e reboque (HENSEN, 2003).

Figura 1 – Rebocador com propulsão convencional de 2 hélices.



Fonte: Hensen (2003).

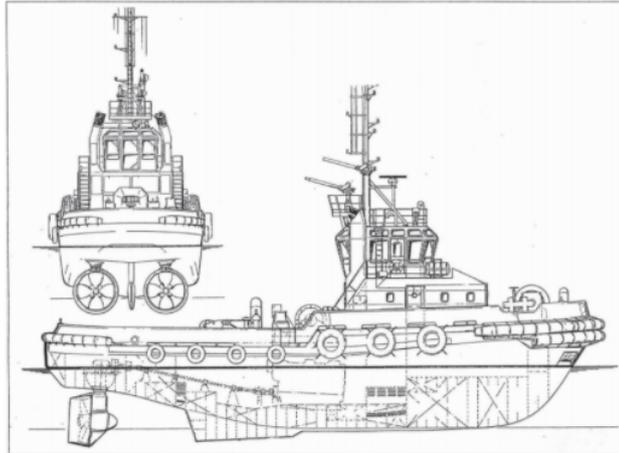
2.2.2 Rebocadores com propulsão azimutal

São uma concepção mais atual, que apresentam relevantes melhorias se comparados aos rebocadores de propulsão convencional. A diferença entre estes sistemas está na substituição do hélice com eixo fixo, que só produz força na direção longitudinal, por um propulsor que pode mudar o sentido de sua corrente de descarga, podendo dirigir sua força para qualquer ponto do azimute da embarcação, representado pela Figura 2.

Estes tipos de propulsores dispensam o uso de lemes por atuar nos 360 graus. Esta liberdade de movimentação do eixo do propulsor garante alta manobrabilidade, sendo comum observar essas embarcações navegando de popa ou mesmo de lado.

Além do ganho de manobrabilidade, a força de tração a vante e a ré são mantidas praticamente as mesmas, sendo assim mais eficientes na manobra de reboque/empurrar quando comparados aos rebocadores convencionais (CONCEIÇÃO, 2013).

Figura 2 – Rebocador com propulsão azimutal de 2 hélices.



Fonte: Hensen (2003).

2.2.3 Rebocadores com propulsão cicloidal

Rebocadores com sistema cicloidal, conhecidos por Voit Schneider, são compostos por um sistema de dois conjuntos de lâminas verticais móveis, Figura 3, fixados em discos paralelos ao fundo do casco, sendo similar aos rotores de um helicóptero. Este sistema traz grande poder de manobra às embarcações. Os discos giram com velocidade constante, sendo que a variação do ângulo de cada uma das lâminas irá produzir uma força de intensidade e sentido controlados. Sua vantagem está nesta possibilidade de gerar forças de reboque com a mesma intensidade em qualquer direção e na velocidade com que a alteração no sentido da força pode ser realizada (CONCEIÇÃO, 2013) .

Figura 3 – Lâminas verticais móveis de um propulsor cicloidal.



Fonte: Conceição (2013).

Rebocadores que utilizam este tipo de propulsão são caracterizados por cascos largos e planos, como pode ser visto na Figura 4, sendo necessário o uso de uma grande quilha (*skeg*) para direcionar o fluxo da água e assim aumentar a estabilidade de governo. Suas desvantagens são, principalmente, a necessidade de

um grande calado devido às lâminas verticais, o formato plano do fundo do casco, que pode prejudicar a hidrodinâmica da embarcação, dificultando a operação em mar aberto ou em altas velocidades e a necessidade de maior motorização relativa se comparada ao sistema azimutal (CONCEIÇÃO, 2013).

Figura 4 – Rebocador de Propulsão Cicloidal.



Fonte: Hensen (2003).

2.3 SISTEMA DE PROPULSÃO

A propulsão é um sistema fundamental a bordo de uma embarcação, sendo o propulsor o principal responsável pela transferência de potência mecânica do motor em força de empuxo. O projeto desse sistema deve satisfazer não somente os requisitos de projeto, mas também objetivos como confiabilidade e desempenho (CANDIDO, 2012).

As soluções propulsivas são diversas, contudo predominam as embarcações que utilizam hélices simples como meio de propulsão. No caso de embarcações de reboque modernas, é comum a utilização de Tubos Kort a fim de uniformizar o escoamento na entrada do propulsor e assim diminuir oscilações de torque e empuxo durante seu funcionamento.

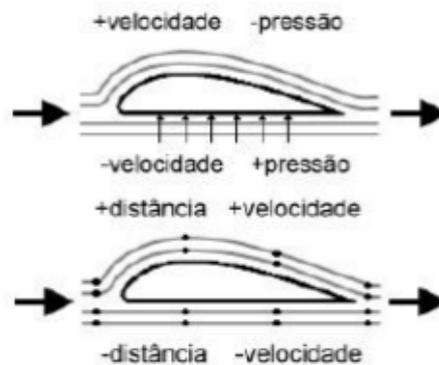
Se comparadas as eficiências máximas dos propulsores tipo hélice projetados hoje em dia, com aqueles em tempos mais remotos, a diferença é pouco relevante. Entretanto, ao longo do tempo foram desenvolvidas técnicas a fim de mitigar e controlar o fenômeno de cavitação e vibrações induzidas pelos propulsores. Tais ferramentas permitem otimizar o sistema como inteiro, tanto para os casos em que o requisito do projeto é tração estática, quanto para aqueles que tem como principal recurso de operação a velocidade (PADOVEZI, 1997).

2.3.1 Propulsor do tipo hélice

O hélice é um instrumento de propulsão geralmente acoplado a um motor que, ao empurrar o fluido que está ao redor, converte energia rotacional em energia translacional, deslocando assim o objeto a que se encontra acoplado.

Durante a operação do hélice suas pás empurram a água e assim este movimento cria uma diferença de pressão entre os dois lados da pá. Esta diferença de pressão se dá pela geometria da pá do hélice e é responsável pela geração da força propulsiva. A Figura 5 exemplifica essa geração de força, valendo ressaltar que tal fenômeno ocorre da mesma forma na asa do avião.

Figura 5 – Diferença de pressão no perfil.



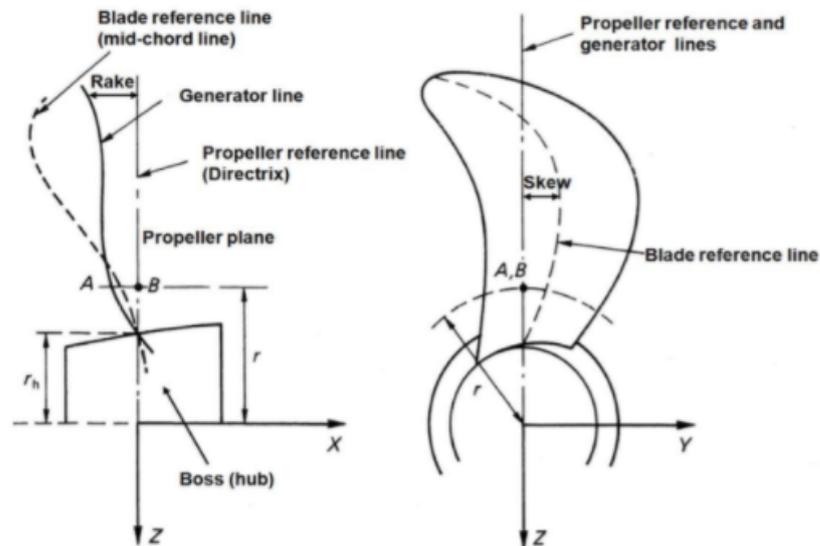
Fonte: Sampaio (2011).

“A parcela de ar que passa por cima, ou seja, pelo extradorso, tem de percorrer uma maior distância em relação a que passa por baixo, mas as duas parcelas devem se encontrar novamente no bordo de fuga e ao mesmo tempo. Para que isso seja possível, o ar que passa por cima é acelerado e, conseqüentemente, a pressão estática desta parcela é reduzida em relação à pressão da que passa por baixo. Essa diferença de pressão faz com que a asa seja empurrada para cima gerando assim sustentação” (SAMPAIO, 2011).

2.3.2 Geometria do hélice

“O propulsor é composto por um bosso no centro (*hub* ou *boss*) e um número de pás (*Z*) ao redor. A localização das pás ao longo da circunferência do bosso é definida pelas respectivas linhas diretrizes (Propeller reference line -Directrix), essas sempre igualmente espaçadas, partindo do eixo axial (*x*) e perpendicular ao mesmo” (TONACIO, 2014).

Figura 6 – Bosso, plano do propulsor e linhas principais.



Fonte: Tonacio (2014).

As pás do propulsor são formadas a partir da linha geradora (Generator Line) no plano formado pela própria diretriz e pelo eixo axial. A distância entre a linha geradora e a diretriz é conhecida como caimento (*rake*), conforme ilustrado na Figura 6, uma propriedade geométrica que representa a inclinação no eixo das pás no sentido longitudinal da embarcação (TONACIO, 2014).

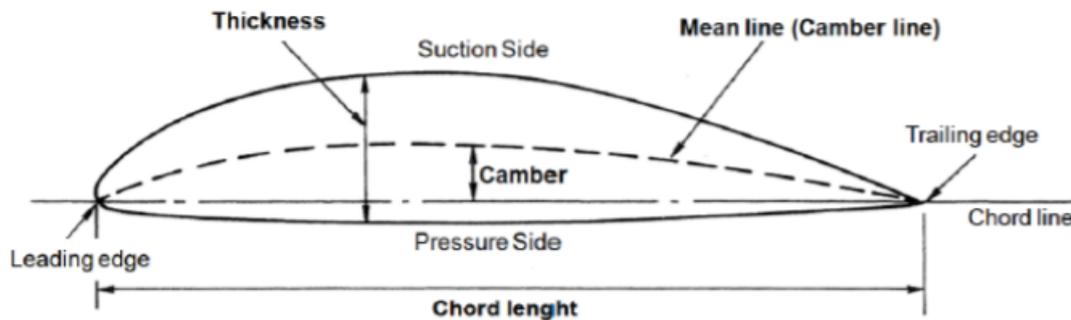
Outra linha importante para descrição geométrica do propulsor é a linha de referência da pá (Blade Reference Line), formada pelos pontos centrais de cada seção radial. A assimetria do contorno da pá em relação à linha geradora é denominado *skew*, apresentado na Figura 6, uma propriedade geral do propulsor que apresenta grande contribuição para a redução dos níveis de cavitação intermitente (que pode causar erosão) e de vibrações induzidas pelo propulsor quando este opera em campos não uniformes de velocidades (PADOVEZI, 1997).

As propriedades de *skew* e *rake* não afetam negativamente na eficiência dos propulsores quando estes estão em operações a vante. Entretanto, essas assimetrias podem reduzir relativamente a eficiência em operações a ré quando comparados com hélices sem caimento e assimetria (PADOVEZI, 1997).

As pás do propulsor possuem dois lados: o dorso (*suction side*), região de baixa pressão, onde a força de sustentação é gerada, e a face (*pressure side*), região de alta pressão, e dois bordos: o de ataque (*leading edge*), a linha frontal onde o fluido encontra a pá, e o fuga (*trailing edge*), aresta traseira onde o fluido deixa a pá. O bordo de ataque e de fuga são unidos pela linha chamada corda (*chord*). A geometria da seção de pá é definida pelo comprimento de corda (*chord length*), o qual representa a distância entre o bordo de ataque e de fuga, pela distribuição de espessura máxima da seção, e a linha média (*mean line ou camber line*), cujo

parâmetro *camber* representa o desvio entre a linha média e a corda (TONACIO, 2014). Estes elementos estão representados na Figura 7.

Figura 7 – Perfil de seção de pá.



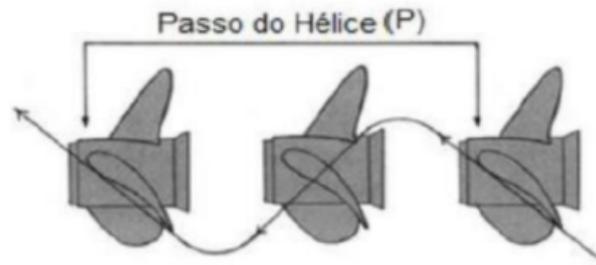
Fonte: Tonacio (2014).

Durante a seleção do propulsor de uma embarcação, alguns parâmetros do hélice são fundamentais, sendo estes:

- Número de pás (Z);
 - Diâmetro (D);
 - Razão de passo (P/D);
 - Área do disco (A_0);
 - Área expandida (A_E);
 - Razão de áreas (A_E/A_0);
 - Área projetada (A_P);
1. Número de Pás (Z): O número de pás de um hélice indica a quantidade de pás que um propulsor hélice possui. O espaçamento entre elas correspondem a 360° dividido por Z . Segundo Trindade (2012), o número de pás influencia nas vibrações induzidas pelo hélice, neste cenário a utilização de um número ímpar de pás Z proporciona melhores características.
 2. Diâmetro (D): Corresponde ao diâmetro da circunferência circunscrita às pás do hélice, perpendicular ao eixo de rotação. O valor de área desta circunferência equivale a área do disco propulsor (A_0). A geometria do casco no qual o hélice será instalado limita o diâmetro do hélice. Tal região deve ficar totalmente submersa a fim de evitar aeração (recolhimento de ar pelas pás do hélice). A distância entre o casco e as pontas das pás devem ter um valor mínimo que garanta que os esforços variáveis induzidos pelo propulsor sejam reduzidos, a ponto de evitar vibrações indesejadas (PADOVEZI, 1997).
 3. Razão de Passo (P/D): Esta razão corresponde ao valor do passo (P) do hélice adimensionalizado em razão do valor do diâmetro (D). O passo do hélice é a distância longitudinal percorrida por um ponto do hélice em uma rotação completa, ilustrado na Figura 8. Ao dividir esta distância pelo diâmetro do hélice,

temos a razão de passo (P/D) (PINHEIRO, 2014).

Figura 8 – Passo do hélice.



Fonte: Pinheiro (2010).

4. Área do Disco (A_0): Esta é a área de referência utilizada, igual a área do disco propulsor. Ou seja, é a área total projetada pelo hélice durante seu funcionamento. É dada pela seguinte equação:

$$A_0 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (1)$$

5. Área Expandida (A_E): A área expandida equivale à área formada pelo contorno da distribuição de cordas ao longo do raio da pá, ou seja, é a soma das áreas das faces das pás a partir do bosso até a ponta da pá. Quanto menor a área das pás, menores as perdas devido ao arrasto e maior a eficiência do hélice. Em contrapartida, quanto menor a área da pá maior serão as chances de ocorrência de cavitação. No caso de hélices de alto carregamento, as perdas axiais são tão grandes que as perdas devido ao atrito se tornam irrelevantes, quando se considera a vantagem de haver uma maior margem de segurança em relação à cavitação (PADOVEZI, 1997).
6. Razão de Áreas (A_E/A_0): Valores típicos para a razão de área expandida (A_E/A_0) variam entre 0.3 e 1.5, sendo que razões maiores que 1 significam que o hélice tem pás sobrepostas, o que o torna muito custoso (TRINDADE, 2012).
7. Área Projetada (A_P): Representa a área da projecção das pás num plano normal ao eixo do hélice. Segundo Padovezi (1997), a área projetada pode ser calculada pela equação (2):

$$A_P = A_E \left(1,067 - 0,229 \frac{P}{D} \right) \quad (2)$$

2.4 SÉRIES SISTEMÁTICAS DE HÉLICES

Uma série sistemática de hélice é um conjunto de hélices obtidos por variação sistemática de parâmetros geométricos, obtendo-se, através de ensaios de água aberta com modelos em Tanques de Prova ou Túnel de Cavitação, as curvas características de cada uma das combinações geométricas resultantes (PADOVEZI, 1997).

Os principais objetivos dessas séries são permitir ao projetista compreender os principais parâmetros que influenciam no desempenho do hélice, a ocorrência de cavitação e a criação de diagramas que facilitam a seleção das características do hélice mais adequado à sua aplicação (TRINDADE, 2012).

Para embarcações que operam sob altos carregamentos, apresentando requisitos de tração estática (*bollard pull*) alta e velocidade de serviço baixa, como, por exemplo, traineiras, barcos de arrasto e rebocadores, a utilização de hélices em dutos representam os melhores tipos de propulsores, principalmente por apresentarem maiores rendimentos em operações de baixas velocidades e altos carregamentos, o que é explicado pela contribuição da parcela de empuxo resultante nos dutos. Outra vantagem do hélice em duto, quando comparado ao convencional, é que os dutos apresentam a tendência de regularizar o escoamento, resultando em menores variações de empuxos e de torques durante a operação. Contudo, este tipo de hélice associados à tubulões não são recomendados para embarcações que operam em velocidades relativamente altas, visto que à medida que a velocidade da embarcação aumenta, a contribuição de empuxo proveniente do duto diminui, enquanto o arrasto do mesmo aumenta (PADOVEZI, 1997).

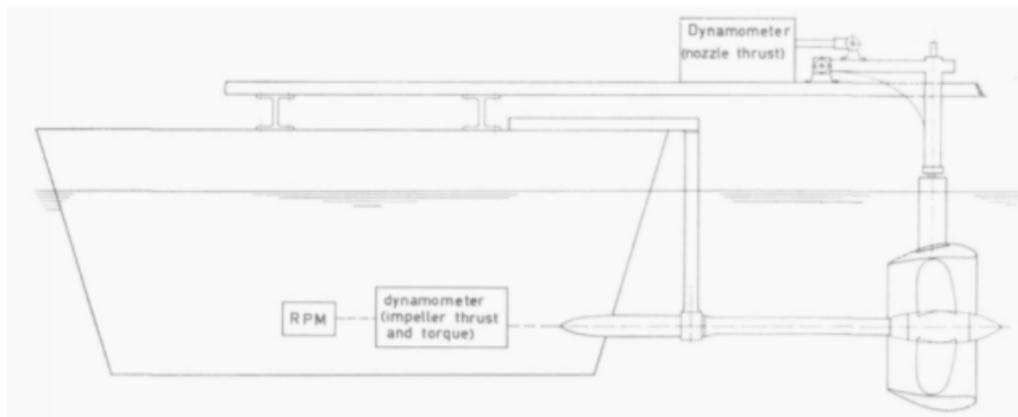
Neste cenário, uma série sistemática muito comum para o projeto de rebocadores é a Série Kaplan, a qual será abordada neste trabalho, cujas seções de plano aerodinâmico nos raios internos e seções em formato de ogiva plana nos raios externos tem a função de gerar empuxo máximo (CARLTON, 2007).

2.4.1 Coeficientes de desempenho do propulsor

Inúmeras análises experimentais de séries de hélices com tubos acelerados foram executados por Van Manen e Van Manen e Suprema, a fim de fornecer dados para o desenvolvimento de projetos neste âmbito (OOSTERVELD, 1970).

Os testes foram realizados com os aparatos usuais para ensaios em águas abertas, conhecido como *open water test*, com hélices associados a tubulões. A Figura 9 mostra o equipamento de teste que está instalado sob o carro correndo sobre o tanque durante os testes.

Figura 9 – Equipamento de teste para águas abertas com hélices associados a tubulões.



Fonte: Oosterveld (1970).

O ensaio em águas abertas é realizado para determinar os coeficientes de desempenho de um propulsor e assim permitir a avaliação do desempenho do mesmo em condições de operação em escoamento incidente uniforme. Este teste consiste no ensaio de um modelo em escala do propulsor, cujo eixo de acionamento é acoplado ao dinamômetro, o qual é rebocado com velocidade de avanço (V_a) em um fluido em repouso. Com todos os parâmetros do propulsor fixados, o propulsor, movimentado a uma velocidade de rotação (n), produz um empuxo (T) e absorve um torque (Q). Tais medições para diferentes faixas de rotação, depois de adimensionalizados, constituem o diagrama em águas abertas, expresso em função dos seguintes coeficientes de desempenho adimensionais:

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

$$K_{TN} = \frac{T_N}{\rho n^2 D^4} \quad (4)$$

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

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (6)$$

Onde :

K_T : Coeficiente de empuxo;

K_{TN} : Coeficiente de empuxo do tubulão;

K_Q : Coeficiente de torque;

T : empuxo fornecido pelo hélice;

T_N : empuxo fornecido pelo tubulão;

Q : torque no eixo do propulsor;

n : rotação do hélice;

D : diâmetro máximo do hélice;

ρ : massa específica da água;

J: Coeficiente de avanço.

Va: velocidade de avanço.

A eficiência do propulsor (n_o) é expressa em função dos coeficientes de desempenho adimensionais e pode ser definida como:

$$n_o = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (7)$$

2.4.2 O polinômio de interpolação dos resultados experimentais da Série Kaplan

Até hoje foram realizados testes em águas abertas para os hélices Ka 3-65, Ka 4-55, Ka 4-70 e Ka 5-75 da Série Kaplan, associados ao tubulão 19A (OOSTERVELD, 1970). Os coeficientes de empuxo e torque K_T , K_{TN} e K_Q foram expressos como polinômios de coeficiente de avanço J e razão de passo P/D e são apresentados sob a seguinte forma:

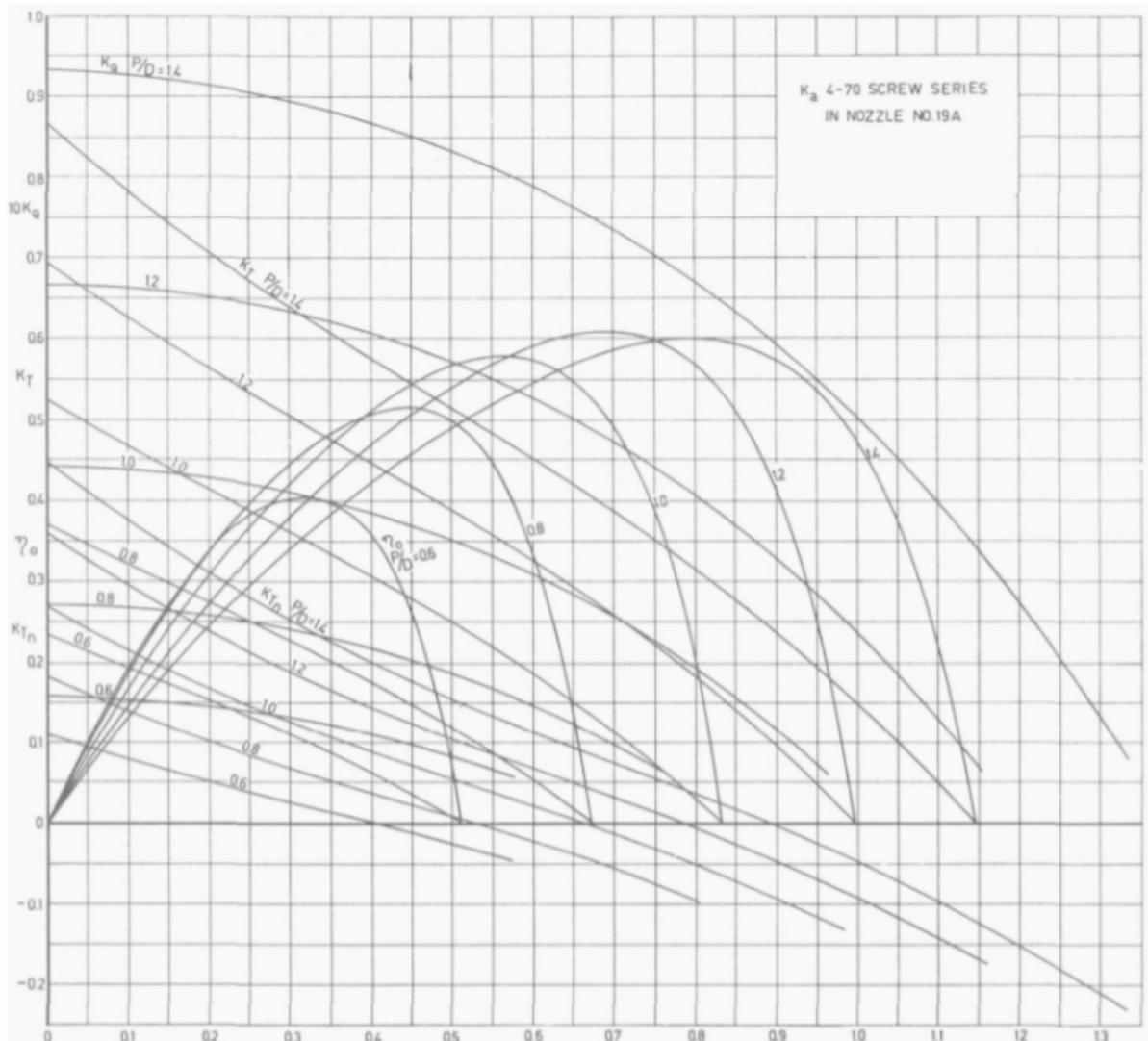
$$\begin{aligned}
 K_T &= A_{0,0} + A_{0,1}J + \dots + A_{0,6}J^6 + \\
 &A_{1,0}\frac{P}{D} + A_{1,1}\frac{P}{D}J + \dots + A_{1,6}\frac{P}{D}J^6 + \\
 &A_{2,0}\left(\frac{P}{D}\right)^2 + A_{2,1}\left(\frac{P}{D}\right)^2J + \dots + A_{2,6}\left(\frac{P}{D}\right)^2J^6 + \\
 &\dots \\
 &A_{6,0}\left(\frac{P}{D}\right)^6 + A_{6,1}\left(\frac{P}{D}\right)^6J + \dots + A_{6,6}\left(\frac{P}{D}\right)^6J^6 \\
 K_{TN} &= B_{0,0} + B_{0,1}J + \dots + B_{6,6}\left(\frac{P}{D}\right)^6J^6 \\
 K_Q &= C_{0,0} + C_{0,1}J + \dots + C_{6,6}\left(\frac{P}{D}\right)^6J^6
 \end{aligned}$$

Com o auxílio de uma análise de regressão, foram determinados os termos significativos dos polinômios e os valores dos coeficientes correspondentes, A , B e C. Os resultados para os hélices Ka 3-65; Ka 4-55; Ka 4-70 e Ka 5-75 em combinação com o tubulão 19A são apresentados no Anexo A.

Estes resultados podem ser usados diretamente para resolver problemas que surgem ao projetar e analisar série sistemáticas de hélices se um computador estiver disponível (OOSTERVELD, 1970). Tais resultados também podem ser apresentados em forma de gráficos e representam o diagrama em águas abertas. A Figura 10

representa o diagrama do hélice Ka 4-70, operando no primeiro quadrante ¹.

Figura 10 – Diagrama em águas abertas para o hélice Ka 4-70 da Série Kaplan associado ao tubulão 19A no primeiro quadrante.



Fonte: Oosterveld (1970).

Neste trabalho, o projeto baseou-se no livro *Wake Adapted Ducted Propellers* para obtenção dos polinômios de interpolação dos hélices da Série Kaplan operando no 1º quadrante, possibilitando o cálculo dos coeficientes de empuxo do hélice (K_T) e do tubulão (K_{TN}), do coeficiente de torque (K_Q) e da curva de eficiência do propulsor (η_o), expressos em função do coeficiente de avanço (J) e da razão P/D .

Partindo dos coeficientes de empuxo e de torque calculados através dos polinômios interpoladores, é possível calcular o empuxo fornecido pelo hélice e pelo tubulão, Equações 3 e 4 respectivamente, o torque no eixo do hélice, Equação 5, e

¹ Neste trabalho foi utilizado o diagrama em águas abertas no primeiro quadrante para seleção do propulsor na condição de bollard pull. Esta consideração se deve ao fato de que embora a embarcação esteja parada e embora seja assumido coeficiente de avanço igual a zero, existe uma velocidade de fluido que se direciona a ré do casco.

a eficiência em águas abertas , Equação 7, para diferentes coeficientes de avanço, Equação 6. Esta implementação em uma planilha de cálculo permite a automatização do processo de seleção do hélice.

2.5 O PROJETO DE HÉLICES POR SÉRIES SISTEMÁTICAS

Para a seleção do hélice na condição de corrida livre deve-se levar em conta o formato do casco da embarcação estudada, tendo em vista a perturbação do fluido causada pela passagem do casco.

“Observa-se na passagem de uma embarcação sobre as águas, duas características no escoamento do fluido: um padrão de ondas se movimentando ao longo do casco e uma região de escoamento turbulento que cresce ao longo do comprimento da embarcação e se prolonga atrás do casco na forma de esteira”(HOLTROP, MENNEN, 1982,p.12).

Esta esteira formada cria uma discrepância entre a velocidade que o propulsor avança relativamente à água (V_a) e a velocidade de operação da embarcação (V_s). Para relacionar essas grandezas é empregado um coeficiente de esteira (w), conforme a Equação 8 (PADOVEZI, 1997):

$$V_a = V_s(1 - w) \quad (8)$$

O coeficiente de esteira deve ser determinado a fim de corrigir a modificação do escoamento que chega ao propulsor.

Outro coeficiente que deve ser calculado é o de redução da força propulsiva (t), o qual considera que o aumento da velocidade do escoamento e a redução da pressão na popa do navio geram um aumento na resistência ao avanço da embarcação, devido à presença do hélice. Esta análise se deve ao fato da força de empuxo (T) desenvolvida pelo hélice ser avaliada a partir do ensaio de resistência ao avanço sem o hélice. Deste modo, o coeficiente de redução da força propulsiva relaciona o empuxo requerido pela embarcação e a resistência da embarcação através da Equação 9, sendo $(1/(1-t))$ o fator de aumento da resistência da embarcação devido a presença do propulsor .

$$T_{req} = \frac{R_T}{(1 - t)} \quad (9)$$

Van Oortmerssen,1971, propôs uma equação analítica para determinar a resistência de embarcações de pequeno porte, cujos coeficientes foram determinados de forma empírica.Em seu trabalho sobre resistência ao avanço de pequenas embarcações, o autor apresenta as seguintes equações de regressão, 10 e 11, e seus coeficientes, Tabela 1, para o cálculo do coeficiente de esteira (w) e do coeficiente de redução da força propulsiva (t):

$$t = e_{1,0} + e_{1,1}C_P + e_{1,2}C_P^2 + e_{1,3}C_P F_n + e_{1,4}C_P F_n^2 + e_{1,5}C_P LCB + e_{1,6}\frac{L}{B} + e_{1,7}\frac{B}{T} \quad (10)$$

$$w = e_{2,0} + e_{2,1}C_P + e_{2,2}C_P^2 + e_{2,3}C_P F_n + e_{2,4}C_P F_n^2 + e_{2,5}C_P LCB + e_{2,6}\frac{L}{B} + e_{2,7}\frac{B}{T} \quad (11)$$

Onde :

C_P : Coeficiente prismático;

F_n : Número de Froude;

L : Comprimento da embarcação;

B : Boca da embarcação;

T : Calado da embarcação;

LCB : Posição longitudinal do centro de flutuação.

Tabela 1 – Coeficientes de w e t - Oortmerssen

i	1	2
$e_{i,0}$	-0,93290	0,729681
$e_{i,1}$	3,94349	-1,74379
$e_{i,2}$	-2,98757	1,37241
$e_{i,3}$	-0,98059	0,26229
$e_{i,4}$	1,04860	-0,22019
$e_{i,5}$	0,00490	0,01379
$e_{i,6}$	0,00228	-0,00786
$e_{i,7}$	-0,00152	0,00216

Fonte: Oortmerssen (1971).

Segundo Padovezi (1997), para o cálculo do propulsor mediante séries sistemáticas, onde vários parâmetros geométricas já estão fixos, a definição do hélice é feita através da escolha do diâmetro, do número de pás, do passo e da área das pás, sendo que a condição de operação da embarcação e a velocidade desejada completam o quadro. Quando as informações iniciais do projeto se baseiam no valor do empuxo requerido do hélice para uma determinada velocidade, utiliza-se o coeficiente de empuxo (K_T) para determinar o ponto de operação. Nos casos em que o projeto vai ser baseado em um sistema motor-redutor já existente, utiliza-se o coeficiente de torque (K_Q).

Na condição de uma embarcação em corrida livre, para garantir que o propulsor seja capaz de fornecer o empuxo requerido pelo casco em uma dada velocidade de serviço, deve-se calcular a curva de resistência do casco (adimensionalizada) para o qual o hélice está sendo projetado, Equação 12. No caso de ser conhecido o diâmetro,

uma das formas mais utilizadas para obter-se a velocidade de rotações ótima é utilizar uma combinação de equações que permita buscar a máxima eficiência em águas abertas sem a necessidade da definição “a priori” da velocidade de rotação. Através do cruzamento entre a curva de resistência do casco (K_{Tcasco}) e a curva de empuxo do propulsor ($K_{Thélice}$) é possível encontrar o ponto de operação ($J_{operação}$), o coeficiente de torque (K_Q) e a eficiência em água aberta (n_o). Definido o $J_{operação}$ obtém-se a velocidade de rotação do hélice, determinando a relação de redução de rotações motor/hélice a ser adotada.

$$K_{Tcasco} = \frac{R_T(1 + MR)}{(1 - t)\rho V_a^2 D^2} J^2 \quad (12)$$

Onde:

R_T : Resistência do casco da embarcação (na velocidade de serviço V_s);

V_a : velocidade de avanço da embarcação ;

MR: Margem de resistência;

ρ : massa específica da água;

t: coeficiente de redução da força propulsora;

D: Diâmetro máximo do hélice;

J : coeficiente de avanço.

Portanto, escolhidos a série sistemática, o número de pás e a razão de área expandida, são utilizadas as curvas de águas abertas correspondentes, sendo que para cada razão P/D deverá haver uma solução, onde K_{Tcasco} será igualado ao $K_{Thélice}$ das curvas da série. Comparando-se todos os casos calculados, escolhe-se o P/D que corresponde à maior eficiência, com ocorrência de cavitação dentro do limite estabelecido (PADOVEZI, 1997).

Nos casos em que o projeto vai ser baseado em um sistema motor-redutor já existente, e o diâmetro é conhecido, utiliza-se a seguinte relação:

$$K_Q = \frac{P_D}{2\pi\rho V_a^3 D^2} J^3 \quad (13)$$

Onde:

P_D : Potência absorvida pelo hélice (PHP).

O raciocínio envolvido nesta análise é análogo ao do projeto baseado no casco, com obtenção do $J_{operação}$ correspondente à razão P/D de maior eficiência, e assim é obtida a velocidade de rotação ótima (PADOVEZI, 1997).

2.6 CRITÉRIO DE CAVITAÇÃO

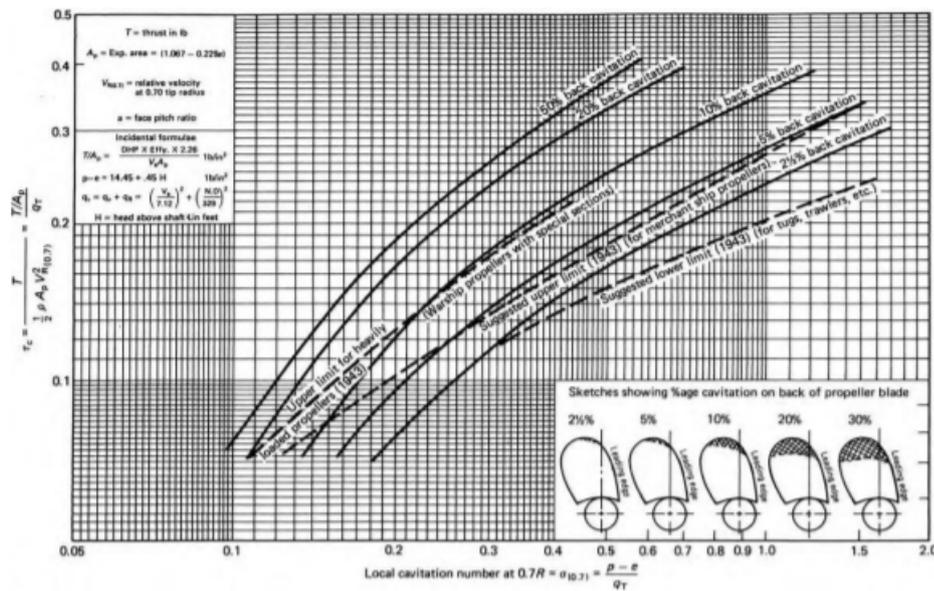
Segundo Nasseh (1999) as altas rotações do hélice geram regiões de baixa pressão, nas quais há formação de bolhas de vapor d'água que implodem

ao caminharem para uma região de pressão superior à pressão de vapor da água. Este fenômeno é denominado cavitação.

Tal fenômeno é bastante prejudicial para o hélice e traz grandes preocupações aos projetistas, visto que pode gerar efeitos indesejáveis como queda de empuxo, aumento de vibrações induzidas pelo propulsor e erosão das pás do hélice. A verificação da ocorrência deste fenômeno é de suma importância durante o projeto, permitindo mitigar os níveis de cavitação no hélice projetado. Uma das formas mais práticas de prever-se o fenômeno de cavitação é a utilização do diagrama de Burril, Figura 11, o qual é baseado em dezenas de ensaios em túneis de cavitação de hélices de geometrias variadas. Este diagrama relaciona as pressões presentes nas pás, coeficiente de Burril (τ_c), e o número de cavitação (σ) relativo à velocidade resultante na seção das pás, e desta forma apresenta limites para 20, 10, 5 e 2,5 % de cavitação no dorso da pá do hélice (PADOVEZI, 1997).

Vale salientar que durante a análise da cavitação deve ser levado em consideração o número de hélices que compõem o sistema propulsivo. Neste projeto serão utilizados dois hélices em conjunto com um motor, um dos motivos é exatamente para mitigar o efeito da cavitação nos hélices, dividindo a potência entregue pelo motor uniformemente entre eles.

Figura 11 – Diagrama de Burril.



Fonte: (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2011)

O coeficiente de Burril é calculado por :

$$\tau_c = \frac{R_T}{(1 - t)0.5\rho V_R^2 A_P} \tag{14}$$

Onde:

R_T : Resistência ao avanço da embarcação, levando em consideração o número

de hélices.

Sendo V_R o valor da velocidade local a 0,7 do raio do hélice, Equação 15, e A_P é a área da projeção das pás.

$$V_R = \sqrt{V_a^2 + (0,7\pi nD)^2} \quad (15)$$

Onde:

n : velocidade de rotação do hélice;

V_a : velocidade de avanço da embarcação.

O número de cavitação (σ) pode ser calculado por:

$$\sigma = \frac{pgh + P_{atm} - P_v}{0,5\rho V_R^2} \quad (16)$$

Onde:

P_{atm} : pressão atmosférica (101.000 N/m²);

P_v : pressão de vapor da água salgada (para um projeto preliminar, pode-se adotar 3000 N/m²);

h : profundidade do *hub* do hélice [m];

g : aceleração da gravidade (9,81 m/s²);

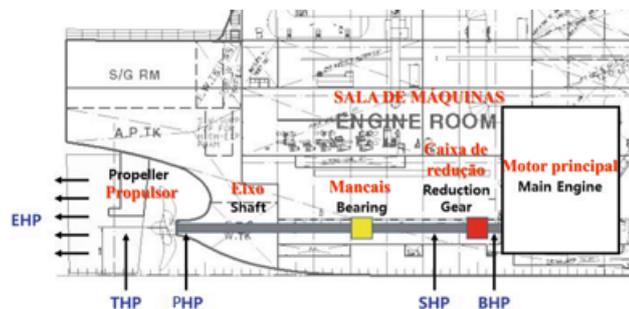
p : densidade do fluido [kg/m³];

2.7 POTÊNCIAS E EFICIÊNCIAS

Nesta seção será feita uma revisão sobre as eficiências e as parcelas de potência envolvidas no problema de propulsão de uma embarcação, buscando assim uniformizar a nomenclatura destas grandezas. Estas foram definidas com base no paper Instalações de Máquinas Marítimas do Professor Hernani Luiz Brinati (2010).

Analisando as potências de uma embarcação podemos detalhar suas parcelas desde o propulsor até o motor principal, como pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Parcelas das potências de uma embarcação.



Fonte: Adaptado de Roh (2018)

A potência efetiva (EHP) é aquela que representa a potência requerida para rebocar uma embarcação a determinada velocidade sem a ação do hélice, a qual é calculada através da Equação 17.

$$EHP = R_T V \quad (17)$$

Onde:

R_T : Resistência total ao avanço;

V : Velocidade da embarcação.

A potência de empuxo (THP) é definida como a potência produzida pelo hélice, calculada pela Equação 18.

$$THP = T V_a \quad (18)$$

Onde:

T : Empuxo fornecido pelo hélice;

V_a : Velocidade de avanço.

A próxima parcela é a potência absorvida pelo hélice (PHP), a qual é a potência entregue ao hélice, excluindo portanto todas as perdas entre o motor e o propulsor, sendo calculada pela Equação 19.

$$PHP = 2\pi Q_P n_P \quad (19)$$

Onde:

Q_P : Torque no eixo do propulsor;

n_P : Rotação do propulsor.

Devido a perdas na transmissão da potência em caixas redutoras do motor para o hélice, outra parcela analisada é a potência do eixo (SHP), calculada pela Equação 20.

$$SHP = \frac{PHP}{n_T} \quad (20)$$

Onde:

n_T : eficiência de transmissão.

Por fim temos a potência de máquina (BHP), a qual é a potência entregue pela máquina ao eixo, calculada conforme a Equação 21.

$$BHP = SHP = 2\pi Q_M n_M \quad (21)$$

Onde:

Q_M : Torque do motor;

n_M : Rotação do motor.

Para a análise das eficiências, as parcelas que compõem o sistema propulsivo são a eficiência de transmissão, eficiência do casco, eficiência do propulsor e eficiência rotativa relativa.

A eficiência do casco (η_h) representa os efeitos da interação entre hélice e casco, e é definido como a razão entre a potência efetiva e a potência fornecida pelo hélice, apresentada na Equação 22.

$$\eta_h = \frac{EHP}{THP} = \frac{1-t}{1-w} \quad (22)$$

A eficiência da transmissão (η_t) é um parâmetro que está relacionado com as perdas de potência que ocorrem entre o motor e o hélice, sendo assim a relação entre a potência absorvida pelo hélice e a potência fornecida pela máquina principal, calculada pela Equação 23.

$$\eta_t = \frac{PHP}{BHP} \quad (23)$$

A eficiência do propulsor é a relação entre a potência fornecida pelo hélice e a potência absorvida pelo hélice, calculado conforme Equação 24.

$$\eta_p = \frac{THP}{PHP} \quad (24)$$

Segundo Hernani (2010), é costume definir a eficiência do propulsor para as condições em que o hélice é ensaiado, ou seja, para água aberta, conforme Equação 25. Admite-se que na popa da embarcação, o hélice produz o mesmo empuxo que em água aberta, mas absorve um torque diferente.

$$\eta_{p0} = \left(\frac{THP}{PHP} \right)_{\text{aguaaberta}} \quad (25)$$

A eficiência relativa rotativa é um fator que afeta a eficiência do hélice, pelo fato da velocidade real do escoamento de água que flui para o hélice não ser constante e nem perpendicular à área das pás. Em suma, é a relação entre a eficiência do hélice operando na popa do navio e a eficiência do hélice no ensaio de água aberta para mesmos valores de V_a e rotação do hélice, calculada pela Equação 26.

$$\eta_{rr} = \frac{\eta_p}{\eta_{p0}} = \frac{(Q)_{\text{aguaaberta}}}{Q} \quad (26)$$

Por fim, podemos relacionar a potência requerida para deslocar a embarcação e a potência fornecida pela máquina através do coeficiente propulsivo (c_p), conforme Equação 27.

$$c_p = \frac{EHP}{BHP} = \eta_h \eta_t \eta_r \eta_{p0} \quad (27)$$

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada no processo de seleção e testes do hélice.

O primeiro passo foi realizar um estudo bibliográfico a fim de compreender o funcionamento do hélice, sua geometria e os demais parâmetros que influenciam na seleção do propulsor pelo método de séries sistemáticas, mais especificamente a Série Kaplan.

Partindo dos polinômios que descrevem os coeficientes de desempenho da Série Kaplan, respeitando o critério de cavitação e restrições de motorização, será desenvolvida uma ferramenta que automatiza o processo de seleção de um propulsor que maximize o empuxo na condição de *bollard pull* de um rebocador nautimodelo para competir no DUNA, além de estimar a velocidade máxima que o nautimodelo pode desenvolver na condição de corrida livre, com base nos parâmetros do hélice selecionado para condição de bollard pull e na curva de resistência ao avanço do casco da embarcação.

Para a seleção na condição de bollard pull, buscou-se maximizar o empuxo adotando coeficiente de avanço igual a zero, tendo como restrições: os quatro hélices da Série Kaplan estudados neste trabalho, os limites de P/D para cada um dos hélices analisados, o diâmetro máximo do hélice, cavitação dentro do limite estipulado pelo usuário e a igualdade entre a potência requerida pelo hélice e a potência entregue pelo motor aos eixos (PHP).

A ferramenta utilizada para a implementação das técnicas aqui descritas será o programa Excel, o qual fornece todos os recursos necessários para o seu desenvolvimento, sendo a maior parte da automatização realizada com auxílio da ferramenta "Solver" no método *evolutionary*.

Para a realização do experimento com o rebocador nautimodelo na condição de bollard pull, o ensaio partiu da variação da rotação do hélice, analisando o empuxo desenvolvido em função desta variação, buscando-se obter a curva de empuxo versus velocidade de rotação do hélice da Série Kaplan analisado. Para tais medições foram utilizados como instrumentos uma balança digital e um tacômetro digital a laser, além de uma corda, um voltímetro e duas câmeras filmadoras.

Em relação à balança digital, foi utilizado um instrumento com resolução de 0.001 gramas e um limite de carga máximo de 50 kg.f. Durante a realização do teste de bollard pull, a balança digital foi utilizada para medir a força de tração na corda que

fixava a popa do rebocador nautimodelo à balança digital, que por sua vez estava fixa em um ponto na margem do lago onde foi realizado o teste. Já em relação ao tacômetro digital a laser, este foi utilizado para medir a velocidade de rotação desenvolvida no eixo do propulsor durante os testes e possui uma resolução de 1 rpm com um limite máximo de 9999 rpm. Para a análise dos dados obtidos por estes instrumentos, foram utilizadas duas câmeras filmadoras para gravar as medições ao longo do ensaio.

Para a análise do desempenho do propulsor em toda sua faixa de operação, o teste prático partiu da realização de experimentos para diferentes faixas de potência, variando tal parâmetro no controle remoto do rebocador nautimodelo. Portanto, para cada faixa de potência analisada, serão medidos os valores de empuxo e velocidade de rotação desenvolvidos pelo propulsor.

Vale ressaltar que o nível de tensão na bateria que alimenta o motor do rebocador tem grande interferência nos resultados do teste. O ideal seria realizar a medição de tensão na bateria antes de cada um dos experimentos, além de estipular um limite para o descarregamento da bateria, de forma a interromper os testes para substituição ou recarregamento da mesma. Contudo, para o teste prático realizado neste trabalho, tal procedimento não pôde ser seguido devido à falta de baterias extras e pelo pouco tempo disponível para realização dos experimentos, portanto a tensão da bateria foi medida apenas antes de se realizar o primeiro experimento, dificultando assim a análise dos resultados e abrindo margem para erros e perda de performance devido ao descarregamento da bateria.

4 IMPLEMENTAÇÃO

A ferramenta construída no Excel, na sua forma mais simples, é uma planilha capaz de informar ao usuário as características de operação do propulsor na condição de bollard pull, respeitando restrições de motorização e cavitação. Estas características são definidas pela ferramenta após o usuário escolher qual hélice da Série Kaplan que o mesmo deseja analisar (Ka 3-65, Ka 4-55, Ka 4-70 ou Ka 5-75), o diâmetro máximo do hélice (D), o número de propulsores, a razão passo-diâmetro (P/D), o torque e a rotação nominal do motor utilizado, o rendimento da transmissão e o percentual de cavitação máximo.

Após inserir os dados de entrada, o usuário terá acesso as seguintes características de operação do propulsor analisado:

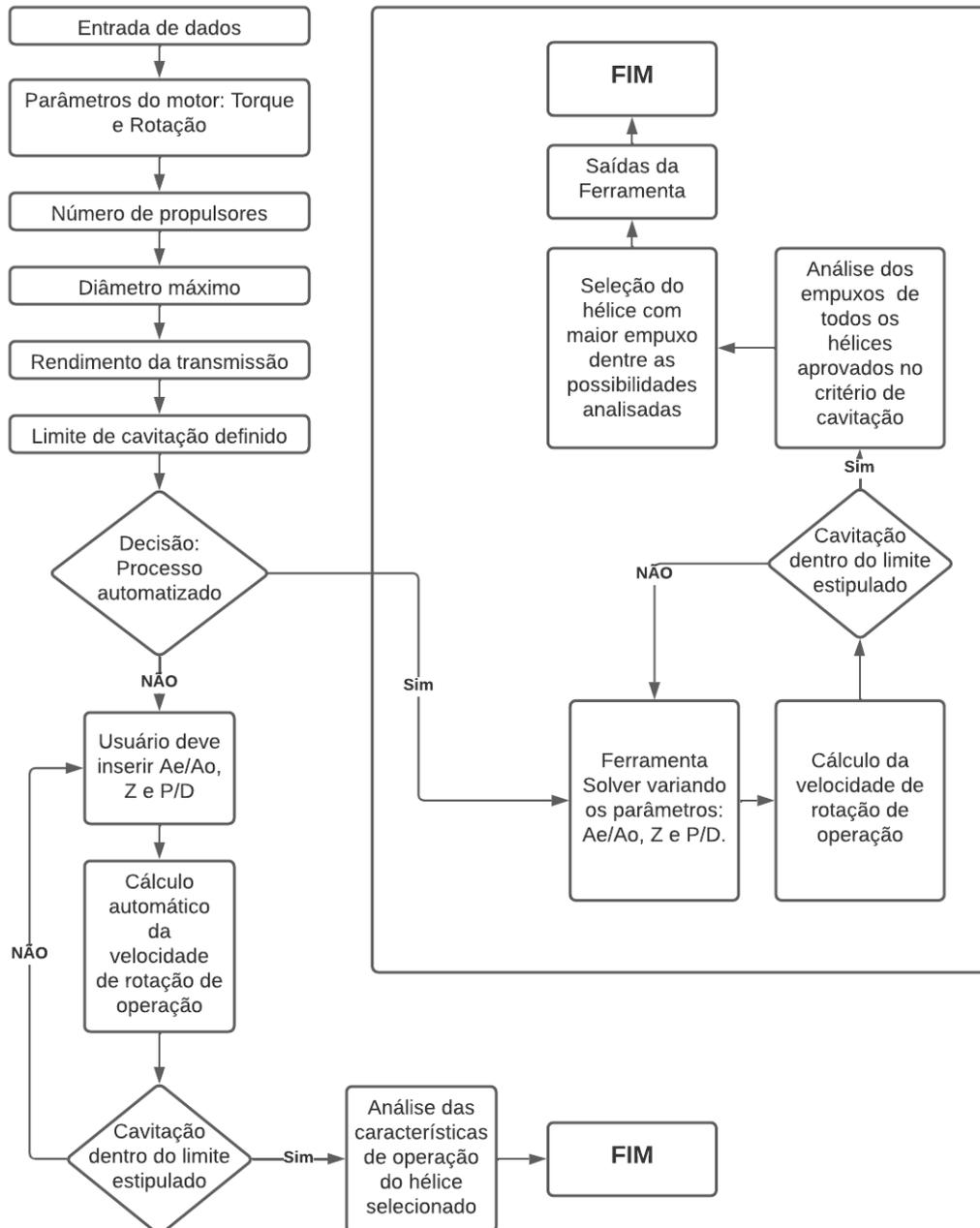
- Velocidade de rotação de operação no eixo do propulsor ($n_{\text{operação}}$) - RPM
- Coeficiente de avanço (J) - Adimensional
- Coeficiente de empuxo (K_T) - Adimensional
- Coeficiente de empuxo do tubulão (K_{Tn}) - Adimensional
- Coeficiente de torque (K_Q) - Adimensional
- Eficiência em águas abertas (η_o) - Adimensional
- Empuxo (T) - N
- Torque (Q) - N.m
- Potência absorvida pelo hélice (PHP) - W
- Análise de cavitação
- Análise da transferência de potência motor-transmissão-propulsor

Partindo deste raciocínio base para seleção do propulsor, foi desenvolvido um procedimento automatizado que permite definir automaticamente a melhor combinação possível dos parâmetros de projeto: razão passo-diâmetro, número de pás e razão de área que maximizam o empuxo do propulsor na condição de bollard pull, respeitando o motor pré-definido e o limite de cavitação definido pelo usuário.

Neste processo automatizado, a ferramenta basicamente realiza uma varredura dentre os 4 hélices da série kaplan estudados neste trabalho, analisa todas as relações de P/D para cada um destes hélices, define a velocidade de rotação de operação do propulsor em que o $K_{Q\text{eixo}}$ seja igual ao K_Q do hélice na condição de bollard pull para cada uma destas relações P/D analisadas, e assim seleciona o propulsor que entregue o maior empuxo com o limite de cavitação dentro do limite estipulado pelo usuário. A Figura 13 apresenta um fluxograma básico sobre o funcionamento do módulo na

condição de bollard pull a ser desenvolvido na ferramenta computacional.

Figura 13 – Fluxograma do funcionamento da seleção do hélice em bollard pull.

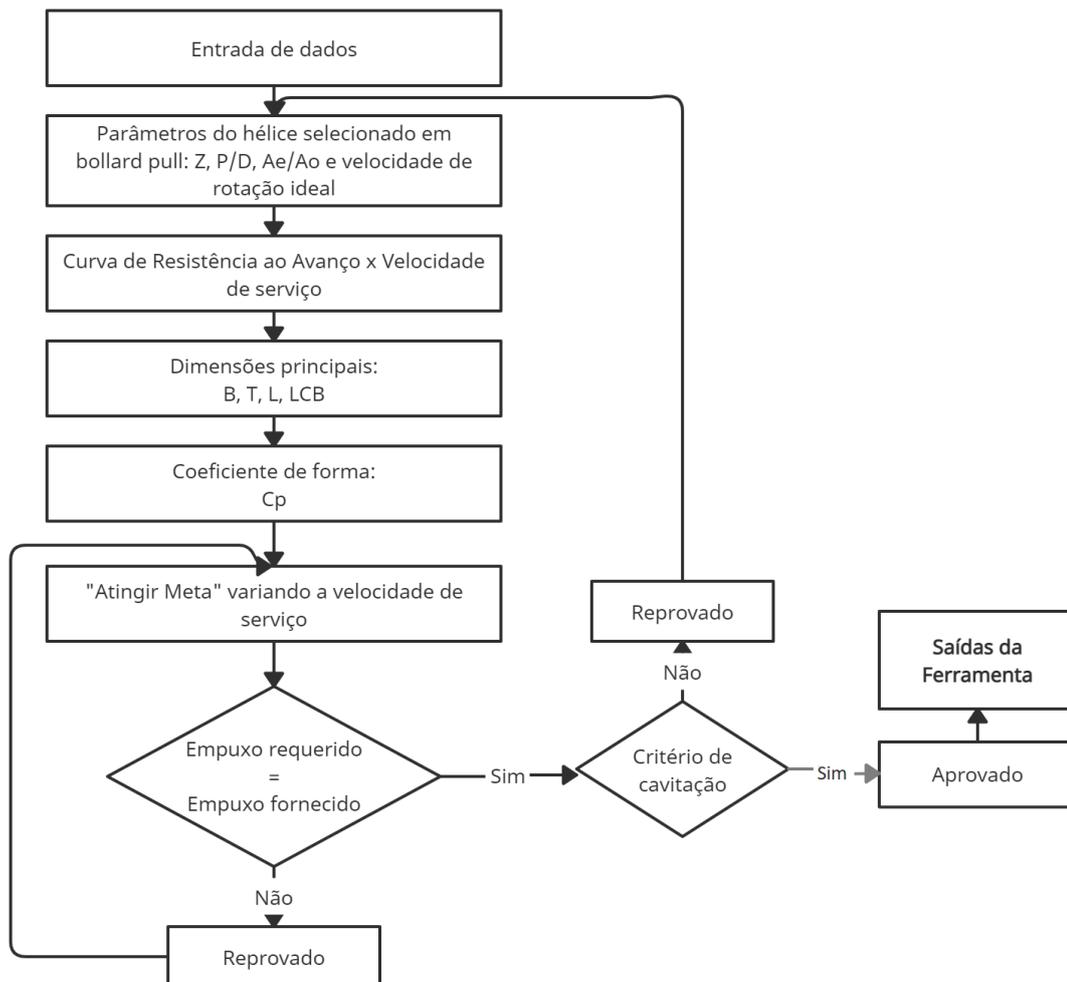


Fonte: Autor (2021).

Além da seleção na condição de bollard pull, o processo automatizado desta ferramenta permite também estimar a velocidade máxima que o rebocador nautimodelo pode alcançar em corrida livre, utilizando o hélice com os mesmos parâmetros daquele selecionado em bollard pull (rotação, P/D, Ae/Ao e Z). A estimativa desta velocidade máxima é calculada partindo de dados de entrada de resistência ao avanço do casco em função da velocidade de serviço e das características geométricas do casco, sendo

estas: comprimento total, boca, calado, LCB e o coeficiente prismático, selecionando assim a velocidade de serviço máxima na qual o empuxo requerido pelo casco (T_{req}) seja igual ao empuxo fornecido pelo sistema propulsivo (T). A Figura 14 apresenta o fluxograma básico para estimativa da velocidade de serviço máxima partindo dos parâmetros do hélice selecionado que maximiza o empuxo em bollard pull.

Figura 14 – Fluxograma da estimativa da velocidade de serviço máxima.



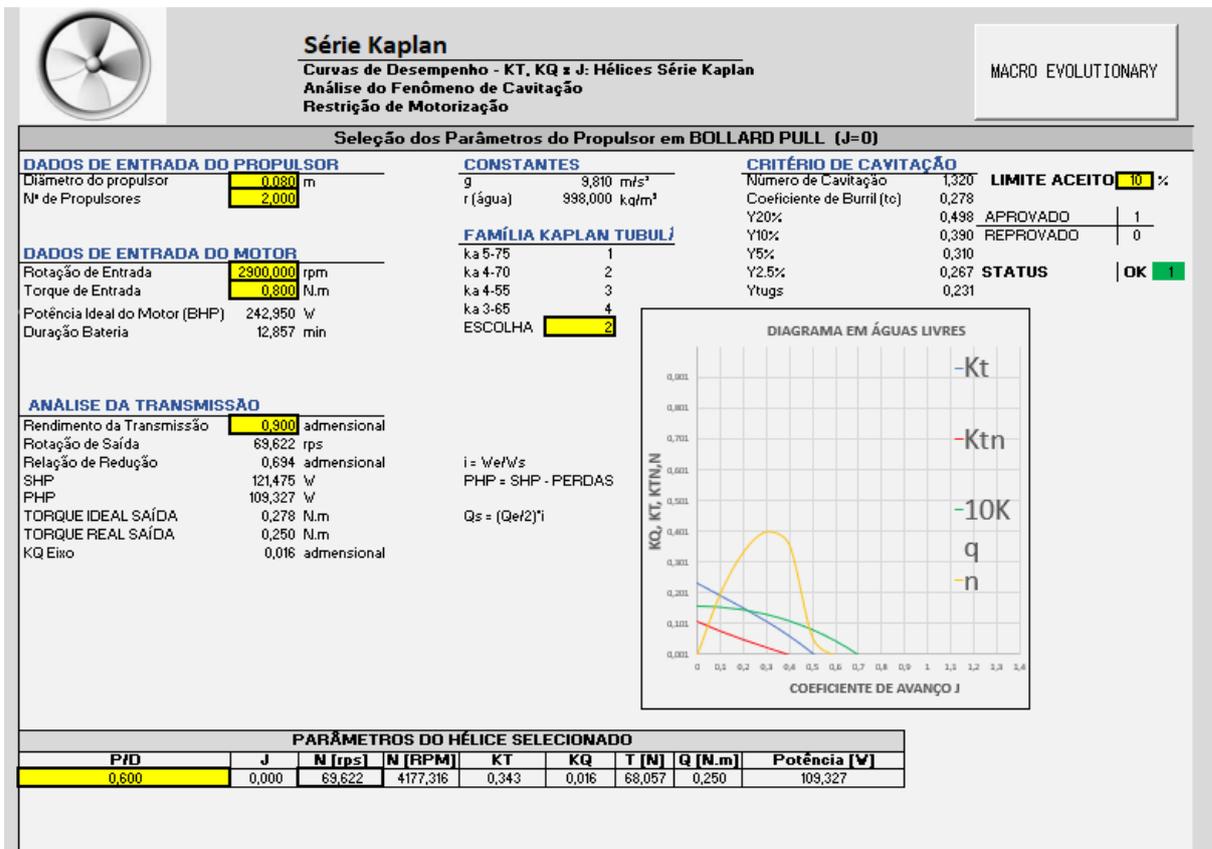
Fonte: Autor (2021).

O usuário que utilizará a ferramenta terá acesso à planilha Display, onde o mesmo poderá visualizar as duas análises possíveis. A primeira na condição de bollard pull, Figura 15, e a segunda onde será feita a estimativa da velocidade máxima do rebocador em corrida livre, Figura 16.

Para a análise na condição de bollard pull, o usuário poderá visualizar:

- Os dados de entrada do propulsor;
- Os dados de entrada do motor;
- Análise da transferência de potência; motor-transmissão-propulsor;
- As constantes utilizadas nos cálculos;

- O dado de entrada para selecionar hélice da família kaplan que o usuário deseja analisar (Ka 3-65, Ka 4-55, Ka 4-70 e Ka 5-75);
 - Botão da Macro
 - Os parâmetros do hélice selecionado em bollard pull;
 - A análise do critério de cavitação correspondente ao hélice selecionado em bollard pull;
 - O diagrama em águas livres que corresponde ao conjunto de parâmetros selecionados.
- Figura 15 – Display da planilha Série Kaplan para condição de bollard pull.

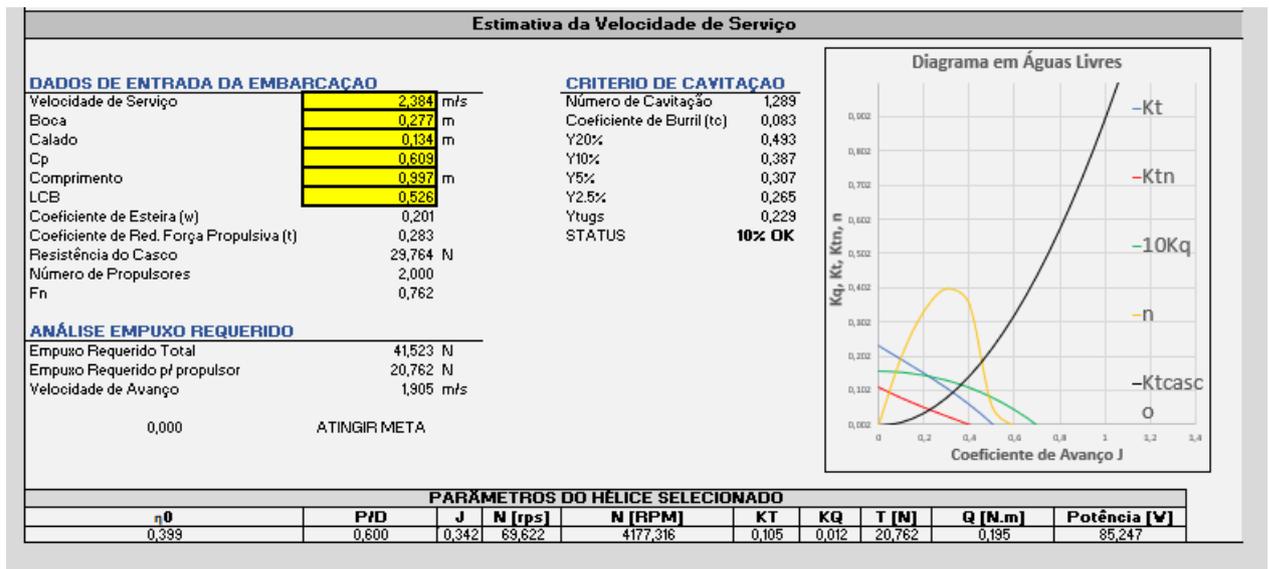


Fonte: Autor (2021).

Para a estimativa da velocidade máxima em corrida livre, o usuário poderá visualizar:

- Os dados de entrada da embarcação;
- Os valores dos coeficientes de esteira e de redução da força propulsiva calculados pelo método de Van Oortmerssen;
- A resistência ao avanço para a velocidade de serviço selecionada;
- A análise do empuxo requerido pelo casco na velocidade de serviço selecionada;
- Os parâmetros do hélice selecionado em corrida livre;
- O diagrama em águas livres correspondente ao conjunto de parâmetros selecionados, com a inclusão da curva de resistência do casco (K_{Tcasco});
- Análise do critério de cavitação correspondente ao hélice selecionado em corrida livre.

Figura 16 – Display da planilha Série Kaplan para condição de corrida livre.



Fonte: Autor (2021).

4.1 DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL

Esta seção abordará em detalhes como foi feita a implementação de cada um dos elementos fundamentais para o desenvolvimento da ferramenta de seleção de propulsor da Série Kaplan, conforme descrito no capítulo 4, sendo estes: o diagrama de águas abertas dos hélices da Série Kaplan, os dados do motor que será utilizado, o raciocínio para determinar a velocidade de rotação de operação no eixo para garantir que a potência requerida pelo sistema propulsivo consiga ser suprido pelo motor selecionado, o fenômeno de cavitação utilizando o Diagrama de Burril, o raciocínio para a estimativa da velocidade máxima de serviço e por fim o detalhamento de como foi feita a automatização deste processo de seleção, com base nos demais elementos fundamentais descritos nas subseções seguintes.

4.1.1 Diagrama de Águas Abertas

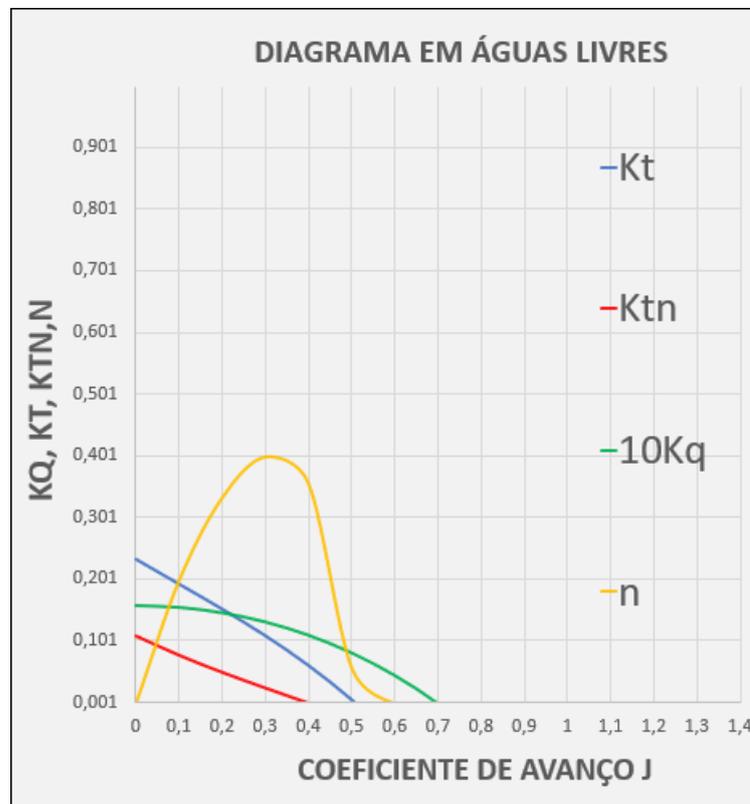
Neste trabalho foi utilizada a série Kaplan, mais especificamente os hélices Ka 3-65, Ka 4-55, Ka 4-70 e Ka 5-75, associados ao tubulão 19A. A série sistemática possibilita apresentar os diagramas de águas abertas que auxiliam na seleção do propulsor para determinada aplicação.

O primeiro passo para o desenvolvimento computacional foi a implementação dos diagramas de águas abertas da série Kaplan em uma planilha excel. Para tal, foram utilizados os polinômios e seus respectivos coeficientes apresentados no Anexo I. Tais polinômios apresentam as curvas K_t , K_{tn} , K_q e n_0 em função do coeficiente de avanço J , para diferentes relações P/D .

Os valores de J foram implementados variando entre 0,0 e 1,3, com intervalo de 0,1. Para cada valor de J foram calculados os valores de K_T , K_{Tn} , K_Q e n_0 através dos polinômios e seus respectivos coeficientes. A princípio a escolha dentre os quatro hélices da série Kaplan (Ka 3-65, Ka 4-55, Ka 4-70 ou Ka 5-75) e da relação passo diâmetro (P/D) foram estipulados aleatoriamente.

Com a implementação das fórmulas na planilha, é possível analisar o diagrama de águas abertas para qualquer relação P/D dentre os quatro hélices analisados. Este diagrama é um gráfico com quatro curvas: K_T , K_{Tn} , K_Q e n_0 . Para melhor visualização dos dados no gráfico, os valores de K_Q do hélice são multiplicados por 10. A Figura 17 exemplifica o diagrama de águas abertas para o hélice Ka 4-70 com P/D 0,6.

Figura 17 – Diagrama de águas abertas para o Ka 4-70 com P/D de 0,6



Fonte: Autor (2021).

4.1.2 Dados do Motor

Para a análise na condição de bollard pull, como dito anteriormente, busca-se a relação P/D para um dado hélice da série Kaplan que entregue o máximo empuxo estático com cavitação abaixo do limite estipulado. Como o projeto é baseado em uma motorização pré-definida, a potência de máquina (BHP) é um dado conhecido, e pode ser calculada segundo a Equação 21. Partindo deste dado, podemos calcular qual seria a potência entregue pela máquina ao hélice (PHP), Equação 19, considerando as

perdas na transmissão e o número de propulsores.

Esta potência absorvida pelo hélice (PHP) acaba se tornando uma restrição na análise, já que deve-se selecionar um hélice demande uma potência igual ou menor que a potência entregue pela máquina ao hélice.

Portanto, a partir da potência que a máquina entrega aos eixos (BHP), simula-se uma caixa de redução para variar a rotação no eixo do propulsor, possibilitando assim selecionar a velocidade de rotação de operação na qual o coeficiente de torque do hélice seja igual ao coeficiente de torque nos eixos de saída da transmissão, garantindo que o motor conseguirá suprir a demanda energética do propulsor.

A Figura 18 apresenta esta análise da potência que chega aos eixos de saída da transmissão, partindo da inserção dos dados de entrada nas células em amarelo na planilha Display.

Figura 18 – Análise da transferência de potência motor-transmissão-hélice

DADOS DE ENTRADA DO PROPULSOR	
Diâmetro do propulsor	0,080 m
Nº de Propulsores	2,000
DADOS DE ENTRADA DO MOTOR	
Rotação de Entrada	2900,000 rpm
Torque de Entrada	0,800 N.m
Corrente do Motor	28,000 A
Amperagem/Hora Bateria	6,000 Ah
Potência Ideal do Motor (BHP)	242,950 W
Duração Bateria	12,857 min
ANÁLISE DA TRANSMISSÃO	
Rendimento da Transmissão	0,900 adimensional
Rotação de Saída	69,622 rps
Relação de Redução = $W_e/W_s = i$	0,694 adimensional
SHP = BHP / Nº Propulsores	121,475 W
PHP = SHP - PERDAS	109,327 W
TORQUE IDEAL SAÍDA = $(Q_e/2)*i$	0,278 N.m
TORQUE REAL SAÍDA	0,250 N.m
KQ Eixo	0,016 adimensional

Fonte: Autor (2021).

4.1.3 Velocidade de rotação de operação

Como estamos fazendo uma análise na condição de bollard pull, $J=0$, para cada relação P/D haverá um valor de K_Q conhecido. Como o diâmetro do hélice está definido, podemos analisar a Equação 5 e concluir que a única incógnita seria a rotação do propulsor, visto que o torque no eixo é um parâmetro conhecido já que conhecemos a potência que será entregue pela máquina ao eixo do propulsor. Partindo da Equação 5, e substituindo o torque no eixo do propulsor pela Equação 19, obtemos:

$$n_{operao} = \left(\frac{PHP}{2\pi D^5 K_Q} \right)^{1/3} \quad (28)$$

Onde:

$n_{\text{operação}}$: Velocidade de rotação de operação no eixo do propulsor.

Desta forma, para cada relação P/D, se estendendo aos diferentes hélices Kaplan analisados, haverá uma velocidade de rotação de operação nos eixos de saída da transmissão de forma que garanta que o $K_{Q\text{eixo}}$ seja igual ao K_Q do hélice analisado e assim a potência requerida pelo sistema propulsivo consiga ser suprido pelo motor. Partindo desta definição da velocidade de rotação de operação, a seleção se estende à encontrar a melhor combinação de P/D, Z e A_e/A_o que entregue o maior empuxo estático, com cavitação abaixo do limite estipulado.

Com a rotação do propulsor e a relação P/D selecionados, é possível calcular o empuxo produzido pelo hélice (T), Equação 3, o empuxo produzido pelo tubulão (T_N), Equação 4, o torque absorvido pelo hélice (Q), Equação 5 e a potência requerida pelo propulsor, Equação 29, a qual deverá ser igual a potência entregue pela máquina aos eixos de saída (PHP).

$$Potência\ requerida = 2\pi Qn \quad (29)$$

Onde:

Q: Torque no eixo do propulsor;

n: Rotação no eixo do propulsor.

Para simplificar a interpretação dos parâmetros obtidos para o usuário da planilha, aparecerá no display uma tabela indicando os dados de saída da seleção conforme a Figura 19.

Figura 19 – Parâmetros de saída do desempenho do propulsor analisado.

PARÂMETROS DO HÉLICE SELECIONADO								
P/D	J	N [rps]	N [RPM]	KT	KQ	T [N]	Q [N.m]	Potência [W]
0,600	0,000	69,622	4177,316	0,343	0,016	68,057	0,250	109,327

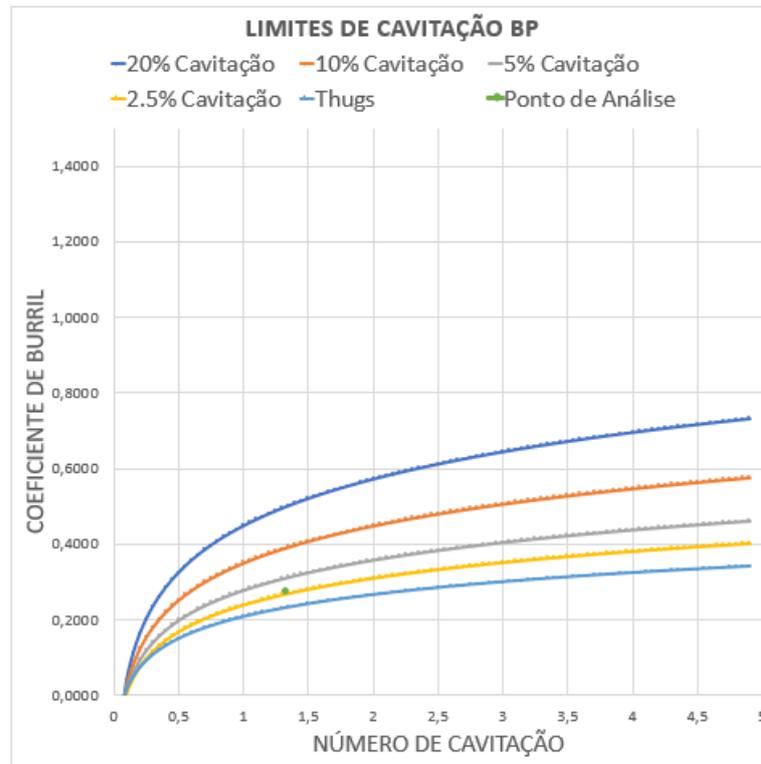
Fonte: Autor (2021).

4.1.4 Cavitação

Para a validação do hélice analisado pelo usuário, é necessário verificar se o mesmo está dentro dos limites aceitos de cavitação. Segundo Mendes (2015), as curvas do diagrama de Burril podem ser aproximadas por curvas de tendência, permitindo verificar de forma automatizada se o ponto (σ, τ_c) do hélice respeita o limite de cavitação estabelecido pelo projetista. Estas curvas de tendência são apresentadas a seguir, e estão ilustradas na Figura 20:

- $Y_{20\%} = 0,17838 \cdot \ln(x) + 0,4481$
- $Y_{10\%} = 0,1422 \cdot \ln(x) + 0,3507$
- $Y_{5\%} = 0,1154 \cdot \ln(x) + 0,278$

- $Y_{2,5\%} = 0,103 \cdot \ln(x) + 0,2388$
- Figura 20 – Curvas de tendência dos limites de cavitação do Diagrama de Burril.



Fonte: Autor (2021).

Neste contexto, $Y\%$ ($x = \sigma$) deve ser maior que o coeficiente de Burril (τ_c) calculado anteriormente conforme a Equação 14. Exemplificando, o hélice estará aprovado no critério de cavitação de 10% caso $Y_{10\%}(x = \sigma)$ for maior que o ponto (σ, τ_c) no Diagrama de Burril.

Para a análise do fenômeno de cavitação na condição de bollard pull, foi considerada a resistência ao avanço do rebocador como sendo o próprio empuxo fornecido pelo hélice, ou seja, estariam em equilíbrio. Desta forma o coeficiente de burril (τ_c) em bollard pull é calculado como:

$$\tau_c = \frac{R_T}{0,5\rho V_R^2 A_P} \quad (30)$$

Na planilha Display aparecerão algumas informações, ilustrado na Figura 21, indicando ao usuário o coeficiente de burril (τ_c) e o número de cavitação no ponto de operação do hélice, calculados partindo das Equações 30 e 16 respectivamente, e os valores do coeficiente de burril para os diferentes limites de cavitação, ($Y\%$ ($x = \sigma$)), além de um indicador de aprovação ou reprovação do limite de cavitação estipulado.

Figura 21 – Análise da cavitação e indicador de aprovação ou reprovação do limite estipulado.

CRITÉRIO DE CAVITAÇÃO			
Número de Cavitação	1,320	LIMITE ACEITO	10 %
Coeficiente de Burril (tc)	0,278		
Y20%	0,498	APROVADO	1
Y10%	0,390	REPROVADO	0
Y5%	0,310		
Y2.5%	0,267	STATUS	OK 1
Ytugs	0,231		

Fonte: Autor (2021).

4.1.5 Estimativa da velocidade máxima de serviço

Para a estimativa da velocidade máxima que o rebocador poderá atingir em corrida livre, será analisado o hélice com o mesmo P/D e rotação que o selecionado para bollard pull. Partindo deste hélice selecionado, a análise inicia-se com a inserção dos valores de resistência ao avanço da embarcação em função da velocidade de serviço. Com estes dados, inseridos pelo usuário, é definida uma curva de tendência para representar essa curva de resistência ao avanço e permitir a automatização da análise.

O próximo passo é a inserção de alguns dados da geometria da embarcação, conforme descrito no capítulo 4, Implementação, a fim de se calcular os coeficientes de redução da força propulsiva (t) e de esteira (w), utilizando o método de Van Oortmersen.

Com estes dados implementados na planilha excel, o próximo passo é determinar o coeficiente de avanço que a embarcação irá atingir na velocidade máxima. Para a análise na corrida livre, o $J_{\text{operação}}$ será o ponto no qual o empuxo fornecido pelo hélice (T) será igual ao empuxo requerido pelo casco (T_{req}) para se deslocar de forma constante na velocidade definida, sendo este o empuxo requerido calculado segundo a Equação 9. Neste ponto, é garantido que o sistema propulsivo desenvolverá empuxo suficiente para deslocar a embarcação constantemente na velocidade de serviço definida.

Visto que o coeficiente de avanço depende da velocidade de avanço, da rotação do propulsor e do diâmetro do mesmo, Equação 6, enquanto a velocidade de avanço por sua vez depende da velocidade de serviço e do coeficiente de esteira, Equação 8, foi proposto variar a velocidade de serviço até que o empuxo requerido pelo casco se iguale com o empuxo desenvolvido pelo propulsor, definindo assim o J de operação e por consequência a velocidade máxima. Tal variação foi realizada utilizando a ferramenta "atingir meta" do Excel, de forma que a diferença entre o empuxo desenvolvido pelo hélice (T) e o empuxo requerido (T_{req}) pelo casco fosse zero.

Esta velocidade acaba sendo um ponto de equilíbrio, visto que um aumento desta velocidade acarreta em um menor empuxo desenvolvido pelo propulsor (T), já

que o K_t diminui com o aumento do J , e em contrapartida um maior empuxo requerido pelo casco (T_{req}). Neste caso a embarcação estaria “freando”.

Por outro lado, uma diminuição desta velocidade acarreta em um maior empuxo desenvolvido pelo propulsor, já que o K_t aumenta com a diminuição do J , e em contrapartida um menor empuxo requerido pelo casco. Neste caso a embarcação estaria “acelerando”. Portanto, seleciona-se a velocidade na qual os empuxos se igualam e a embarcação se desloque então em velocidade constante.

4.1.6 Automatização da seleção do propulsor

Para a automatização da seleção do sistema propulsivo que será aplicado ao rebocador nautimodelo, foi utilizada a ferramenta “Solver” do excel no método evolutionary, atribuindo uma macro ao solver a fim de automatizar o processo. De forma geral, solver é uma ferramenta que busca um valor ideal de máximo ou mínimo para uma fórmula em uma célula da planilha excel chamada de célula objetivo, sendo que esta busca está sujeita a restrições ou limites.

Como dito anteriormente, para a seleção do sistema propulsivo buscou-se maximizar o empuxo dos hélices da série Kaplan associados ao tubulão 19A na condição de Bollard Pull ($J=0$) para o hélice funcionando a vante (1º quadrante), variando os parâmetros de projeto: razão passo diâmetro (P/D), razão de área (A_e/A_o) e número de pás (Z). Vale destacar que como a série Kaplan apresenta um conjunto de coeficientes específicos para cada um dos quatro hélices analisados neste trabalho, os parâmetros A_e/A_o e Z variam de acordo com o hélice que está sendo analisado (Ka 3-65, Ka 4-55, Ka 4-70 ou Ka 5-75).

Por se tratar de um problema com restrições, estas foram definidas como sendo: os valores máximos e mínimos de P/D permitidos pela Série Kaplan, os coeficientes dos polinômios interpoladores específicos de cada hélice, o coeficiente de avanço restringido em zero, o limite de cavitação estipulado pelo usuário, a potência requerida pelo eixo de cada propulsor (garantido pela seleção da velocidade de rotação de operação na saída da transmissão, como explicado na subseção 4.1.3.) e o diâmetro máximo do hélice.

Neste contexto, o modelo matemático para a seleção do propulsor do rebocador é:

$$\text{Max } F(x) = \max T_{\text{total}} (P/D, n)$$

Ou seja, a função objetivo é:

$$T + T_N = K_{TT} * \rho * n^2 * D^4$$

Onde :

K_{TT} : Coeficiente de empuxo total, conjunto hélice-tubulão;

T : Empuxo fornecido pelo hélice;

T_N : Empuxo fornecido pelo Tubulão.

Obs: Os polinômios interpoladores da Série Kaplan e seus respectivos coeficientes estão no Anexo A.

As restrições aplicadas são:

- $R1(x): P/D \geq 0,6$.
- $R2(x): P/D \leq 1,6$ para o Ka 4-55 ou $P/D \leq 1,4$ para os demais hélices.
- $R3(x)$: Coeficientes dos Polinômios interpoladores ($Ae/Ao, Z$)
- $R4(x)$: $J=0$.
- $R5(x)$: Potência no eixo requerida pelo hélice = Potência entregue pelo motor ao eixo.
- $R6(x)$: Cavitação ($P/D, Ae/Ao, Z$) \leq Limite de Cavitação.
- $R7(x)$: Diâmetro do hélice = 0.08 metros.

Para incluir a estimativa do fenômeno de cavitação na condição de bollard pull no processo de seleção automatizado, foi feita uma restrição da seguinte forma: o usuário deve definir o limite de cavitação (2.5, 5, 10, 20%), caso o limite estipulado seja aprovado aparecerá o número 1 na célula de condição da cavitação, isto significa que o hélice está com cavitação abaixo do limite estipulado, caso contrário o hélice estará reprovado e assim aparecerá o número 0 (zero).

Após a seleção do propulsor através da ferramenta Solver, o processo de seleção se estende à estimar a velocidade máxima que o rebocador poderá atingir em corrida livre. O processo segue o que foi detalhado na subseção 4.1.5, onde basicamente utilizou-se a ferramenta "atingir meta" do Excel de forma a encontrar a velocidade de serviço na qual a diferença entre o empuxo desenvolvido pelo hélice (T) e o empuxo requerido pelo casco (T_{req}) na velocidade dada fosse zero.

De forma a automatizar este processo de seleção, foi gravado uma macro contemplando a ferramenta solver e o teste de hipóteses utilizados na análise e por fim atribuído a um botão nomeado MACRO EVOLUTIONARY. Desta forma, quando o usuário apertar o botão, a macro irá executar o solver e através de várias iterações espera-se encontrar a melhor combinação dos parâmetros que satisfaça o critério de cavitação e maximize o empuxo em bollard pull, além de estimar a velocidade de serviço máxima através da função atingir metas do teste de hipóteses do excel.

5 TESTE PRÁTICO COM O REBOCADOR NAUTIMODELO

De forma a analisar o desempenho de um propulsor da Série Kaplan na prática, foi realizado um teste de bollard pull com o rebocador nautimodelo desenvolvido pela equipe Cabanos da Universidade Federal do Pará durante o período da competição DUNA 2021. Vale destacar que a equipe Cabanos foi a primeira colocada na prova do cabo de guerra, sendo esta a prova que mais se aproxima da condição de bollard pull a vante, o qual é o enfoque da análise realizada neste trabalho.

5.1 CARACTERÍSTICAS DO CASCO E DO SISTEMA PROPULSIVO DO REBOCADOR NAUTIMODELO

O primeiro passo para o estudo do rebocador nautimodelo em específico é a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos, os quais foram disponibilizados pela Equipe Cabanos da UFPA-Belém e estão descritos na Tabela 2.

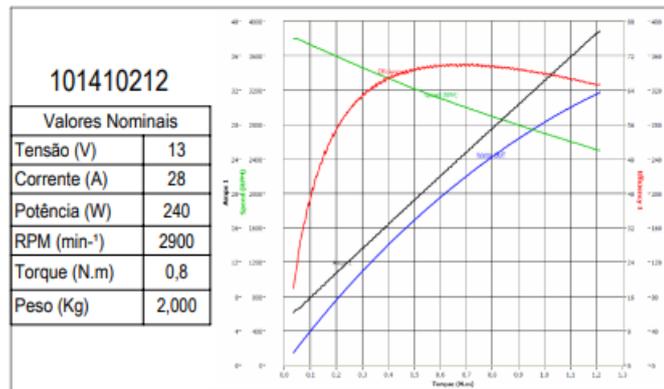
Tabela 2 – Características hidrostáticas do modelo para o calado de projeto .

Parâmetros da Embarcação	
Comprimento (mm)	925
Boca máxima (mm)	320
Calado (mm)	145
Borda livre (mm)	105
Deslocamento (kg)	19
Coefficiente de Bloco (CB)	0,446
Coefficiente Prismático	0,627

Fonte: Autor(2021)

Em relação a motorização, foi utilizado o modelo Imobras 101410212, o qual é definido pela organização do DUNA-2021. Este é um motor de corrente contínua universal, cuja curva de potência e dados nominais estão representados na Figura 22.

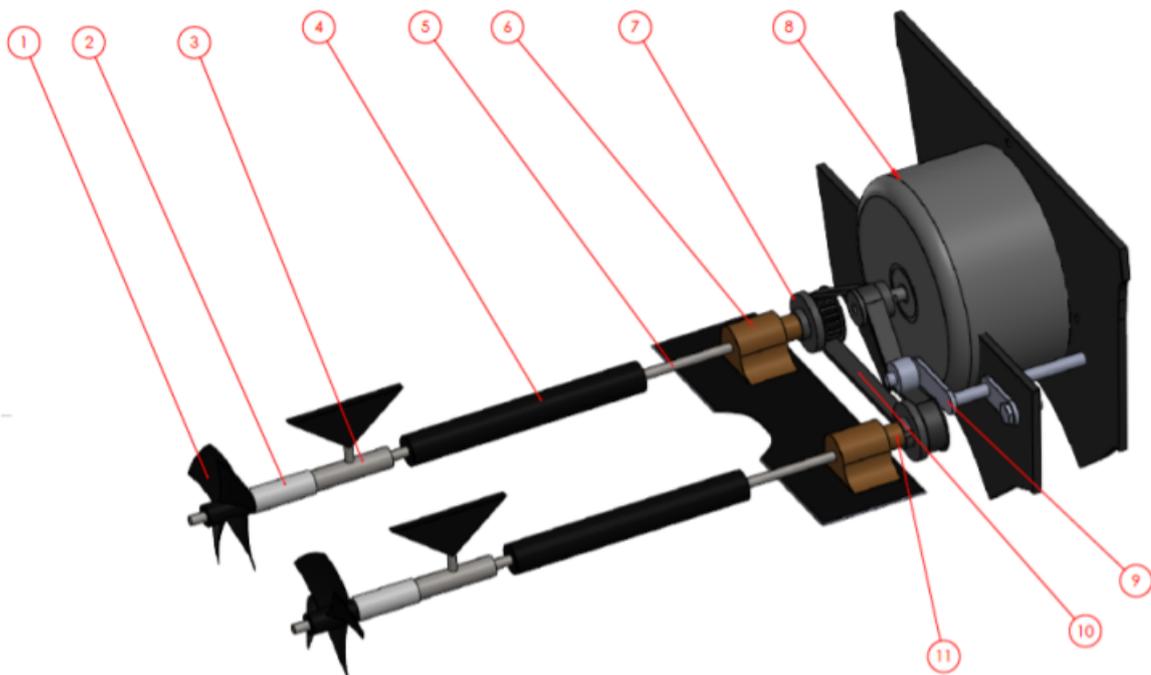
Figura 22 – Curva de potência do motor 101410212 da Imobras utilizado na competição.



Fonte: Imobras (2017).

O sistema de transmissão escolhido pela equipe Cabanos foi por correia sincronizada, por ser aquele que apresenta menores perdas quando comparados aos sistemas de engrenagens e corrente. O sistema de transmissão está representado na Figura 23, e como poder ser visto a correia precisou de um tensionador (item 9) para manter a tensão ideal. E para restringir o movimento axial do eixo, foram utilizadas buchas de um material auto lubrificante feitas por impressão 3D, itens 6 e 11. Vale destacar que a transmissão não varia a rotação nos eixos de saída do propulsor, em teoria é mantida a rotação nominal do motor de 2900 RPM. A análise da potência que chega aos eixos de saída da transmissão partindo do motor estão representados na Tabela 3.

Figura 23 – Sistema de transmissão do modelo .



Fonte: Equipe Cabanos (2021).

Em relação aos elementos que compõem a Figura 23, os elementos respectivos

a cada número identificado são:

- Número 1: Hélice
- Número 2: Bucha do eixo
- Número 3: Pé de galinha
- Número 4: Tubo telescópio
- Número 5: Eixo
- Número 6: Bucha do eixo/polia
- Número 7: Polia
- Número 8: Motor
- Número 9: Tensionador da correia
- Número 10: Correia
- Número 11: Bucha do eixo/polia

Tabela 3 – Transferência de potência motor-transmissão-hélice da Equipe Cabanos.

Parâmetros analisados	
BHP (W)	240
Número de Propulsores	2
Rendimento da Transmissão	0,9
Rotação no eixo de saída da transmissão (rps)	48,333
PHP (W)	109,32
Torque no Eixo do propulsor (N.m)	0,36
K_{Qeixo}	0,05

Fonte: Autor(2021)

O hélice selecionado foi o Kaplan Ka 4-70, com diâmetro de 79 mm e relação P/D de 1.025. Os hélices foram feitos por impressão 3D com filamento Tritan, banhadas com resina isofitálica para que obtenham melhor acabamento.

O hélice Ka 4-70 selecionado pela equipe está associado ao tubulão 19A, cuja seção foi gerada a partir das cotas disponíveis no livro PNA Vol. II. Este perfil foi então revolucionado no software Rhinoceros para obtenção de sua geometria 3D.

Inserindo os dados de entrada necessários na ferramenta desenvolvida, podemos analisar o desempenho do hélice selecionado na condição de bollard pull e assim comparar e discutir com base nos resultados do teste prático. As saídas da ferramenta na condição de bollard pull para o sistema propulsivo selecionado pela Equipe Cabanos estão representados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de saída do desempenho do propulsor selecionado pela Equipe Cabanos .

Parâmetros do hélice selecionado	
A_e / A_o	0,7
Z	4
P/D	1,025
Diâmetro (m)	0,079
J	0
Rotação (rps)	48,333
K_T	0,826
K_Q	0,047
Q(N.m)	0,336
T(N)	75,045
Potência _{requerida} (W)	101,931
Cavitação (%)	>20%

Fonte: Autor(2021)

De forma a comparar o hélice selecionado pela Equipe Cabanos com o hélice selecionado utilizando a ferramenta automatizada desenvolvida, as Tabelas 5 e 6 apresentam a análise da potência que chega aos eixos de saída da transmissão e os parâmetros do hélice resultado da automatização para condição de bollard pull respectivamente, conforme a metodologia descrita na seção 4.1.6. Vale destacar que foi utilizado um limite de cavitação de 10%.

Tabela 5 – Transferência de potência motor-transmissão-hélice resultado da automatização .

Parâmetros analisados	
BHP (W)	240
Número de Propulsores	2
Rendimento da Transmissão	0,9
Rotação no eixo de saída da transmissão (rps)	64,635
PHP (W)	109,32
Torque no Eixo do propulsor (N.m)	0,269
$K_{Q_{eixo}}$	0,021

Fonte: Autor(2021)

Tabela 6 – Parâmetros de saída do desempenho do propulsor resultado da automatização.

Parâmetros do hélice selecionado	
A_e / A_o	0,65
Z	3
P/D	0,724
Diâmetro (m)	0,079
J	0
Rotação (rps)	64,635
K_T	0,462
K_Q	0,021
Q(N.m)	0,269
T(N)	74,947
Potência _{requerida} (W)	109,32
Cavitação (%)	10%

Fonte: Autor(2021)

É possível perceber que a cavitação ficou no limite estipulado, 10%, contudo o empuxo se manteve praticamente igual. Em relação ao ponto de operação do propulsor, com a ferramenta desenvolvida é possível igualar os coeficientes de torque do eixo e do propulsor, contudo para tal é necessário desenvolver um sistema de transmissão que consiga variar a rotação do eixo do propulsor em relação ao motor. O propulsor selecionado pela ferramenta foi o Ka 3-65, sendo este o propulsor com curvas K_T e K_Q com maiores valores em $J=0$.

Caso a análise se restringisse a selecionar apenas os parâmetros do hélice Ka 4-70 que entregasse o maior empuxo com cavitação dentro do limite estipulado, como resposta teríamos os dados demonstrados na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 – Parâmetros de saída do desempenho do propulsor resultado da automatização para o hélice Ka 4-70.

Parâmetros do hélice selecionado	
A_e / A_o	0,70
Z	7
P/D	0,763
Diâmetro (m)	0,079
J	0
Rotação (rps)	61,296
K_T	0,51
K_Q	0,025
Q(N.m)	0,284
T(N)	74,492
Potência _{requerida} (W)	109,32
Cavitação (%)	10%

Fonte: Autor(2021)

Com esta análise, ao comparar com o hélice Ka 4-70 selecionado pela Equipe Cabanos, percebe-se que os parâmetros P/D e velocidade de rotação do propulsor variaram, de forma a aproveitar o máximo da potência do motor para conseguir obter o máximo empuxo possível. A variação destes parâmetros permitiu maximizar o empuxo, contudo com um limite de cavitação mais baixo, no caso 10% de cavitação, permitindo em teoria mitigar a ocorrência deste fenômeno.

5.2 PREPARAÇÃO DO MODELO E EQUIPAMENTOS

Nesta etapa de ensaio de desempenho de empuxo na condição de bollard pull, foram utilizados os itens descritos na Tabela 8.

Tabela 8 – Itens utilizados no ensaio de bollard pull.

itens utilizados	
Corda	6 mm de Diâmetro x 5 m
Balança Digital	0 -50 kg resolução de 0,001 g
Tacômetro Digital a laser	0-9999 rpm resolução 1 rpm
Voltímetro	LiPo 2 - 8S
Câmera Filmadora	Taxa de quadros 30fps

Fonte: Autor(2021)

Também foram utilizados todos os itens necessários para o funcionamento do rebocador nautimodelo, como bateria Deep Cycle 12V 6Ah Ev12-6 totalmente

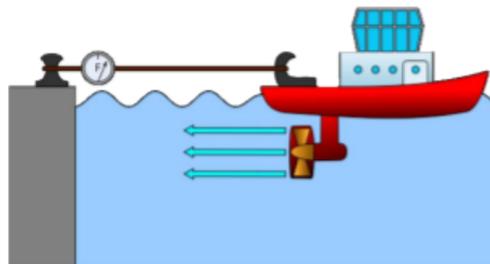
carregada, controle, receptor e servos.

5.3 ENSAIO DE *BOLLARD PULL*

Como forma de mensurar o desempenho do hélice Ka 4-70 associado ao tubulão 19A selecionado pela Equipe Cabanos, foi proposto um ensaio de tração estática. O teste foi realizado em um lago no Centro de Convenções de Joinville (Expoville), local o qual sedia o DUNA.

Para o ensaio de tração estática, a embarcação deverá ser fixada a um cabo na extremidade da popa, que por sua vez deve ser fixado à balança digital e amarrado a um ponto fixo na margem do lago, ilustrado na Figura 24.

Figura 24 – Esquema do ensaio de bollard pull.



Fonte: Wikiwand (2021).

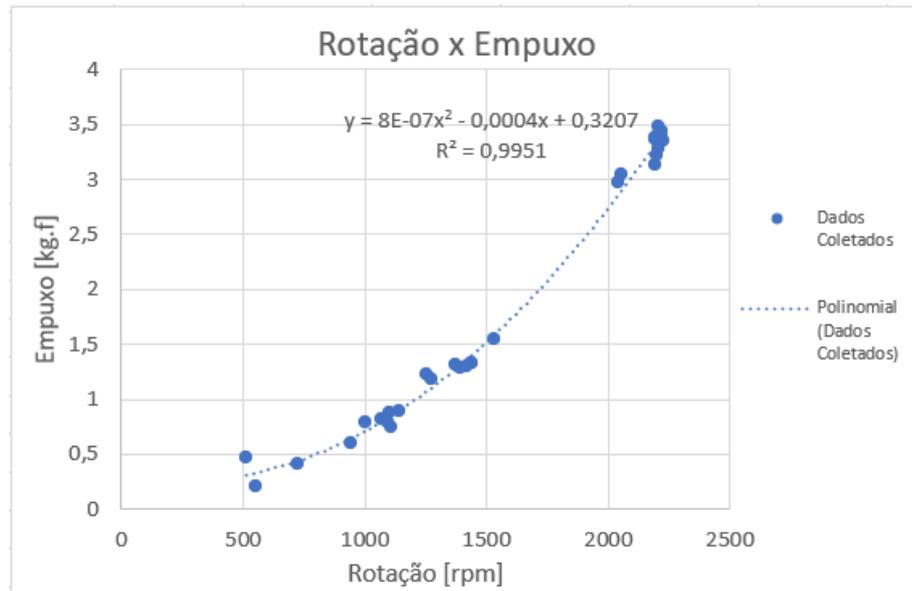
Neste ensaio busca-se obter a curva de empuxo versus rotação do propulsor. Para tal a potência foi variada no controle em 25, 50, 75 e 100%, deixando a embarcação estabilizar por aproximadamente 5 segundos e realizando medições de empuxo e rotação a cada 1 segundo, até a coleta de aproximadamente 5 medições para cada faixa de rotação. Para fazer o registro dos equipamentos de medição utilizados (tacômetro e balança digital) deve-se utilizar duas câmeras para visualização de suas respectivas medições ao longo do ensaio.

Durante o ensaio foram realizadas duas medições para cada faixa de potência, sendo que o ensaio foi iniciado com potência em 100% a fim de evitar a influência do descarregamento da bateria nesta faixa, sendo aquela com maior importância para a análise do empuxo em bollard pull.

5.3.1 Resultados do ensaio de *bollar pull*

O teste do hélice Ka 4-70 associado ao tubulão 19A com o rebocador nautimodelo da Equipe Cabanos foi realizado, viabilizando obter a curva Rotação x Empuxo. Foram realizadas 32 medições, e os dados coletados estão representados na Figura 25. Vale destacar que não foram realizadas maiores medições devido a baixa autonomia da bateria e a falta de baterias extras durante a realização do teste.

Figura 25 – Dados de rotação x empuxo do hélice Ka 4-70 da Equipe Cabanos.



Fonte: Autor (2021).

5.3.2 Análise do ensaio de *bollard pull*

Com base nos resultados, o primeiro ponto que pode ser analisado é em relação ao desempenho do hélice ter sido abaixo do esperado. Pelo projeto, o empuxo total deveria ser próximo de 150 N, ou seja, 15 kg.f, sendo que na prática o sistema propulsivo desenvolveu aproximadamente 3.5 kg.f.

Esta questão do empuxo é um ponto bastante delicado, visto que existem inúmeras variáveis que podem interferir nesse resultado. Os erros na geometria do hélice durante a fabricação e possíveis defeitos na construção dos demais sistemas que compõem o rebocador nautimodelo, por exemplo, são fatores que podem mudar radicalmente a condição de operação do hélice e assim influenciar negativamente no resultado. De forma a exemplificar esta questão, para que o empuxo resultante de um hélice com apenas duas pás seja nulo, apesar do torque estar sendo gerado e consumido e o propulsor estar no ponto de operação, basta que se fabrique e posicione uma das pás com sentido oposto à outra, ou seja, as faces das pás em sentidos opostos, desta forma a soma do empuxo gerado por cada uma das pás será nulo.

A diferença entre o empuxo teórico e o empuxo medido também pode ser reflexo de um outro ponto, a região do perímetro do tubulão em que não ocorre escoamento externo devido a presença do casco. Tais regiões não poderão contribuir com a sua parcela de empuxo devido ao duto, cabendo então ao projetista descontar do empuxo do duto uma parcela proporcional ao arco do perímetro correspondente à região afetada pela proximidade do casco.

Outro ponto importante analisado nos ensaios foi a questão do motor não ter desenvolvido a rotação nominal de 2900 rpm, nos testes práticos foi medido

aproximadamente 2200 rpm. Para justificar e entender o porquê desta grande variação, buscou-se informações com o fabricante do motor utilizado, o Imobras 101410212. Este motor de corrente contínua apresenta uma curva de potência fornecida pelo fabricante, Figura 22, a qual foi gerada a partir de uma alimentação contínua de 13 volts, variando o torque a partir de um dinamômetro e desta forma os dados apresentados foram sendo coletados.

A questão é que para a realização dos testes, a bateria totalmente carregada conseguia fornecer valores de tensão abaixo do valor nominal do motor, aproximadamente 12,5 volts, o que provavelmente contribuiu para limitar o fornecimento de energia do motor e não permitir que fosse desenvolvida a rotação nominal de 2900 rpm. Ao submetermos o motor, durante os testes, a uma tensão abaixo deste valor nominal teremos como reflexo uma perda de "performance" de uma maneira geral, alterando o torque e a rotação que o motor vai entregar ao sistema. Caso fosse gerada uma nova curva de potência do motor, no qual ele estaria sendo alimentado por uma tensão abaixo da nominal, o comportamento dos parâmetros do motor seriam completamente diferentes daquele previsto pela curva de potência fornecida pelo fabricante. Neste contexto, podemos descartar a possibilidade de tentar estimar o torque correspondente à velocidade de rotação de 2200 rpm a partir da extrapolação da curva de potência que o fabricante fornece, sendo esta uma abordagem equivocada para o problema.

Neste contexto, podemos considerar que teremos um torque inicial devido a restrição imposta pelo fluido no hélice, contudo a medida que a alimentação vinda da bateria varia, a rotação desenvolvida no eixo do motor também irá variar, alterando conseqüentemente este torque necessário no hélice

Outro ponto a ser levantado é em relação à cavitação. Este fenômeno acaba gerando uma queda de desempenho do hélice. Para o hélice selecionado pela Equipe Cabanos, o fenômeno de cavitação ocorre com porcentagens acima de 20% seguindo a estimativa pelo Diagrama de Burril, o que provavelmente interferiu negativamente nos resultados obtidos. A queda de empuxo e as vibrações induzidas são um dos efeitos negativos mais marcantes na cavitação, além da deterioração das pás dos hélices. Além disso, enquanto a cavitação ocorre, o hélice acaba por exigir um menor torque do eixo do propulsor, dessa forma, o hélice irá se equilibrar com o motor em um ponto diferente daquele considerado durante a fase de projeto, sendo este o valor nominal vindo do manual do fabricante do motor.

5.4 ANÁLISE DO PROJETO PARA CONDIÇÃO DE *BOLLARD PULL* ASSUMINDO $J=0$

A aproximação da condição de bollard pull a partir da seleção do propulsor em $J=0$ é uma abordagem que levanta alguns questionamentos. O coeficiente de avanço (J) é corrigido justamente porque mudamos o ângulo de incidência do fluido, ou seja, quando temos avanço da embarcação muda-se este ângulo, sendo necessário corrigir a velocidade com que o fluido está sendo ejetado. Neste âmbito, a questão do J tem a ver com a correção do ângulo de ataque e da velocidade do fluido ejetado, que passa a ser uma velocidade relativa ao avanço. Por isso utilizamos o diagrama em função de J , para exatamente corrigir estes dois efeitos. Lembrando que o coeficiente de avanço é medido em água aberta, sendo esta uma outra questão importante, visto que para corrigir o J ao redor do casco utilizamos o coeficiente de esteira (w).

Seguindo neste questionamento à respeito da correção do coeficiente de avanço ao redor do casco, outro fator que pode ter influenciado nos resultados do teste é a presença do casco a vante do propulsor, sendo que pelo fato de estarmos analisando um diagrama em águas abertas na fase de projeto, o ideal seria realizar o teste eliminando o casco. Isto por que a influência do coeficiente de esteira é muito alta, possibilitando afetar o ponto de operação que por sua vez vai afetar toda a análise. O coeficiente de esteira reduz a velocidade do fluido em cada pá, no fundo teremos uma velocidade do fluido diferente. Apesar de em bollard pull o barco não estar se movimentando a vante, o que nos induz a acreditar que o coeficiente de esteira é nulo, existe uma sucção do fluido e neste caso a presença do w vai alterar o campo de pressão a vante do propulsor mesmo com o barco parado, e assim o diferencial de pressão vai mudar e conseqüentemente a potência do fluido ejetado será diferente. Contudo, estudos que tentem quantificar a influência do coeficiente de esteira na condição de bollard pull são difíceis de serem encontrados, talvez por não trazerem ganhos significativos.

De uma forma geral o projeto do sistema propulsivo neste trabalho teve como objetivo encontrar a geometria do propulsor que consumisse o torque disponível e maximizasse o empuxo, considerando um motor pré-definido trabalhando na condição nominal de máxima eficiência. Contudo é aqui que entra um novo questionamento. Talvez seja muito simples otimizar a geometria do propulsor para maximizar empuxo com restrição de torque em $J=0$. Isto por que quando ejetamos o fluido a ré estamos consumindo potência, que é a potência de empuxo (THP), Equação 18, contudo na condição de bollard pull a velocidade de avanço é substituída pela velocidade do fluido (V_{fluido}). Esta potência de empuxo do fluido é retirada da potência disponível no motor, tendo um novo valor de potência gerada para torque, e assim um novo torque limite.

Seguindo esta lógica, se analisarmos a condição de bollard pull em $J=0$, em

teoria isto empõe que V_{fluido} é zero, portanto THP é zero e, segundo a Equação 25, a eficiência do propulsor (η_p) também é zero. Neste cenário a intuição é dizer que todo PHP é utilizado para girar o fluido. Mas isso não é verdade, já que existe a parcela de potência que empurra o fluido apesar da embarcação está parada.

Neste contexto, talvez se projetarmos o hélice para a condição de maximizar o empuxo em bollard pull sem considerar a potência de empuxo do fluido, ou seja, analisando em $J=0$, na prática esta condição não será alcançada. Isto porque a medida que o propulsor começa a ejetar fluido a ré ele começa a ter menos potência disponível para rotacionar, tratando-se assim de um processo iterativo aonde selecionamos um torque limite, definimos o empuxo, calculamos a potência de empuxo correspondentes, retira-se então da potência disponível, tendo assim um novo limite de torque, uma nova potência de empuxo, convergindo neste raciocínio até o ponto de operação aonde a potência de empuxo do fluido somada com a potência de rotação, devem ser iguais a potência fornecida pelo motor no teste do dinamômetro. O grande desafio aqui é conseguir definir qual a velocidade do flúido que o sistema irá estabilizar.

6 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um procedimento automatizado de seleção de um hélice da Série Kaplan associado ao tubulão 19A que forneça o maior empuxo na condição de bollard pull, abordado em $J=0$, atrelado a restrições de motorização e cavitação. Partindo da ferramenta computacional desenvolvida para este processo, foi realizado um teste de bollard pull com um rebocador nautimodelo de forma a comparar os resultados práticos com os dados teóricos da ferramenta.

Para alcançar o objetivo, utilizou-se os métodos descritos na fundamentação teórica, permitindo desenvolver a ferramenta computacional. Após seu desenvolvimento e verificar os resultados dos testes, foi possível chegar as seguintes conclusões.

A ferramenta construída e apresentada neste trabalho surge como uma opção de método para seleção do hélice na condição de bollard pull que apresenta uma probabilidade maior de selecionar um hélice em $J=0$ que maximize o empuxo, respeitando o limite de cavitação estipulado e que trabalhe em sincronia com a motorização pré-definida. Isto se deve ao fato da ferramenta utilizar algoritmos de otimização que "testam" diversas combinações de parâmetros de projeto, selecionando aquele que entregue o melhor resultado, com base nos dados de entrada e restrições consideradas.

Vale ressaltar que a ferramenta computacional desenvolvida depende da curva de rotação versus torque do motor pré definido, ou seja, da curva de potência. Como este trabalho partiu da análise de um rebocador nautimodelo, a ferramenta acaba se restringindo a problemas envolvendo motores elétricos. No caso de motores a combustão existem diversas regiões de operação, podendo produzir a mesma potência para rotações diferentes e neste contexto a ferramenta não contempla esta possibilidade, valendo única e exclusivamente motores elétricos com curva de operação conhecida.

Com a comparação dos resultados do teste prático com os valores estipulados no projeto, as diferenças tanto em relação ao empuxo medido quanto em relação ao ponto de operação do motor, acabaram levantando alguns questionamentos importantes. Ficou evidente que o motor na prática não operou conforme previsto, muito provavelmente pela limitação no fornecimento de tensão e corrente vinda da bateria, mudando assim completamente a curva de desempenho do motor que o fabricante fornece, resultando em um conjunto de rotação e torque bem abaixo do

esperado. Portanto, é de suma importância a análise do motor que será utilizado, de forma a selecionar o hélice para o ponto de operação correto, além da realização de testes práticos com o rebocador nautimodelo muito antes do período de competição. Em relação à diferença no empuxo obtido durante o teste prático, diversos fatores podem influenciar nesta questão. Tanto aspectos construtivos, quanto fenômenos físicos, podem interferir radicalmente na condição que o propulsor está operando, o que ressalta a importância de se ter um processo de construção tão rigoroso quanto o projeto.

Outro ponto importante observado é em relação ao projeto do sistema propulsivo na condição de bollard pull em $J=0$. Em teoria, nesta abordagem é considerada que toda a potência absorvida pelo hélice (PHP) será consumida para girar o fluido, desconsiderando a parcela de potência utilizada para empurrar o fluido (THP), onde apesar da velocidade de avanço (V_a) ser nula a velocidade do fluido (V_{fluido}) é diferente de zero, e interfere no ponto de operação do propulsor.

Dito isso, ao longo do trabalho compreende-se que apesar do projeto ser desenvolvido para maximizar o empuxo, alguns aspectos construtivos apresentam um impacto significativo nos resultados do projeto. Um exemplo é o fato do barco ricochetear durante a operação, mudando o ângulo do empuxo constantemente, de forma que a projeção na horizontal do empuxo será a média da variação estatística desse valor. Neste contexto, é plausível dizer que os esforços para projeto e otimização do propulsor, são secundários aos esforços de construção e fabricação. O ponto é que partindo de um projeto minimamente decente, o ganho que se tem com estes ajustes e refinamentos no projeto de propulsores são muito inferiores se comparados com os erros de construção, desgaste, fadiga, desalinhamento do eixo e falta de lubrificação por exemplo, enfatizando que um projeto bem feito deve ser seguido de um processo de fabricação, instalação e operação tão rigoroso quanto o processo de projeto, caso contrário não haverá ganhos significativos.

6.1 SUGESTÃO DE TRABALHO FUTURO

A ferramenta desenvolvida apresenta um raciocínio "base" para seleção de um propulsor na condição de *bollard pull* e estimativa de velocidade de serviço máxima. As recomendações de trabalhos futuros visam melhorias empregadas a ferramenta e suas funções, sendo essas:

- Inclusão de outras séries sistemáticas, como a Série B, permitindo comparar diferentes famílias de propulsores;
- Implementação de métodos de estimativa para resistência ao avanço;
- Implementação de outros métodos empíricos para os cálculos dos coeficientes de esteira e redução da força propulsiva;

- Procedimento para análise de hélices com passo controlável;
- Apresentar uma nova abordagem para seleção de propulsores na condição de *bollard pull*, a fim de aproximar a análise com a realidade, ou seja, com coeficiente de avanço (J) diferente de zero.
- Implementar no projeto do propulsor a análise para motores a combustão.

REFERÊNCIAS

- BENTO, W. G. **Análise experimental do sistema propulsor aplicado a um modelo de um rebocador em escala reduzida**. Tese (TCC(Graduação)) — Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.
- CANDIDO, I. S. **Projeto Integrado de Sistema Propulsivo com Requisito de Tração Estática**. Tese (TCC(Graduação)) — Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- CARLTON, J. **Marine propellers and propulsion**. 2. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2007.
- FRAGOSO, O. A.; CAJATY, M. C. **Rebocadores Portuários**. 1. ed. Rio de Janeiro: Conselho Nacional de Praticagem, 2002.
- HENSEN, H. **Tug Use in Port: a practical guide**. 2. ed. Rotterdam: The Nautical Institute, 2003.
- HOLTROP, J.; MENNEN, G. **A statistical power prediction method**. Rotterdam: International Shipbuilding Progress, 1978. v. 25.
- MENDES, E. R. **Procedimento para seleção otimizada de um propulsor da Série B**. Tese (TCC(Graduação)) — Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.
- MOLLAND, A.; TURNOCK, S.; HUDSON, D. **Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power**. 1. ed. [S.l.]: USA: Cambridge University Press, 2011.
- NASSEH, J. Hélices:os conceitos básicos (parte 1). **Revista Náutica n.61**, São Paulo, p. 98–100, 1999.
- OORTMERSSEN, V. **A power Prediction Method and its Application to Small Ships**. Rotterdam: International Shipbuilding Progress, 1971. 397-415 p.
- OOSTERVELD, M. W. C. **Wake Adapted Ducted Propellers**. Tese (Tese(Doutorado)) — Curso de Tecnologia Marinha e de Transporte, Delft University Of Technology, Wageningen, 1970.
- PADOVEZI, C. D. **Aplicação de resultados de escala real no projeto de hélices de embarcações fluviais**. Dissertação (Mestrado) — Curso de Engenharia Naval, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- PINHEIRO, T. P. **Obtenção de torque e empuxo de propulsores através do uso de sistema de medição de eixo por telemetria**. Tese (TCC(Graduação)) — Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

ROH M.; LEE, K. Y. **Computational ship design**. Singapore: Springer Nature, 2018.

SAMPAIO, H. **Blog FI 145: Aviação e informação**. 2011. Disponível em: <<https://fi145.wordpress.com/2011/06/29/porque-e-como-voamos/>>. Acesso em: 10 dez. 2021.

TONACIO, V. C. **Avaliação de propulsores navais em relação a eficiência e excitação de vibração**. Dissertação (Mestrado) — Curso de Engenharia Naval, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

TRINDADE, J. **Hidrodinâmica e Propulsão: engenharia de máquinas marítimas**. 1. ed. Paço de Arcos: ENIDH, 2012.

ANEXO A - COEFICIENTES DOS POLINÔMIOS INTERPOLADORES PARA OS HÉLICES KA 3-65, KA 4-55, KA 4-70, KA 5-75 DA SÉRIE KAPLAN

Van Manen e Van Manen e Suprema realizaram testes em águas abertas de forma a fornecer os coeficientes de desempenho de propulsores da Série Kaplan, expressos como polinômios de coeficiente de avanço J e razão de passo P/D, cujos coeficientes estão representados nas Figuras a seguir. .

Figura .1 – Coeficientes dos polinômios da Série Kaplan

x	y	Ka 3-65			Ka 4-55		
		Axy	Cxy	Bxy	Axy	Cxy	Bxy
0	0	+0.028100	+0.006260	+0.154000	-0.375000	-0.034700	-0.045100
0	1	-0.143910		+0.115560	-0.203050	+0.018568	
0	2		-0.017942	-0.123761	+0.830306		
0	3	-0.383783			-2.746930		-0.663741
0	4		-0.008089			-0.195582	-0.244626
0	5			-0.741240		+0.317452	
0	6			+0.646894	+0.067548	-0.093739	
1	0			-0.542674	+2.030070	+0.158951	+0.244461
1	1	-0.429709		-0.749643	-0.392301	-0.048433	-0.578464
1	2		-0.016644		-0.611743		+1.116820
1	3				+4.319840	+0.024157	+0.751953
1	4				-0.341290		
1	5					-0.123376	
1	6			-0.162202			-0.08916
2	0	+0.671268		+0.972388	-3.031670	-0.212253	
2	1						-0.146178
2	2	+0.286926		+1.468570			-0.917516
2	3				-2.007860		
2	4						
2	5						
2	6						
3	0	-0.182294	+0.040041	-0.317644	+2.836970	+0.156133	+0.068186
3	1						+0.174041
3	2			-1.084980			+0.102334
3	3				+0.391304		
3	4						
3	5						
3	6			-0.032298			
4	0				-0.994962		
4	1					+0.030740	
4	2					+0.073587	
4	3			+0.199637			
4	4						
4	5						
4	6						
5	0					-0.031826	
5	1					-0.014568	
5	2			+0.060168	+0.015742	-0.109363	
5	3						
5	4					+0.043862	
5	5						
5	6						
6	0		-0.003460		+0.043782	+0.007947	-0.008581
6	1	-0.017378	-0.000674				
6	2		+0.001721			+0.038275	
6	3						
6	4					-0.021971	
6	5						
6	6					+0.000700	
0	7					+0.022850	+0.088319

Fonte: OOSTERVELD (1970).

Figura .2 – Coeficientes dos polinômios da Série Kaplan

Ka 4-70			Ka 5-75		
Axy	Cxy	Bxy	Axy	Cxy	Bxy
+ 0.030550	+ 0.006735	+ 0.076594	+ 0.033000	+ 0.007210	- 0.000813
- 0.148687		+ 0.075223	- 0.153463		+ 0.034885
- 0.391137	- 0.016306	- 0.061881	- 0.398491	- 0.014670	- 0.276187
	- 0.007244	- 0.138094		- 0.006398	
		- 0.370620			
		+ 0.323447			
- 0.432612		- 0.271337	- 0.435515		- 0.626198
	- 0.024012	- 0.687921		- 0.031380	+ 0.450379
		+ 0.225189			
		- 0.081101			
+ 0.667657		+ 0.666028	+ 0.664045		+ 0.359718
	+ 0.005193	+ 0.734285	+ 0.283225	+ 0.010386	
- 0.172529	+ 0.046605	- 0.202467	- 0.162764	+ 0.053169	- 0.087289
		- 0.542490			
		- 0.016149			
	- 0.007366			- 0.014731	
		+ 0.099819			
		+ 0.030084			
- 0.017293	- 0.001730		- 0.017208		
	- 0.000337				
	+ 0.000861	- 0.001876			- 0.003751

Fonte: OOSTERVELD (1970).