

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ELETRIFICAÇÃO DO TRANSPORTE AQUAVIÁRIO NA AMAZÔNIA: OTIMIZAÇÃO DE EMBARCAÇÃO COM USO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

AUTORES:

Kaylane de Sousa Silva, Matheus Leão Campos, Antonio Roniel Marques de Sousa, Elen Priscila De Souza Lobato, Iris Caroline dos Santos Rodrigues, Marcos Aurélio Melo Junior, Wellington da Silva Fonseca

INSTITUIÇÃO:

Instituto de Tecnologia (ITEC), Universidade Federal do Pará (UFPA), Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON)

ELETRIFICAÇÃO DO TRANSPORTE AQUAVIÁRIO NA AMAZÔNIA: OTIMIZAÇÃO DE EMBARCAÇÃO COM USO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Resumo

A introdução de motores elétricos em embarcações fluviais representa uma alternativa altamente eficaz, em relação aos motores tradicionais movidos a combustão, considerando que os motores elétricos proporcionam maior eficiência às embarcações. Dessa forma, no contexto da transição energética, a eletrificação de modais aquaviários é uma das estratégias para redução dos impactos ambientais do transporte fluvial na região amazônica, oferecendo uma forma mais sustentável e limpa de propulsão. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta uma proposta para o desenvolvimento de uma embarcação elétrica, utilizando simulações computacionais, a partir de uma abordagem integrada que consiste na otimização do casco e do sistema de propulsão de uma embarcação. Para se alcançar tal objetivo, foi realizada a modelagem do casco através dos softwares *Rhinoceros 3D* e *Maxsurf Modeler*, enquanto para a simulação da resistência ao avanço foi utilizado o *Maxsurf Resistance*. Utilizou-se, ainda, o software *Motor-CAD*, para a modelagem do motor elétrico do tipo *Brushless Direct Current* (BLDC), por meio do Método de Elementos Finitos e definição dos parâmetros do motor da embarcação. As simulações demonstraram que a análise da resistência ao avanço é fundamental para o aumento da eficiência hidrodinâmica e impactam diretamente no dimensionamento do motor. Contribuindo, assim, para a maior eficiência energética da embarcação e redução do consumo de energia durante a navegação. Desse modo, o uso de simulação computacional se mostra uma ferramenta indispensável dentro desse contexto, pois permite a análise e interações de variáveis complexas, em um ambiente controlado.

Palavras-chave: Motores elétricos, Eficiência energética, Sustentabilidade, Simulação computacional.

Abstract

The introduction of electric motors in river vessels represents a highly effective alternative to traditional combustion engines, considering that electric motors make vessels more efficient. Thus, in the context of the energy transition, the electrification of waterways is one of the strategies to reduce the environmental impacts of river transport in the Amazon region, offering a more sustainable and clean form of propulsion. In this sense, this work presents a proposal for the development of an electric vessel, using computer simulations, from an integrated approach that consists of optimizing the hull and propulsion system of a vessel. To achieve this objective, the hull was modeled using the *Rhinoceros 3D* and *Maxsurf Modeler* software, while *Maxsurf Resistance* was used to simulate the forward resistance. The *Motor-CAD* software was also used to model the *Brushless Direct Current* (BLDC) electric motor, using the Finite Element Method and to define the configurations of the boarding motor. The simulations revealed that the analysis of the resistance to advance is essential for increasing hydrodynamic efficiency and has a direct impact on engine sizing. This contributes to greater energy efficiency during boarding and reduced energy consumption during navigation. Thus, the use of computer simulation proves to be a necessary tool in this context, as it allows the analysis and interactions of complex variables in a controlled environment.

Keywords: Electric motors, Energy efficiency, Sustainability, Computational simulation.

Introdução

O transporte fluvial na Amazônia é crucial para o desenvolvimento socioeconômico e conectividade regional. Através desse modal é possível explorar uma vasta rede de rios navegáveis, além de ser um dos principais meios de comunicação, e exercer uma grande importância para o sustento de famílias

ribeirinhas que vivem da pesca e do transporte de mercadorias diversas (Morales et al., 2022). Dentro desse contexto, o transporte hidroviário torna-se crucial para a integração e o desenvolvimento socioeconômico da região amazônica. Contudo, atualmente, a maioria das embarcações utilizam motores à combustão, que são fontes significativas de poluição atmosférica e fluvial, acarretando impactos negativos para a saúde da população e à biodiversidade da região (Oliveira; Henkes, 2023).

Diante desse cenário, a introdução de motores elétricos em embarcações fluviais representa uma alternativa altamente eficaz aos motores tradicionais movidos a combustão, considerando que os motores elétricos proporcionam maior eficiência às embarcações. Logo, em um cenário de transição energética, a eletrificação de modais aquaviários representa uma estratégia para redução de impactos ambientais do transporte fluvial na região amazônica, oferecendo uma forma mais sustentável e limpa de propulsão (Sugahara et al., 2022).

Ademais, a busca por melhorias na qualidade dos produtos e serviços vem aumentando, porém os recursos financeiros e a matéria-prima vêm se tornando escassos. Nesse sentido, as simulações computacionais apresentam-se como uma ferramenta potencial para a otimização e previsão de processos e procedimentos, sem que haja riscos físicos e reduzindo custos de produção, uma vez que o processo é modelado através de um software (Gabriel et al., 2018).

Desta forma, este artigo apresenta uma proposta para o desenvolvimento de uma embarcação elétrica, utilizando simulações computacionais, a partir de uma abordagem integrada que consiste na otimização do casco e do sistema de propulsão de uma embarcação. A vista disso, para a modelagem do casco foram utilizados os softwares *Rhinoceros* e *Maxsurf Modeler*, enquanto para a simulação da resistência ao avanço, foi utilizado o software *Maxsurf Resistance*. Foram adotados os métodos de *Savitsky*, abrangendo os estágios de pré planeio e planeio, os quais proporcionaram uma análise abrangente do arrasto hidrodinâmico em diferentes regimes de velocidade. Diante do exposto, a modelagem do motor elétrico do tipo *Brushless Direct Current* (BLDC), foi realizada pelo software *Motor-CAD*, por meio do Método de Elementos Finitos e definido os parâmetros do motor da embarcação como potência e torque, aspectos essenciais para uma navegação estável e eficiente (Hanselman, 2003).

Os resultados demonstram que a análise das forças hidrodinâmicas de arrasto, são vitais para a projeção e otimização do casco, e impactam diretamente no dimensionamento do motor, contribuindo para a maior eficiência energética da embarcação. As simulações demonstraram que a análise da resistência ao avanço é fundamental para o aumento da eficiência hidrodinâmica e, consequentemente, redução do consumo de energia durante a navegação.

Desse modo, o uso de simulação computacional se mostra uma ferramenta indispensável pois permite a análise e interações de variáveis complexas em um ambiente controlado. Nessa perspectiva, ao integrar a otimização do casco e a eletrificação das embarcações, o presente trabalho oferece uma abordagem abrangente e prática para tornar mais eficiente o transporte fluvial na região amazônica. Essas medidas não apenas contribuem para a preservação do meio ambiente, mas também para promover o desenvolvimento socioeconômico equilibrado e sustentável da região, beneficiando as comunidades ribeirinhas e a biodiversidade amazônica.

O restante do trabalho está estruturado da seguinte forma: será apresentada a metodologia utilizada no trabalho, os resultados obtidos e por fim a conclusão.

Metodologia

A criação do modelo da embarcação utilizado nas simulações foi realizada a partir da coleta de dados especificados na Tabela 1, de um modelo de embarcação tradicional da região amazônica, localizada no Campus Universitário do Guamá da Universidade Federal do Pará (UFPA), na cidade Belém, conforme apresentado na Figura 1 (a).

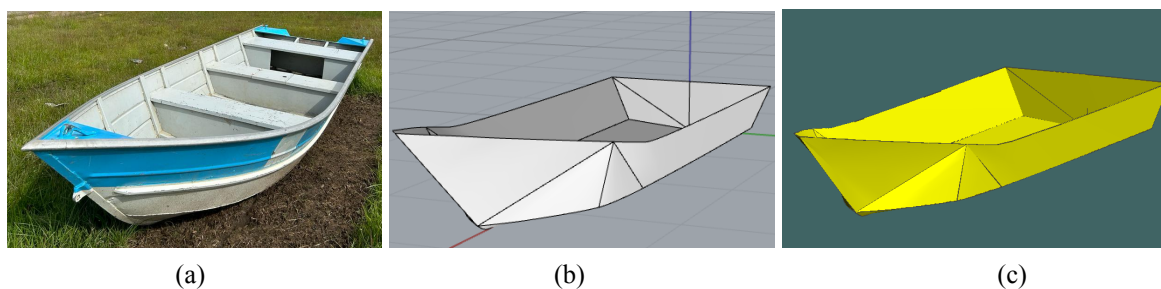
Tabela 1. Dimensões da Embarcação

Dimensão	Medida
Comprimento	4,5 m
Largura	1,36 m
Altura	0,4 m

Fonte: Autores (2024)

Em seguida, foi realizada a modelagem 3D do casco no software *Rhynoceros*, ilustrado na Figura 1 (b) e posteriormente foi feita a exportação do arquivo para o software *Maxsurf Modeler*, (Figura 1 (c)), a fim de determinar as características hidrostáticas da embarcação apresentada para então fazer a importação no *Maxsurf Resistance*.

Figura 1. a) Casco da Embarcação real: b) Casco no *Rhynoceros* b) Casco no *Maxsurf Modeler*.



Fonte: Autores (2024)

O software *Maxsurf Resistance* é um recurso que pode ser utilizado para prever o padrão de ondas de uma embarcação. Além disso, ele fornece a curva de resistência ao avanço de um casco de navio em várias velocidades. Dentre as constantes existentes, duas se destacam: o número de Reynolds e o número de Froude, definidos pelas Eq. (1) e Eq. (2), respectivamente. De acordo com Iervolino (2015), o número de Reynolds pode ser associado à resistência friccional, enquanto o número de Froude pode ser associado à resistência de ondas da embarcação, pois o comprimento das ondas varia com a velocidade do navio.

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

$$Rn = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (2)$$

Onde: Fn é o número de Froude, Rn é o número de Reynolds, V é a velocidade de avanço do casco em [m/s], g é a aceleração da gravidade em [m/s²], L é o Comprimento da Embarcação [m], ρ é densidade da água (kg/m³), μ é a viscosidade e ν é a viscosidade cinemática.

Além disso, segundo Simos (2007), determinar a resistência é uma tarefa complexa. Pois este fenômeno depende de fatores e efeitos hidrodinâmicos, como a viscosidade do fluido, o atrito da água

com o casco, a formação de ondas e efeitos ondulatórios na superfície livre do barco, nesse sentido, é possível calcular a resistência total de uma embarcação a partir da Eq. (3).

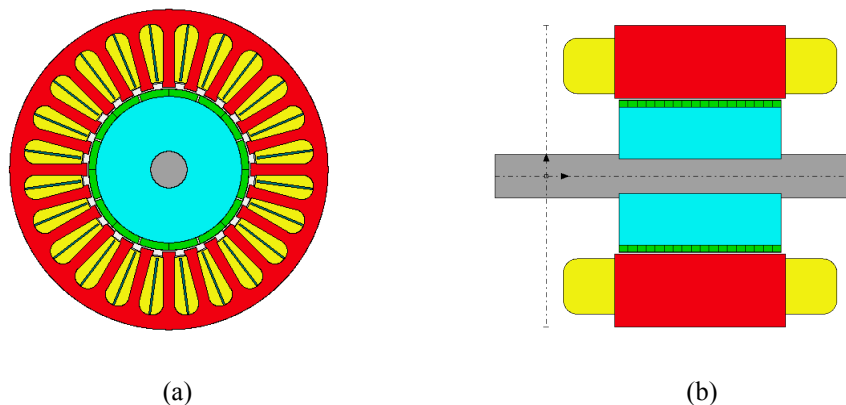
$$R_T = C_T \frac{\rho V^2}{2} S \quad (3)$$

Onde: R_T é a resistência total, S é a área de superfície molhada total (m^2), C_T é o coeficiente de resistência total, ρ é a densidade da água (kg/m^3) e V é a velocidade da embarcação (m/s).

Foi utilizado um calado de 0,1m, a fim de realizar a simulação da resistência ao avanço do casco. Ademais, foram aplicados os métodos de *Savitsky* pré-planeio e *Savitsky* planeio, os quais permitiram uma análise abrangente do arrasto hidrodinâmico, em diferentes regimes de velocidade, contribuindo para a compreensão do desempenho da embarcação em condições diversas.

Para atender às especificações requeridas de navegação, adotou-se a proposta de implementar ao sistema de navegação um motor sem escovas BLDC, a fim de deixar a navegação totalmente elétrica. O motor sem escovas possui baixo ruído e um elevado torque para que a navegação ocorra de maneira adequada. Para o projeto de embarcação, foi adotado um motor com uma potência de 3,4 kW e eficiência de 95%. O esquema geométrico da máquina adotada está exposto na Figura 2:

Figura 2. a) Seção Transversal do Motor b) Seção Axial do Motor.



Fonte: Autores (2024)

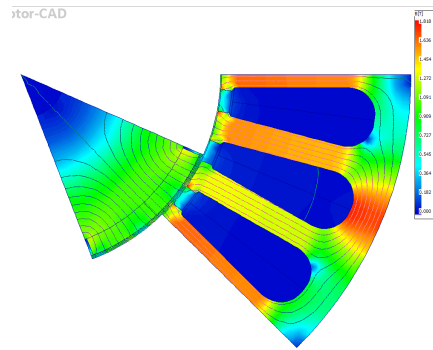
As principais dimensões geométricas do motor estão mostradas na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2. Principais Parâmetros Geométricos do motor

Comprimento do motor (L)	180 mm
Diâmetro do Estator (DS)	175 mm
Diâmetro do Rotor (DR)	90 mm
Número de Pólos Magnéticos (P)	8
Diâmetro do Eixo (DE)	20 mm

Fonte: Autores (2024)

O software de simulação de motores utiliza os fundamentos do Método de Elementos Finitos para gerar os resultados eletromagnéticos. O software gerou as linhas de campo, conforme mostra a Figura 3. Os pontos em vermelho indicam uma grande concentração das linhas de campo magnético, enquanto que as regiões em azul indicam uma baixa concentração de linhas da densidade de fluxo magnético.

Figura 3. Distribuição da densidade de fluxo magnético.

Fonte: Autores (2024)

Para a geração das linhas de fluxo magnético, o software resolve as equações de Maxwell em cada elemento finito da malha, obtendo os valores da densidade de fluxo magnético em cada ponto.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4)$$

Resultados e Discussão

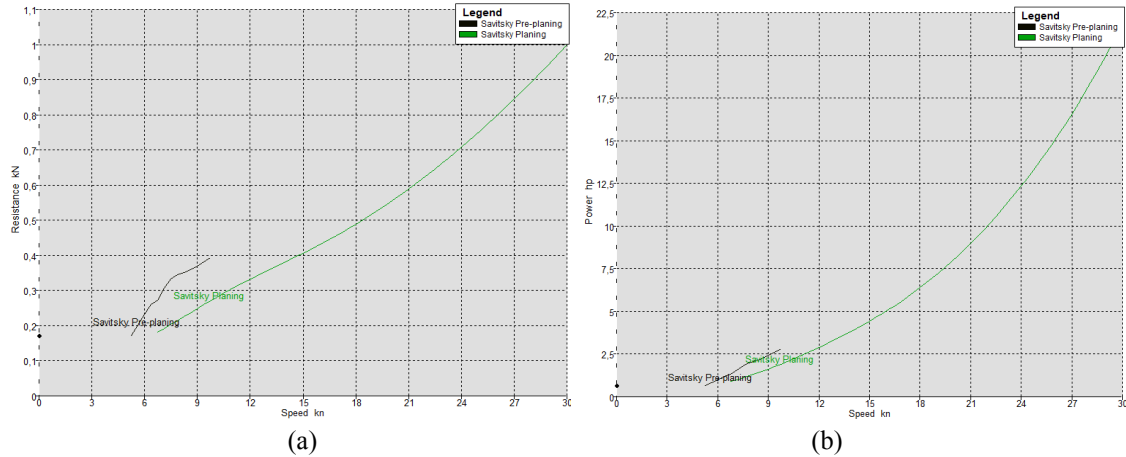
Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nas simulações computacionais, com a utilização do software *MaxSurf Resistance*, a partir dos métodos *Savitsky* pré-planeio e *Savitsky* planeio. Além disso, foi utilizado o software *Motor-CAD*, por meio do Método de Elementos Finitos. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos para a simulação do casco com calado de 0,1m e uma variação de velocidades de 3 a 18 nós, com uma eficiência de 95%, proporcionada pelo motor elétrico. Para cada velocidade, observa-se um valor de resistência e potência, no método de planeio e pré-planeio.

Tabela 3: Valores de Resistência e Potência

Speed (kn)	Savitsky Pré-Planeio Resistência (kN)	Savitsky Pré-Planeio Potência (hp)	Savitsky Planeio Resistência (kN)	Savitsky Planeio Potência (hp)
3,000	--	--	--	--
6,000	0,2	1,011	--	--
9,000	0,4	2,416	0,2	1,623
12,000	--	--	0,3	2,890
15,000	--	--	0,4	4,427
18,000	--	--	0,5	6,396

Fonte: Autores (2024)

Os resultados obtidos foram utilizados para a plotagem das curvas de resistência e velocidade (Figura 4(a)), e da potência e velocidade (Figura 4(b)). Na Figura 4(a), o gráfico demonstra que, utilizando o método *Savitsky*, a embarcação em pré-planeio, encontra-se a uma velocidade de 5 nós, enquanto a resistência varia entre os valores aproximados de 0,17 a 0,40 kN. Na Figura 4(b), o gráfico apresenta o comportamento da curva de potência em função da velocidade, demonstrando que para uma velocidade de 12 nós, a potência necessária é de aproximadamente 3hp, enquanto para a velocidade de 16 nós, o valor da potência é aproximadamente de 6hp.

Figura 4. (a) Curva da Resistência e velocidade, (b) Curva da Potência e velocidade.

Fonte: Autores (2024).

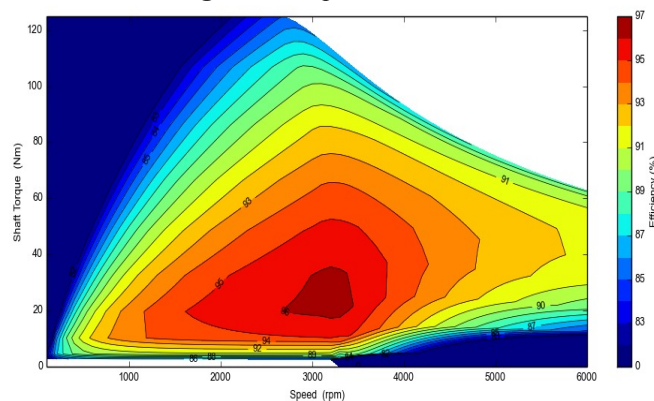
O motor utilizado nesta pesquisa foi simulado através de um Software para motores elétricos, com a obtenção de alguns parâmetros elétricos e mecânicos importantes para a navegação segura e eficiente da embarcação. A Tabela 4 abaixo mostra os principais parâmetros citados.

Tabela 4. Parâmetros principais da máquina.

Potência de entrada (Pim)	3,423 kW
Potência de saída (Pout)	3,253 kW
Tensão no Barramento Principal (V)	120 V
Torque nominal no eixo (T)	10,355 N.m
Eficiência (e)	95,023 %
Velocidade a Vazio (n0)	3450 rpm
Velocidade a plena carga (nm)	3081 rpm

Fonte: Autores (2024).

Diante dos valores expressos na Figura 5, foi extraído o mapa de eficiência do motor elétrico simulado no Software *MotorCAD*, indicando parâmetros importantes que a embarcação precisa. O mapa de eficiência possui características semelhantes às curvas de nível de um terreno, porém com parâmetros como torque, velocidade e eficiência. Através do mapa de eficiência, é possível observar o comportamento da variação da eficiência do motor em função do torque e da velocidade de rotação.

Figura 5. Mapa de Eficiência.

Fonte: Autores (2024)

A simulação com o software *MaxSurf Resistance*, utilizando os métodos de *Savitsky* pré-planeio e planeio, mostrou uma correlação direta entre a velocidade da embarcação e os valores de resistência e potência requeridos. Os gráficos de resistência e velocidade, bem como de potência e velocidade, destacaram que a otimização do casco pode resultar em menores valores de resistência e potência necessária. Além disso, a simulação do motor elétrico BLDC, com o *Motor-CAD*, demonstrou uma eficiência significativa, com um rendimento de 95%, essencial para garantir um desempenho energético ótimo da embarcação. A análise do mapa de eficiência do motor revelou a relação entre torque, velocidade e eficiência, fornecendo dados valiosos para o dimensionamento adequado do sistema de propulsão.

Conclusões

O estudo demonstrou a viabilidade e os benefícios da eletrificação de embarcações fluviais na Amazônia, utilizando simulações computacionais para otimizar o design do casco e o sistema de propulsão. Com a otimização do casco e a implementação de motores elétricos, há, consequentemente, uma redução na emissão de poluentes, o que promove um transporte mais sustentável e de baixo impacto ambiental. As simulações computacionais provaram ser uma ferramenta poderosa na redução de custos e riscos físicos, permitindo um desenvolvimento mais preciso e controlado. Essa abordagem não apenas beneficia o meio ambiente, mas também apoia o desenvolvimento socioeconômico sustentável das comunidades ribeirinhas.

Agradecimentos

À Universidade Federal do Pará (UFPA), ao Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON), ao projeto EMOB-AMAZON, à Agência Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI).

Referências Bibliográficas

- Gabriel, G. T. *et al.* Validação de modelo de simulação por meio de quatro parâmetros: estudo de uma linha de montagem controlada. XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. "A Engenharia de Produção e suas contribuições para o desenvolvimento do Brasil", Alagoas, 2018.
- Hanselman, D. C. Projeto de motor de ímã permanente sem escovas. The Writers' Collective, 2003.
- Iervolino, L. A. Estudo de resistência ao avanço de uma embarcação de planeio de 26 pés: abordagem computacional baseada em CFD. Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2015.
- Morales, J. E. S.; FERKO, G. P. S. Importância dos rios em cidades amazônicas: um estudo de caso em Boa Vista–Roraima, Brasil. *Acta Geográfica*, v. 16, n. 41, p. 111-138, Roraima, 2022.
- Oliveira, R. S.; Henkes, J. A. Uma análise sobre a possibilidade de uso dos motores elétricos em aeronaves comerciais. *Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas*, v. 1, n. 2, 2023. Disponível em: <https://rbac.cia.emnuvens.com.br/revista/article/view/27>. Acesso em: 30 jul. 2024.
- Sugahara, Cibele et al. Mudanças climáticas e veículos elétricos: alternativas para o desenvolvimento sustentável. *Revista de Empreendedorismo, Negócios e Inovação*, v. 7, n. 1, p. 26-50, 2022.
- Simos, A. Especialização em Engenharia Naval. Módulo3: Hidrodinâmica. [S. l.]: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.