

OTIMIZAÇÃO ROBUSTA DE PROPULSORES DA SÉRIE B-TROOST PARA COMBOIOS FLUVIAIS UTILIZANDO RESTRIÇÕES EXPERIMENTAIS

Renato Allan de Souza Oliveira, raso.eng@uea.edu.br¹

Arlindo Pires Lopes, alopes@uea.edu.br¹

Adriana Alencar Santos, drica.eng@gmail.com¹

¹Universidade do Estado do Amazonas, Av. Darcy Vargas, 1200 - Parque Dez, Manaus - AM, 69050-020

Resumo: Neste trabalho, apresenta-se a concepção e o desenvolvimento de uma aplicação computacional desenvolvida na ferramenta de interface gráfica Matlab GUI®, que auxiliará o projetista a selecionar o hélice da Série B-Troost mais eficiente para o uso em empurradores fluviais. O procedimento proposto consiste em automatizar o cálculo da resistência ao avanço através de um método específico para a estimativa de resistência de barcas e comboios, além de incorporar técnicas de otimização para selecionar o hélice cujas características resultam na maior eficiência possível, respeitando os limites de cavitação para o perfil operacional. A principal contribuição apresentada consiste na incorporação das restrições experimentais ao processo de otimização, que considera apenas a interpolação dos dados entre os hélices da Série B-Troost verdadeiramente ensaiados em tanque de prova, comparando este resultado com aquele obtido considerando apenas as restrições gerais da série. Por fim, o procedimento proposto é aplicado na solução de um caso prático, obtendo-se o hélice mais eficiente para uma embarcação fluvial.

Palavras-chave: propulsores navais, otimização, comboios fluviais

1. INTRODUÇÃO

O sistema de propulsão de uma embarcação é um dos principais fatores na determinação da capacidade operacional de embarcações fluviais. Portanto, sua escolha é de extrema importância, uma vez que a seleção de um hélice ineficiente reflete diretamente no seu desempenho, acarretando perda de eficiência do motor, maior tempo de operação e até mesmo prejuízo econômico. Em geral o dimensionamento de um hélice consiste na determinação de parâmetros geométricos, tais como: número de pás (Z), razão de área expandida (A_e/A_o), razão passo-diâmetro (P/D) e o diâmetro do propulsor. Em geral, é comum que esses parâmetros sejam escolhidos de forma pouco precisa, pois são baseados em métodos empíricos, cuja seleção em geral é fortemente influenciada pela experiência dos projetistas e construtores. Esse fato é ainda mais evidente nas embarcações fluviais que operam no norte do país. Com base nisso, visando uma melhor eficiência, desenvolveu-se um modelo de otimização robusta para seleção de propulsores da série B-Troost para comboios fluviais que operam em águas restritas, isto é, que possuem restrição de largura e profundidade da via. Esse modelo de otimização utiliza o software Matlab GUI®, o qual fará uso dos polinômios de interpolação da série B-Troost (CARLTON, 2007). Os parâmetros serão variados até que se encontre a combinação que gere uma maior eficiência, respeitando os limites de cavitação. O procedimento proposto segue o trabalho de Passos (2014) e Dantas (2015), mas, no entanto, se destina ao projeto de propulsores destinados a propelir comboios fluviais e, se diferencia dos trabalhos anteriores por considerar como hélices viáveis, apenas aqueles cujas características geométricas estão no espaço de interpolação correspondente aos hélices de fato ensaiados.

2. COMBOIOS FLUVIAIS

Com o avanço tecnológico, é natural que sejam desenvolvidos novos meios de transporte de maior eficiência, buscando uma maior vantagem econômica.

Segundo o Plano Hidroviário Estratégico do Ministério dos Transportes (2003), há uma tendência na utilização das hidroviárias para o transporte de cargas. O critério econômico é um fator de escolha, já que proporciona, dentre outros benefícios, a oferta de produtos com baixo custo operacional, possibilidade de transportar grandes volumes a grandes distâncias, alta eficiência energética e baixo impacto ambiental.

Contudo, surge um novo parâmetro para a seleção dos sistemas de transporte que pode ser considerado tão importante quanto o ponto de vista econômico, que é a questão ambiental. Com base nisso, o modal aquaviário ganha um novo enfoque em virtude de ser considerado de baixo custo e ambientalmente viável. De acordo com Maia (2015), o

modelo de transporte aquaviário, geralmente, é um elemento crítico para o desenvolvimento econômico de vários países devido à sua grande importância no transporte de cargas e passageiros. Para o transporte de cargas, mais precisamente, este modal é extremamente necessário por ser o mais ecologicamente sustentável, suportando altas quantidades de carga.

Para a navegação fluvial, do ponto de vista de Padovezi (2003), diferentemente dos oceanos, é comum que em grande parte dos rios, seja difícil a implementação de hidrovias, uma vez que oferecem condições de navegabilidade muito oscilantes durante o ano. Combinados com as condições naturais, em geral os rios possuem restrições de profundidade e de largura, limitando os tipos de embarcações que podem operar nestas condições.

Nas hidrovias brasileiras, por exemplo, o transporte é realizado, usualmente, por meio de comboios fluviais formados por empurradores e chatas. Segundo descrito por Padovezi (2003), os comboios apresentam baixo calado, em virtude das restrições de profundidades da maior parte das hidrovias e grandes deslocamentos de carga tendo em vista a eficiência econômica de modo a compensar as baixas velocidades de navegação.

Em meio às restrições regionais, portanto, é evidente que são específicos os modelos de embarcações que podem operar nestas condições. Como consequência, para que se possam obter melhores eficiências na navegação, faz-se necessário variar outros fatores como, por exemplo, o propulsor, foco deste trabalho.

3. PROPULSOR

Para a implementação das características do propulsor, no processo de otimização, utilizou-se o polinômio interpolador da série sistemática B-Troost (CARLTON, 2007) com as devidas correções, como explicado a seguir.

3.1. Séries Sistemáticas

A seleção de um hélice é uma etapa comum a todo projeto preliminar de embarcação e, embora o hélice seja único para cada projeto, as fases de dimensionamento são, em sua essência, similares. Dito isto, pode-se introduzir o conceito de séries sistemáticas, como um conjunto de resultados obtidos em ensaios para várias combinações de parâmetros geométricos; reunidos em um conjunto de gráficos adimensionais de forma a facilitar o procedimento de seleção.

3.2. Série B

A série B-Troost, também conhecida como série Wageningen, é umas das séries sistemáticas mais utilizadas, citada em diversas referências e que abrange um grande intervalo de aplicação (BRINATI, 2010).

Durante os ensaios feitos por Troost, foram considerados apenas alguns parâmetros para os hélices. Portanto, essas serão algumas das restrições impostas para a otimização da seleção do propulsor evitando, assim, a extrapolação de valores. A faixa de aplicação da série é mostrada a seguir:

Tabela 1. Restrições do ensaio da Série B-Troost.

<i>Parâmetro</i>	<i>Sigla</i>	<i>Valor mínimo</i>	<i>Valor máximo</i>
<i>Número de pás</i>	<i>Z</i>	2	7
<i>Razão Passo/Diâmetro</i>	<i>P/D</i>	0,5	1,4
<i>Razão de Área Expandida</i>	<i>A_e/A₀</i>	0,3	1,05

De acordo com Lewis (1988), a nomenclatura da série é dada em função do número de pás e razão de área expandida. Por exemplo, em um hélice do tipo B-5.60, a letra que aparece no início indica a série utilizada, o número seguinte (5) indica o número de pás e 0.60 representa a razão de área expandida.

4.3 Polinômio de interpolação da série B

Visando auxiliar no projeto preliminar, foram desenvolvidas, através de estudos de regressão da série B, expressões para o coeficiente de empuxo (K_T) e coeficiente de torque (K_Q). Em outras palavras, foram desenvolvidas equações que são capazes de descrever as curvas de K_T e K_Q para um determinado número de pás, razão passo-diâmetro e razão de área expandida.

De acordo com Molland et al. (2011), as equações básicas dos polinômios de interpolação para um número de Reynolds (R_n) de 2×10^6 , as expressões para K_T e K_Q são dadas como função dos parâmetros geométricos A_s/A_o , P/D, Z, do coeficiente de avanço (J) e de vários coeficientes C_n , os quais dependem de combinações do conjunto de expoentes dos parâmetros (s, t, u e v).

Contudo, segundo Carlton (2007), para números de Reynolds entre 2×10^6 e 2×10^9 , as equações da regressão necessitam de uma correção para seus valores e, assim, as expressões dos coeficientes de empuxo e torque são acrescidas de um valor para corrigi-los, como mostrado a seguir:

$$\begin{pmatrix} K_T \\ K_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_T(R_n = 2 \times 10^6) \\ K_Q(R_n = 2 \times 10^6) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta K_T(R_n) \\ \Delta K_Q(R_n) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Onde as expressões para ΔK_T e ΔK_Q representam as correções para o coeficiente de empuxo e coeficiente de torque, respectivamente. Seus valores são determinados a partir de expressões que são funções também dos parâmetros A_s/A_o , P/D, Z, coeficiente de avanço (J) e do número de Reynolds (R_n).

Esses polinômios, e suas respectivas correções, foram implementados no software Matlab GUI®, para que se possa desenvolver uma ferramenta capaz de selecionar um modelo de hélice otimizado.

4.4 Interação casco-hélice

A seleção das características do propulsor usando séries sistemáticas utiliza os chamados diagramas em águas livre, geralmente obtidos experimentalmente.

Uma vez estabelecido o valor do diâmetro e definidos os valores para os parâmetros de projeto (P/D, Z e A_s/A_o), diz-se que o hélice está especificado. As diferentes combinações destes parâmetros fornecem várias opções de hélices. Portanto, seleciona-se aquele que gera o empuxo necessário, operando dentro dos limites aceitáveis de cavitação e com maior eficiência possível (BRINATI, 2010).

Uma vez que as curvas do diagrama de águas abertas são adimensionais, com o intuito de garantir que o propulsor seja capaz de produzir a força necessária para vencer a resistência ao avanço, deve-se calcular a curva de resistência do casco, adimensionalizada, para o qual o hélice está sendo projetado e encontrar o propulsor que forneça o melhor ponto de operação para a embarcação em estudo. O ponto de operação J é obtido por meio do cruzamento da curva de empuxo do propulsor ($K_{t_{hélice}}$) com a curva de resistência do casco ($K_{t_{casco}}$) (MONTEIRO, DANTAS, 2014).

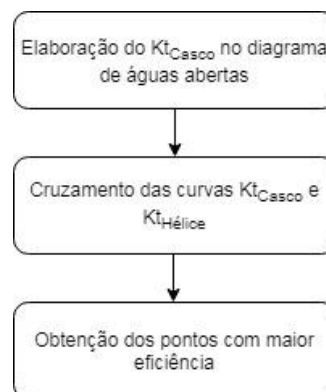


Figura 2 – Fluxograma da interação casco-hélice.

A figura a seguir ilustra o cruzamento da curva do $K_{t_{casco}}$, em verde, com a curva do $K_{t_{hélice}}$ do diagrama de águas livres a fim de obter os pontos com maior eficiência para diferentes valores de P/D.

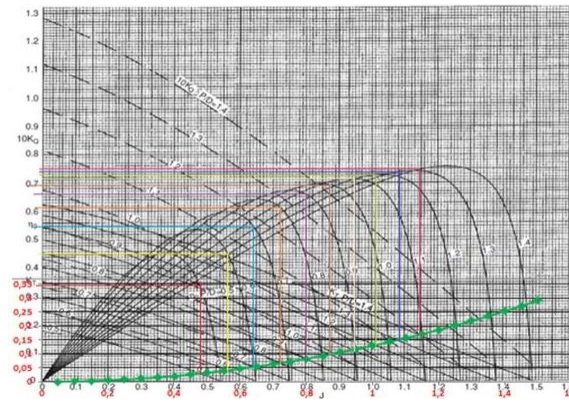


Figura 3 – Procedimento de seleção do hélice Mendes (2015)

4. METODOLOGIA

Neste trabalho, propõe-se um modelo de otimização robusta para propulsores da série B-Troost através do módulo para desenvolvimento de interfaces gráficas Matlab GUI®, no qual se utilizam os polinômios da Série B e se variam os parâmetros do propulsor.

Para alcançar essa proposta, o trabalho foi dividido em 3 etapas:

1. Inserção das informações do comboio e da via.
2. Inserção dos dados do propulsor e seleção do nível de cavitação.
3. Geração dos resultados usando técnicas de otimização

Na Figura 4, observa-se o fluxograma do sistema, já implementado no software Matlab®, sendo desenvolvido com o módulo de interfaces gráficas Matlab GUI®.

Na primeira etapa, são definidos os parâmetros necessários ao cálculo da resistência ao avanço, usando o método de Howe. Para isso, primeiramente o usuário deverá inserir os dados do comboio, que podem ser baseados no padrão de balsa Mississippi, no qual as dimensões individuais das chatas (calado, comprimento e boca) são padronizadas ou podem ser personalizados, isto é, o usuário informará as dimensões.

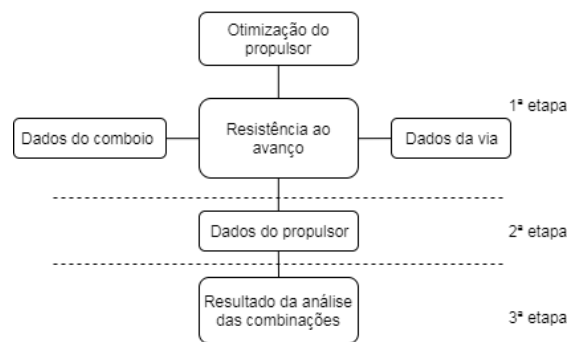


Figura 4 - Fluxograma do processo de otimização proposto.

A seguir, deverá ser informada a configuração das chatas, isto é, como estas estarão integradas, pois, para cada configuração, há um valor diferente para o fator de integrabilidade. Ainda nesta etapa, deverá ser informada a quantidade de balsas do comboio no sentido longitudinal e transversal assim como também o deslocamento volumétrico por balsa. Na etapa seguinte são definidas as características da via, tais como profundidade e largura médias da via em que o comboio operará. Por fim, define-se a velocidade de serviço do comboio. Para este último item, o usuário terá a opção de inserir um valor único ou um intervalo de velocidades. Desta forma, para cada velocidade do intervalo, será informado um valor correspondente para a resistência.

Um exemplo da inserção de dados referentes ao cálculo de resistência ao avanço é mostrado na Figura 5.

Para cada dado informado, o usuário possui a opção de escolher a unidade correspondente ao valor informado, porém os valores são convertidos para as unidades compatíveis com a formulação proposta por Howe.

Na segunda etapa, após inserir os dados do comboio, o programa irá atualizar os dados e computar os valores das resistências para cada velocidade informada. A seguir inicia-se o processo de integração casco-hélice, no qual devem ser informadas a densidade da água e as informações do propulsor, como número de hélices, profundidade do centro propulsor (em relação à linha d'água) e diâmetro do hélice. É importante observar que, embora o procedimento proposto considere o diâmetro do propulsor um parâmetro fixo do projeto, é possível realizar diferentes procedimentos

de otimização considerando diferentes valores de diâmetro, e assim verificar a variação da eficiência e das características do hélice ótimo, em função do diâmetro definido para o projeto.

Para facilitar essa análise de robustez, o usuário poderá optar por inserir um único valor para o diâmetro ou um intervalo de valores, bem como considerar diferentes velocidades de serviço.

Figura 5 – Aba de resistência ao avanço.

A partir dos dados até então inseridos, é necessário estimar o valor do coeficiente de esteira (w) e do coeficiente de redução da força propulsora (t). De acordo com Latorre, Luthra e Tang (1982), a fórmula empírica modificada de E.E. Pappel para determinar o coeficiente de esteira para embarcações fluviais é dada pela seguinte expressão:

$$w = 0.11 + \frac{0.16}{Nh} C_b^{Nh} \sqrt{\frac{\nabla}{D}} - \Delta w \quad (4)$$

Onde:

Nh - Número de hélices;

C_b – Coeficiente de bloco;

∇ - Deslocamento volumétrico;

D - Diâmetro do hélice;

Δw - Correção do coeficiente de esteira para embarcações com número de Froude maior que 0.2.

Para o coeficiente de redução da força propulsora, ainda segundo Latorre, Luthra e Tang (1982), Taylor recomenda que, para embarcações mono-hélice e bi-hélice, respectivamente, estes sejam calculados pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned} t &= 0.6w(1 + 0.67w) \\ t &= 0.8w(1 + 0.25w) \end{aligned} \quad (5)$$

Por fim, deverá ser informada a porcentagem de cavitação aceitável para o propulsor, sendo este valor utilizado como uma das restrições presentes no modelo de otimização.

Para analisar a cavitação, foram implementadas as equações das regressões das curvas do diagrama de Burril obtidas por Mendes (2015) e, desta forma, o algoritmo pode analisar e eliminar os propulsores que não se encaixam no limite de cavitação informado pelo usuário.

Outra restrição que deverá ser informada é em relação ao espaço amostral disponível, isto é, poderão ser utilizados somente os valores de A_s/A_o e Z ensaiados por Troost (Interpolação), como mostra a Figura 6, ou os valores extrapolados, no qual, devido a aproximações feitas, há mais opções de valores para estes parâmetros, porém que não foram ensaiados experimentalmente.

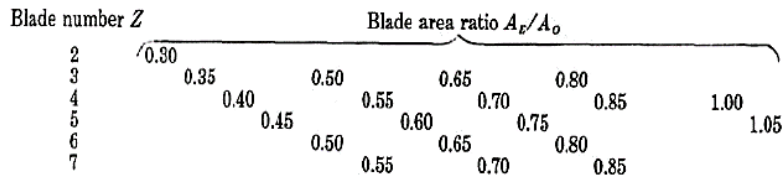


Figura 6 – Número de pás e razão de área considerada nos ensaios da Série B Lewis (1988).

Na interpolação, considerou-se o mesmo intervalo discutido na fundamentação teórica para a razão P/D com incremento de duas casas decimais para cada valor testado, assim como na extrapolação A_e/A_o e P/D tiveram o mesmo incremento.

Para utilizar os valores da interpolação, criou-se uma nuvem de pontos para as razões de área expandida correspondente a cada número de pás, correspondendo aos hélices verdadeiramente ensaiados no tanque de provas durante a construção da série B-Troost (Figura 7). Assim, através de uma interpolação polinomial para os pontos do limite superior e outra para os pontos do limite inferior, para cada número de pás correspondente, foi possível limitar os intervalos de acordo com o número de pás, evitando extrapolações para fora da região verdadeiramente ensaiada, para qual tem-se certeza da validade dos polinômios tradicionalmente utilizados.

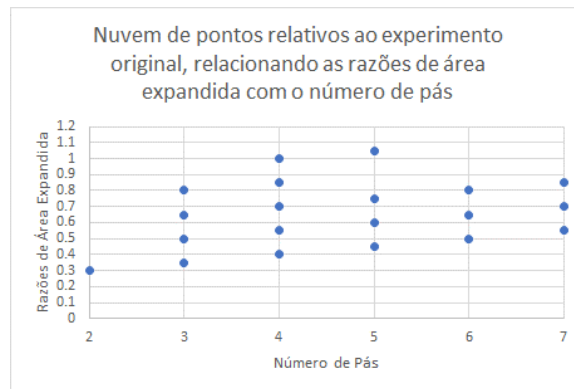


Figura 7 – Número de pás x razões de área do experimento original.

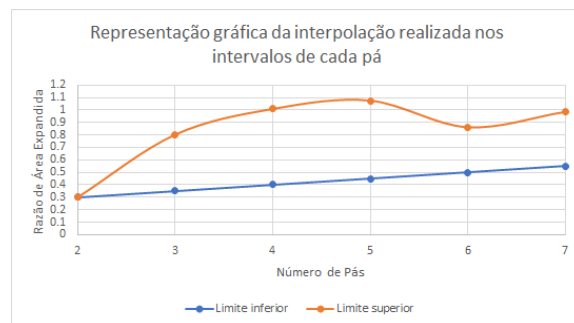


Figura 8 – Interpolação dos intervalos de razões de área testados no experimento original.

Como uma forma de reduzir o tempo e a quantidade de iterações realizadas, o usuário poderá, opcionalmente, restringir o intervalo que será testado para um ou mais dos seguintes parâmetros: Z , P/D , rotação (RPM) e A_e/A_o .

Na Figura 9 são mostrados os passos realizados na segunda etapa do procedimento de seleção otimizada do propulsor para embarcações fluviais.

	Velocidades (m/s)	Resistências (N)	Z	P/D	J	Ae/A0	Diâmetro ótimo (m)	RPM	Eficiência
1	2.10	42840.29	6	0.6300	0.2420	0.9200	1.8000	215	0.3862

Figura 9 – Aba principal para os dados do propulsor, com dados do estudo de caso realizado.

Por fim, na terceira etapa, será realizado o procedimento de otimização que visa determinar o hélice mais eficiente dentro dos parâmetros estabelecidos para o problema. Em se tratando de um problema mono-objetivo com funções contínuas e bem comportadas, utilizou-se o método da seção áurea, reconhecidamente eficiente e eficaz neste tipo de problema. Após realizar todas as combinações e comparações, a fim de selecionar a configuração que possui a melhor eficiência, dentro dos limites impostos, a tabela do programa será atualizada e serão informados os valores dos parâmetros J , A_e/A_0 , Z e P/D otimizados e a correspondente rotação (em rpm) associados ao hélice de maior eficiência. Para o caso da inserção de múltiplos diâmetros, cada um deles será considerado nos cálculos separadamente e, ao término das combinações, o programa informará o valor do diâmetro ótimo, ou seja, aquele que proporciona uma maior eficiência.

5. ESTUDO DE CASO

A fim de validar o funcionamento do algoritmo, decidiu-se realizar um estudo acerca de um comboio fluvial padrão da Hidrovia Tietê. Para este estudo, serão calculados os valores de resistência e, após isso, será feita uma comparação entre os valores obtidos no modelo de otimização tradicional (chamado aqui de extrapolação) e no modelo de otimização considerando as restrições experimentais (chamado aqui de interpolação); e por fim esses resultados serão comparados ao tradicional processo manual de seleção do propulsor utilizando os gráficos da série B-Troost.

O comboio utilizado neste estudo é composto por balsas PT60 (Padrão Tietê com 60 m de comprimento) e que opera com uma velocidade média de 2,1 m/s com as seguintes características:

-Comprimento por balsa: 60 m; Boca por balsa: 11 m; Calado de projeto da balsa: 2,70 m; Coeficiente de bloco: 0,80; Fator de integrabilidade: 0,05 (comboio não integrado); Volume deslocado por balsa: 1423 m^3 ; Número de hélices: 2; Diâmetro do hélice: 1,8 m; Quantidade de balsas transversais: 1; Quantidade de balsas longitudinais: 2.

A hidrovia utilizada para o estudo foi a Tietê-Paraná, com as seguintes características:

-Profundidade média: 3,1 m; Largura média: 300 m; Densidade: $998,1 \text{ Kg/m}^3$.

Primeiramente, inseriu-se os dados do comboio na aba de resistência. Assim, obteve-se o valor de 42840,29 N para a resistência do comboio a 2,1 m/s.

Seguindo para a aba principal, foram informados os dados do propulsor. Para a distância entre o centro do hélice e a superfície, foi considerado, para fins de teste, a metade do valor do calado das balsas, ou seja, 1,3 m.

A porcentagem máxima de cavitação foi adotada como sendo 2,5%, uma vez que este é um valor tipicamente aceitável para este tipo de embarcação.

Em relação ao espaço amostral utilizado, foram calculados, para as mesmas condições, a otimização do propulsor para o método da extrapolação e interpolação, a fim de comparar os valores obtidos, assim como também pelo método manual.

6. RESULTADOS

Após realizar a otimização para os casos mencionados anteriormente, foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 2 – Resultados obtidos pelo método da extrapolação.

Velocidade (m/s) =	2,1
Resistência (N) =	42840,29
Número de pás (Z) =	6
Passo/diâmetro (P/D) =	0,63
Coeficiente de avanço (J)=	0,242
Razão de área (A_e/A_o)=	0,92
Diâmetro ótimo (D) =	1,8
Rotação (RPM) =	215
Eficiência =	0,3862

Tabela 3 – Resultados obtidos pelo método da interpolação.

Velocidade (m/s) =	2,1
Resistência (N) =	42840,29
Número de pás (Z) =	5
Passo/diâmetro (P/D) =	0,64
Coeficiente de avanço (J)=	0,2405
Razão de área (A_e/A_o)=	0,92
Diâmetro ótimo (D) =	1,8
Rotação (RPM) =	217
Eficiência =	0,3826

Tabela 4 – Resultados obtidos pelo método manual de análise de gráfico da série.

Velocidade (m/s) =	2,1
Resistência (N) =	42840,29
Número de pás (Z) =	5
Passo/diâmetro (P/D) =	0,8
Coeficiente de avanço (J)=	0,2803
Razão de área (A_e/A_o)=	0,95
Diâmetro ótimo (D) =	1,8
Rotação (RPM) =	186
Eficiência =	0,3362

Nota-se que o valor da eficiência para o método da extrapolação é um pouco maior que o valor da eficiência pelo método da interpolação. Isso deve-se ao fato de o espaço amostral da extrapolação ser maior e, assim, há mais chances de obter uma combinação que gere uma maior eficiência, ainda que não se tenha certeza da veracidade do polinômio interpolador da série B nestas regiões não ensaiadas.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho foi motivado por fatores básicos e de grande importância para o correto dimensionamento de um hélice naval com foco em comboios fluviais. A pouca disponibilidade de bibliografia voltada para embarcações fluviais acarreta, muitas vezes, resultados poucos precisos e de baixa eficiência. O modelo proposto mostrou-se eficiente tanto para o cálculo da resistência ao avanço, quanto para a escolha dos parâmetros P/D, Z e A_e/A_o referentes ao hélice de maior eficiência. Os métodos de interpolação e extrapolação implementados mostraram-se satisfatórios e condizentes quando comparados ao método manual de projeto. Como esperado, o método manual necessita da utilização de gráficos e, assim, há muitos fatores que podem contribuir para o aumento do erro nos resultados. Além do mais, os gráficos normalmente utilizados não apresentam todas as variações de A_e/A_o disponíveis na extrapolação e, consequentemente, deixam de serem testadas outras combinações que poderiam gerar uma eficiência maior. Outro ponto positivo é a redução do tempo gasto para o projeto usando o procedimento de otimização proposto. O programa também oferece a opção do método múltiplo de inserção para a velocidade e diâmetro, permitindo verificar a robustez da solução no caso da incerteza desses parâmetros. Portanto, a ferramenta mostrou-se eficiente e de grande importância para o dimensionamento de propulsores para embarcações fluviais, atingindo valores ótimos levemente acima dos valores encontrados em empurraadores presentes na região, motivando estudos mais aprofundados que podem aumentar

a eficiência energética no transporte de carga, em especial na região norte do Brasil. Por fim, a diferença entre os projetos considerando as restrições experimentais motivam novos ensaios visando verificar a adequação da extrapolação do polinômio nas áreas onde a série B-Troost originalmente não apresenta resultados experimentais.

8. REFERÊNCIAS

AUGUSTO, O. *Processo de busca não linear para o projeto da estrutura do navio*. 32 f. 1996. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1996.

BRINATI, H. L. PNV 2324 *Instalações De Máquinas Marítimas*. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.

BURRIL, L.C. Calculation of Marine Propeller Performance Characteristics. Trans NECIES, volume 60, 1943

CHRISTOPULOS, B.; LATORRE, R. *River towboat hull and propulsion*. Marine Technology, NAME, vol.20, No. 3, July, pp. 209-226, 1983.

DANTAS, J. L. D.; WEISS, J. M. G. *Revisão da metodologia de dimensionamento de hélices para embarcações fluviais*. 9º Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior. Sobena. 2015.

GARCIA, H. A. Análise dos procedimentos de projeto e desenvolvimento de método para determinação de custos de construção e operação de embarcações fluviais da Hidrovia Tietê-Paraná. Tese apresentada ao Departamento de Engenharia Naval da EPUSP, para obtenção do título de Doutor. São Paulo: DEN/EPUSP, 2001.

MENDES, E.R. *Procedimento para seleção otimizada de um propulsor da série B*. Trabalho de conclusão de curso (graduação). Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville, Joinville, SC, 2015.

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

MONTEIRO, G.; DANTAS, J. Investigação de metodologia para o dimensionamento e validação de hélices. 25º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. Rio de Janeiro. 2014. 9 p.

PADOVEZI, C. D. *Conceito de embarcações adaptadas à via aplicado à navegação fluvial no Brasil*. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2003.

PASSOS, R. B.; FERNANDES, A. C. *Ship Propeller Selection in the Preliminary Design Through a Computational Tool*. 25th National Congress on Maritime Transportation, Ship and Offshore Construction Rio de Janeiro, Brazil. 10th at 12th November 2014.

Plano Hidroviário Estratégico do Ministério dos Transporte (PHE/MT, 2013). Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br>>. Acesso em: 30 maio. 2017.

SKUPIEN, E.; PROKOPOWICZ, J. *Methods of calculating ship resistance on limited waterways*. Polish Maritime Research, v. 21, n. 4, p. 12-17, 2014.

TRINDADE, J. Hidrodinâmica e Propulsão, Engenharia de máquinas marítimas. ENIDH – Escola Superior de Náutica Infante D. Henrique, 2012.

ROBUST OPTIMIZATION OF B-TROOST SERIES PROPELLERS FOR FLUVIAL TRAINS USING EXPERIMENTAL RESTRICTIONS

Renato Allan de Souza Oliveira, raso.eng@uea.edu.br¹

Arlindo Pires Lopes, alopes@uea.edu.br¹

Adriana Alencar Santos, drica.eng@gmail.com¹

¹Universidade do Estado do Amazonas, Av. Darcy Vargas, 1200 - Parque Dez, Manaus - AM, 69050-020

Resumo: *This paper presents the design and development of a computational application developed in Matlab graphical user interface GUI tool ®, which will help the designer to select the B-Series propeller Troost more efficient for use in craft inland. The procedure proposed is to automate the calculation of resistance to progress through a specific method for the estimation of strength of barges and trains, while incorporating optimization techniques to select the characteristics of propeller result in greater efficiency possible, within the limits of cavitation for the operating profile. The main contribution presented consists of the incorporation of experimental constraints optimization process, which considers only the interpolation of the data between the B-series propellers Troost truly tested in test tank, comparing This result with that retrieved from considering only the General restrictions of the series.*

Keywords: *boat propellers, optimization, river barges.*