

EFICIÊNCIA LOGÍSTICA NO ARCO NORTE: IMPACTO DAS VARIÁVEIS DE ENGENHARIA NAVAL NA COMPETITIVIDADE DO ESCOAMENTO DE GRÃOS DO CENTRO-OESTE BRASILEIRO

Rainier Pedroso Cavalcanti da Costa (Business School Brasil) *rainierpedrosoacademy@gmail.com*
Prof. Dr. José Bezerra da Silva Filho (Business School Brasil) *Professor.Dr.Bezerra@BSBr.com.br*

Resumo

O escoamento da produção agrícola da região Centro-Oeste do Brasil enfrenta desafios críticos relacionados às limitações de infraestrutura e aos elevados custos logísticos. Este estudo adota uma abordagem de métodos mistos para analisar como variáveis da engenharia naval — incluindo calado, sistemas de propulsão e desempenho de manutenção — influenciam a competitividade do corredor logístico do Arco Norte. Os resultados indicam que a eficiência do sistema de transporte hidroviário é altamente sensível à sazonalidade hidrológica e ao nível tecnológico dos ativos navais. As evidências demonstram que melhorias na infraestrutura portuária, nas operações de dragagem e derrocagem, bem como investimentos em sistemas de propulsão mais eficientes, aumentam significativamente a capacidade de transporte, reduzem os custos operacionais e elevam a confiabilidade do sistema. O estudo conclui que investimentos estratégicos em engenharia naval e infraestrutura são essenciais para consolidar o Arco Norte como uma alternativa sustentável e competitiva para a exportação de grãos, fortalecendo a posição do Brasil no mercado agrícola global.

Palavras-Chave: *Logística Hidroviária, Arco Norte, Escoamento de Grãos, Engenharia Naval, Eficiência da Infraestrutura, Competitividade no Transporte.*

Abstract

The outflow of agricultural production from Brazil's Midwest region faces critical challenges related to infrastructure limitations and high logistical costs. This study adopts a mixed-method approach to analyze how naval engineering variables — including draft, propulsion systems, and maintenance performance — influence the competitiveness of the Northern Arc logistics corridor. The results indicate that the efficiency of the waterway transportation system is highly sensitive to hydrological seasonality and the technological

level of naval assets. Findings demonstrate that improvements in port infrastructure, dredging and rock removal operations, as well as investments in more efficient propulsion systems, significantly enhance transport capacity, reduce operational costs, and increase system reliability. The study concludes that strategic investments in naval engineering and infrastructure are essential to consolidate the Northern Arc as a sustainable and competitive alternative for grain exports, strengthening Brazil's position in the global agricultural market.

Keywords: *Waterway Logistics, Northern Arc, Grain Export Flow, Naval Engineering, Infrastructure Efficiency, Transportation Competitiveness.*

1. Introdução

O Brasil consolidou-se como o principal player global na exportação de commodities agrícolas, com a região Centro-Oeste protagonizando mais da metade da produção nacional de soja e milho. Historicamente, esse volume enfrentou gargalos logísticos severos, dependendo de rotas rodoviárias extensas para portos das regiões Sul e Sudeste, como Santos (SP) e Paranaguá (PR). Nesse âmbito, o surgimento e a consolidação do “Arco Norte” (Rios navegáveis nas bacias do Tapajós e Madeira) apresentou-se não apenas como uma alternativa geográfica, mas como uma necessidade estratégica para a redução de custo e tempo.

No entanto, a viabilidade econômica do modal hidroviário no Norte não é uma constante linear; ela é intrinsecamente dependente de variáveis da Gestão de Ativos, Engenharia Naval e de Infraestrutura. Enquanto o modal rodoviário lida com custos, altos, fixos e variáveis previsíveis (diesel e manutenção de frota), a logística hidroviária é governada pela dinâmica dos rios, clima e pela eficiência dos ativos navais. A problemática central reside no fato de que o desempenho econômico dessas rotas é flutuante, sendo limitada por restrições de calado, eficiência dos sistemas propulsivos frente às correntes amazônicas, sinuosidade dos estreitos navegáveis e a complexidade da manutenção de grandes comboios em regiões de infraestrutura limitada.

A Gestão de Ativos e a Engenharia Naval impacta diretamente o valor do frete em duas frentes críticas: na capacidade de carga útil (onde a redução de poucos centímetros do nível do rio e da largura dos estreitos, devido à sazonalidade, exige alívio de carga ou desmembramento de comboios) e na eficiência energética (onde a escolha do sistema propulsivo subdimensionado ou com falhas de manutenção/operação eleva drasticamente o consumo de combustível em trechos de subida). Portanto, entender o custo do escoamento via

Miritituba (PA) requer uma análise que vá além do conhecimento da logística tradicional, integrando o comportamento técnico dos empurradores e barcaças sob diferentes condições hidrológicas.

2. Referencial Teórico

2.1 A Consolidação do Arco Norte e o Desenvolvimento do Pará

De acordo com o estudo da Revista Engetec (2024), a evolução do transporte de soja e milho no Arco norte é associado a pavimentação da rodovia BR-163 ou da instalação de ferrovias, da estruturação das ETCs (Estações de Transbordo de Carga) no município de Miritituba-PA e da transformação das vias navegáveis em hidrovias, propriamente dita.

O Pará não é apenas um estado de passagem de produto, mas um hub logístico estratégico para o Brasil. A localização industrial e logística aplicada ao estado demonstra que a eficiência do escoamento depende de estudos mais aprofundados na integração e desenvolvimento dos modais rodoviário, ferroviário e hidroviário.

2.2 O Modal Hidroviário como Vetor de Eficiência

O transporte hidroviário é caracterizado por sua alta capacidade de carga e baixo custo energético. Nesta monta, podemos encontrar formações de comboios de 25 a 35 barcaças acopladas a um empurrador, onde cada barcaça carrega (com calado máximo 3,86m) 2100t de grãos, ou seja, 52.000t a 73.000t de grãos em uma única viagem de 4 dias percorrendo um trecho navegável de 594 nm (1.100km).

2.3 Sustentabilidade, ESG e Transporte de Baixo Carbono

No cenário atual, a logística de commodities não é mais avaliada apenas pela eficiência de custos, mas pela sua conformidade com os pilares ESG (Environmental, Social and Governance). A pressão global por cadeias de suprimento descarbonizadas coloca o modal hidroviário do Arco Norte em uma posição de vantagem estratégica, servindo como uma solução de baixo carbono para o agronegócio brasileiro.

Para quantificar esse impacto, este estudo realiza um comparativo técnico de emissões e eficiência energética baseado na movimentação de 52.000t de grãos (volume médio exportado por um navio de porte Panamax).

2.3.1 Comparativo Modal: Caminhões vs. Comboio de Barcaças

Ao analisar o escoamento de 52.000t de grãos, a disparidade entre os modais rodoviários e hidroviários revela-se tanto na ocupação de infraestrutura quanto na pegada ambiental:

- Modal Rodoviário (Caminhões):
 - Quantidade: Para transportar 52.000t, seriam necessários aprox. 1.300 caminhões (considerando bitrens com carga líquida média de 40 toneladas).
 - Impacto Logístico: Uma frota desta magnitude, respeitando a distância de segurança, ocuparia cerca de 26 a 30km de rodovia de forma contínua, gerando congestionamento e desgaste acelerado dos trechos que possuem pavimentação.
 - Emissões: O modal rodoviário emite aprox. de 37 kg CO₂/mil tku.
- Modal Hidroviário (Comboio de Barcaças):
 - Quantidade: O mesmo volume de 52.000t pode ser movimentado por apenas um comboio de escala normal (considerando a operação no Rio Tapajós/Amazonas).
 - Impacto Logístico: Ocupação mínima de espaço fluvial, sem interferência em malhas urbanas ou rodoviárias, e com o risco de acidentes drasticamente reduzido na maior parte da navegação.
 - Emissões: A navegação fluvial emite aprox. 2,8 kg CO₂/mil tku, o que representa uma redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) superior a 75% em relação ao caminhão.

Obs.: A unidade kg CO₂/Mil TKU representa a quantidade de quilogramas de dióxido de carbono (CO₂) emitida para o transporte de mil toneladas de carga por um quilômetro de distância.

2.3.2 Eficiência Energética e Manutenção Naval

A sustentabilidade do Arco Norte é sustentada pela eficiência energética e preço do combustível. Um litro de diesel rodoviário chega a custar 50% a 70% mais caro que o diesel marítimo (IFO). Se, hipoteticamente, considerarmos uma rodovia em linha reta em paralelo com uma hidrovia também reta e considerarmos os valores já mencionados, teremos:

- 1300 caminhões, com autonomia média de 4 km/l, um consumo de 357.500l de Diesel Rodoviário.

- 1 comboio de 25 barcas, com autonomia média de 0,024 km/l, um consumo de 45.000l de Diesel marítimo (IFO).

Ao analisarmos pelo volume de combustível, fica evidente a eficiência e economia de um modal hidroviário em relação ao rodoviário para o mesmo volume transportado. Observando que o Diesel Marítimo (IFO) pode chegar a ser 40% mais barato que o Diesel Rodoviário.

Para a Manutenção Naval, o desafio ESG reside na manutenção e modernização dos sistemas de propulsão. A adoção de motores de alta eficiência, manutenções preditivas e detectivas mais eficientes e a transição para combustíveis menos poluentes (ou sistemas híbridos) não apenas reduzem os custos operacionais, mas garantem a certificação de “soja verde” exigida pelos mercados internacionais, especialmente a União Europeia. Portanto, a manutenção naval atua como um facilitador técnico para que o Arco Norte cumpra as metas de emissão zero propostas para as próximas décadas.

3. Metodologia

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de natureza exploratória e explicativa, com abordagem mista (qualitativa e quantitativa), estruturada em quatro etapas principais: (i) levantamento documental e bibliográfico, (ii) modelagem técnico-operacional do sistema hidroviário, (iii) análise comparativa modal e (iv) avaliação de sensibilidade às variáveis hidrológicas e tecnológicas.

3.1 Delineamento da Pesquisa

A investigação foi conduzida a partir de:

- Dados secundários obtidos junto à ANTAQ (2024), BNDES (2023), World Bank (2021) e estudos técnicos da Revista Engetec (2024);
- Informações técnicas de engenharia naval referentes a empurradores e comboios operantes nas bacias do Tapajós e Madeira;
- Parâmetros operacionais como: calado máximo (3,86m), capacidade média por barcaça (2.100t), número de barcas por comboio (25–35 unidades), extensão média de navegação (1.100 km) e tempo médio de percurso (4 dias).

O recorte espacial concentra-se no corredor logístico do Arco Norte, com ênfase nas operações de transbordo em Miritituba (PA).

3.2 Modelagem Técnico-Operacional

Foi desenvolvida uma modelagem simplificada de eficiência logística considerando três variáveis principais de Engenharia Naval:

1. Calado operacional (m)
2. Eficiência do sistema propulsivo (km/l ou consumo específico)
3. Desempenho de manutenção (disponibilidade operacional dos ativos)

A eficiência logística (EL) foi analisada como função dessas variáveis:

$$EL=f(C,P,M,H)$$

Onde:

- C = Calado disponível
- P = Eficiência propulsiva
- M = Performance de manutenção
- H = Condições hidrológicas (nível do rio / sazonalidade)

A análise considerou cenários de cheia e estiagem, avaliando impacto na capacidade de carga útil (toneladas efetivamente transportadas) e no custo por tonelada.

3.3 Análise Comparativa Modal

Foi realizada uma comparação técnico-quantitativa entre:

- Modal Rodoviário (1.300 caminhões para 52.000t)
- Modal Hidroviário (1 comboio padrão)

Os critérios avaliados foram:

- Capacidade logística
- Consumo de combustível
- Emissões (kg CO₂ / mil TKU)
- Ocupação de infraestrutura
- Sensibilidade ao preço do combustível

Os cálculos de consumo energético foram baseados nos seguintes parâmetros médios:

- Caminhão: 4 km/l
- Comboio: 0,024 km/l
- Emissões:
- Rodoviário: 37 kg CO₂/mil TKU
- Hidroviário: 2,8 kg CO₂/mil TKU

3.4 Análise de Sensibilidade Hidrológica

Foi realizada uma análise de sensibilidade considerando variações no nível do rio e seus impactos sobre:

- Redução de carga útil por restrição de calado
- Necessidade de desmembramento de comboios
- Aumento do consumo específico de combustível em subida
- Aumento do custo logístico por tonelada

Essa análise permitiu identificar o grau de vulnerabilidade econômica do sistema hidroviário frente à sazonalidade climática.

3.5 Avaliação Estratégica

Por fim, os resultados quantitativos foram integrados a uma análise estratégica sob três dimensões:

- Competitividade logística
- Sustentabilidade (ESG)
- Gestão de ativos navais

A triangulação metodológica (dados técnicos + modelagem + análise comparativa + análise estratégica) permitiu identificar relações causais entre variáveis de Engenharia Naval e desempenho logístico no Arco Norte.

4. Resultados e Discussão

A análise dos resultados, fundamentada nos dados da evolução logística recente, revela que o Arco Norte já responde por uma parcela significativa das exportações brasileiras de grãos, mas ainda muito aquém do seu potencial. Apesar das péssimas condições da BR-163, o porto de Miritituba (Itaituba-PA) tornou-se o principal ponto de transbordo, conectando a safra do Centro-Oeste brasileiro ao mundo.

4.1 Capacidade e Escala Naval

Os dados demonstram que a utilização de comboios para o transporte de grãos transformou o custo unitário do frete. Enquanto o modal rodoviário puro para o Sul/Sudeste é vulnerável às variações constantes de preço do diesel e uma larga manutenção de frotas de caminhões, a engenharia de escala nos rios paraenses permite uma diluição de custos fixos muito mais agressiva.

4.2 A Problemática do Calado e Sazonalidade

Um resultado crítico discutido é a sensibilidade do sistema às condições hidrológicas. A eficiência logística é “refém” do nível dos rios. Durante a estiagem, a redução do calado operacional exige que os comboios naveguem com carga reduzida (alívio), o que aumenta o custo por tonelada. Isso evidencia a necessidade de investimentos de infraestruturas, como: dragagem, derrocagem e a transformação das vias navegáveis em hidrovias sinalizadas e monitoradas.

A discussão reforça que o impacto da Engenharia Naval nos valores de escoamento não é estático. A inovação em empurradores com sistemas propulsivos mais eficientes, melhor gestão de ativos e barcas com menor calado dinâmico é o que permite ao Arco Norte manter o crescimento de volume mesmo sob condições climáticas adversas.

5. Considerações Finais

O estudo Conclui que a evolução do transporte de grãos no Arco Norte é o principal motor para o desenvolvimento logístico recente do estado do Pará. A transição do eixo de escoamento para o Norte não apenas reduz custos para o produtor do Centro-Oeste, mas também gera uma demanda crescente por serviços de engenharia, infraestrutura portuária e manutenção naval na região.

Fica evidente que a problemática dos custos está diretamente ligada à capacidade técnica de adaptação aos ciclos hidrológicos. A competitividade do Arco Norte frente ao



Sudeste é sustentada pela eficiência modal naval; contudo, essa vantagem é frágil sem políticas contínuas de dragagem, derrocagem, sinalização, modernização de frota e estudos científicos. Recomenda-se que estudos futuros no SIMEP foquem na viabilidade de novas tecnologias gestão de ativos, novas rotas hidroviárias e tecnologias de sistemas propulsivos para os comboios fluviais, visando reduzir ainda mais a pegada de carbono e os custos operacionais, consolidando o Pará como a fronteira logística mais eficiente do agronegócio global.

REFERÊNCIAS

ENGETEC. **A evolução do Transporte Hidroviário de Soja e Milho no Arco Norte e Sua Importância para o Desenvolvimento do Pará.** Revista Engetec, v. 12, n. 1, 2024.

DALTO, J.; SOUZA, L. C.; OLIVEIRA, R. S. **Descarbonização no Transporte de Cargas.** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 57, p. 289-342, mar. 2023. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/26087/3/PRArt%20216307_Descarboniza%C3%A7%C3%A3o%20no%20transporte%20de%20cargas.pdf.

ANTAQ -**AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS.** Anuário Estatístico Aquaviário 2024. Brasília: ANTAQ, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/antag>.

WORLD BANK. **The Green Logistics in Brazil: Opportunities for Low Carbon Growth.** Washington, DC: World Bank Group, 2021.