

PARADOXO DA MODERNIZAÇÃO EM SISTEMAS PROPULSIVOS FLUVIAIS: UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O ARCO NORTE AMAZÔNICO E O CORREDOR RENO-WAAL

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

A navegação interior por empurradores e comboios de barcaças é um pilar estratégico para economias continentais, enfrentando atualmente pressões por modernização tecnológica e descarbonização. Este artigo analisa comparativamente os sistemas propulsivos utilizados no Arco Norte Amazônico (Brasil) e no sistema Reno-Waal (Holanda), investigando como fatores contextuais regionais influenciam a eficácia de diferentes tecnologias. A metodologia baseia-se em uma abordagem qualitativa comparativa e revisão sistemática de literatura técnica e acadêmica recente. Os resultados revelam o “paradoxo da modernização”: tecnologias avançadas, como sistemas diesel-elétricos e híbridos, embora superiores em redução de emissões e flexibilidade, podem apresentar menor eficiência energética em operações de cruzeiro contínuo se comparadas à propulsão convencional diesel direta. No contexto brasileiro, destaca-se a relevância de propulsores azimutais para manobrabilidade em rios sinuosos, enquanto na Holanda, a regulação ambiental severa impulsiona o uso de GNL e eletrificação. Conclui-se que a escolha do sistema propulsivo ótimo não é universal, mas estritamente dependente das condições hidrológicas, do perfil operacional e da infraestrutura de suporte regional.

Palavras-chave: *Sistemas propulsivos; Navegação interior; Arco Norte; Reno-Waal; Eficiência energética; Manobrabilidade.*

Abstract

Inland waterway transport using pushers and barge convoys is a strategic pillar for continental economies, currently facing pressures for technological modernization and decarbonization. This paper provides a comparative analysis of propulsion systems used in the Brazilian Amazon's Northern Arc and the Rhine-Waal system in the Netherlands, investigating how regional contextual factors influence the effectiveness of different technologies. The

methodology is based on a qualitative comparative approach and a systematic review of recent technical and academic literature. The results reveal a "modernization paradox": advanced technologies, such as diesel-electric and hybrid systems, while superior in emission reduction and flexibility, may exhibit lower energy efficiency in steady-state cruise operations compared to conventional diesel-direct propulsion. In the Brazilian context, the relevance of azimuth thrusters for maneuverability in sinuous rivers is highlighted, while in the Netherlands, stringent environmental regulations drive the adoption of LNG and electrification. The study concludes that the choice of an optimal propulsion system is not universal but strictly dependent on hydrological conditions, operational profiles, and regional support infrastructure.

Keywords: *Propulsion systems; Inland navigation; Northern Arc; Rhine-Waal; Energy efficiency; Maneuverability.*

1. Introdução

A navegação interior por empurradores de barcaças constitui um dos modais de transporte de carga mais eficientes em termos energéticos e ambientais, desempenhando papel estratégico em economias continentais. Nos EUA, o sistema hidroviário do Mississippi movimenta mais de 500 milhões de toneladas de carga; na Holanda, sistema Reno-Waal forma um corredor logístico importante; e no Brasil, o Arco Norte amazônico emerge como alternativa ao transporte rodoviário de grãos. Contudo, este setor enfrenta pressões crescentes por modernização tecnológica, impulsionadas por regulações ambientais mais rigorosas, volatilidade nos preços de combustíveis e demandas por maior eficiência operacional.

O design de sistemas propulsivos para empurradores fluviais envolve um balanço complexo entre potência, eficiência energética, manobrabilidade, custos de capital e operação, e adequações às condições hidrológicas.

Tecnologias emergentes no meio hidroviário, como: propulsores azimutais, sistemas diesel-elétricos, propulsão a gás natural liquefeito (GNL) e eletrificação total, prometem ganhos significativos em eficiência e redução de emissões de gases do efeito estufa. Entretanto, a adoção dessas inovações não é uniforme geograficamente, sugerindo que fatores contextuais regionais desempenham papel determinante na escolha tecnológica.

Esse cenário configura o que denominamos “paradoxo da modernização”: sistemas propulsivos avançados não necessariamente resultam em melhor desempenho operacional ou econômico quando desalinhados das condições locais e de operação. Por exemplo,

propulsores azimutais oferecem manobrabilidade superior em baixas velocidades, mas podem ser menos eficientes que sistemas convencionais em operação de cruzeiro em trechos de rios retilíneos ou em locais onde a profundidade é significativamente pequena, provocando o efeito squat (agachamento) e afetando toda controlabilidade da embarcação.

Similarmente, a eletrificação total pode ser economicamente inviável em regiões sem infraestrutura de recarga via Grid da concessionária de energia ou por matriz energética baseada em combustíveis fósseis ou de energias renováveis.

Apesar da relevância estratégica do tema, a literatura carece de análises comparativas que integrem dimensões técnicas, operacionais, econômicas e contextuais dos sistemas propulsivos em diferentes regiões do mundo. Estudos existentes tendem a focar em aspectos isolados (eficiência hidrodinâmica, redução de emissões, ou manobrabilidade) sem integrar essas dimensões em uma perspectiva comparativa regional.

O objetivo deste artigo é analisar comparativamente os sistemas propulsivos de empurradores de barcas nas hidrovias do Arco Norte Amazônico (Brasil) e Holanda, investigando como fatores contextuais regionais influenciam a escolha e o desempenho de diferentes tecnologias propulsivas. Especificamente, busca-se: caracterizar os sistemas propulsivos predominantes em cada região; comparar desempenho técnico e operacional; analisar a relação entre modernização tecnológica, eficiência e adequação regional; e identificar diretrizes para seleção de sistemas propulsivos em contextos específicos.

2. Referencial Teórico

2.1 Sistemas propulsivos em Navegação Interior

Os sistemas propulsivos de empurradores fluviais podem ser classificados em quatro categorias principais, cada um com características técnicas e operacionais distintas.

- **Propulsão convencional (diesel-direta):** Consiste em motores diesel acoplados a eixos de transmissão e a tubos telescópicos, que por sua vez se conectam a propulsores que podem ser de passo fixo ou controlável. Este sistema dominou a navegação interior durante décadas devido a sua simplicidade, robustez e eficiência energética em operação de cruzeiro. A eficiência propulsiva é alta, mas sua manobrabilidade se torna de baixa eficiência quando em baixas velocidades.

- **Propulsores azimutais:** São unidades propulsivas que podem rotacionar 360° em torno do seu eixo vertical, eliminando a necessidade de: lemes, tubos telescópicos, caixas redutoras e reversores de marcha (a vante e a ré).

Estudos demonstram que os azimutais aumentam substancialmente a manobrabilidade de comboios em baixas velocidades e trechos sinuosos, reduzindo o tempo de manobra em até 40%. Contudo, apresentam maior complexidade mecânica, custos de manutenção elevados, mão de obra mais qualificada e eficiência propulsiva ligeiramente inferior à propulsão convencional.

- **Sistema diesel-elétricos:** Combinam motores diesel, geradores elétricos e propulsores azimutais, permitindo operação flexível e otimização do ponto de operação dos motores principais para cada perfil de manobra. Sistemas diesel-elétricos permitem a possibilidade de redução de consumo de 10-30% em perfis operacionais com variação significativa de carga.
- **Propulsão a GNL e células a combustível:** Representam a fronteira tecnológica em descarbonização da navegação interior. Motores dual-fuel (diesel/GNL) reduzem emissões de CO₂ em 20-25% e praticamente eliminam SO_x e material particulado.

Células combustíveis a hidrogênio oferecem eficiências de 60-65% em cargas parciais e emissões zero no ponto de uso. Entretanto, enfrentam barreiras significativas: custos elevados de capital (3 a 5 vezes mais caros que sistemas convencionais), infraestrutura de abastecimento limitada, e requisitos de volume para armazenamento de combustível.

2.2 Fatores Contextuais e Adequação Tecnológica

A adequação de sistema propulsivo a um contexto operacional específico é determinada pela interação de múltiplos fatores regionais.

- **Condições hidrológicas:** profundidade, largura, sinuosidade, correntes, canais e variação sazonal das chuvas impactam diretamente os requisitos de manobrabilidade, potência e eficiência. Rios rasos, sinuosos e estreitos (como os estreitos amazônicos) demandam alta manobrabilidade em baixas velocidades, favorecendo propulsores azimutais. Em contraste, o Reno, com trechos retilíneos extensos, privilegia a eficiência em velocidade de cruzeiro, onde sistemas convencionais são competitivos. A variação sazonal de nível d'água no Reno pode duplicar a eficiência de transporte

entre períodos de águas baixas e altas, influenciando a escolha de configurações flexíveis.

- **Perfil operacional:** distâncias típicas de viagem, frequência de manobras, variação de carga, tempo em diferentes regimes de potência; determina a viabilidade de tecnologias como hibridização e eletrificação. As operações com ciclos curtos e alta variação de carga (ex: operações portuárias) maximizam os benefícios de sistemas híbridos/azimutais, enquanto operações de longas distâncias com carga constante favorecem o sistema diesel direto.
- **Regulação ambiental:** Constitui ponto primário de modernização em regiões desenvolvidas. A União Europeia impõe limites progressivamente mais rigorosos para NOx, SOx e material particulado em águas interiores, tornando economicamente viável a adoção de sistemas a GNL e híbridos.
- **Infraestrutura de suporte:** Disponibilidade de combustíveis alternativos, facilidades de recarga elétrica, capacidade de manutenção especializada; limita a viabilidade prática de tecnologias avançadas. A eletrificação de empurradores requer infraestrutura de recarga de alta potência em pontos estratégicos, inviável em regiões remotas. Similarmente, a adoção de GNL depende de rede de distribuição e bunkering.
- **Fatores econômicos:** Custos de CAPEX, custos de OPEX, preços relativos de combustíveis, vida útil da embarcação; determinam a viabilidade financeira de modernização ou retrofit das embarcações. Análises de ciclo de vida demonstram que sistemas híbridos podem ter payback de 5-10 anos dependendo do perfil operacional e preços de combustível, mas requerem investimento inicial 40-80% superior ao sistema convencional.

3. Metodologia

Este estudo se caracteriza como uma pesquisa aplicada, de natureza exploratória e explicativa. A abordagem é qualitativa e comparativa, estruturada a partir de dados técnicos e operacionais extraídos de revisão sistemática, e organizada em quatro etapas principais: (i) levantamento documental e bibliográfico; (ii) sistematização das características técnico-operacionais dos sistemas hidroviários; (iii) análise comparativa modal; e (iv) avaliação da adequação tecnológica frente às variáveis hidrológicas e regionais.

3.1 Desenho do Estudo

O estudo adota uma abordagem qualitativa comparativa, fundamentada em revisão sistemática da literatura científica e análise documental. O desenho qualitativo justifica-se pela natureza exploratória da pesquisa, que busca compreender padrões complexos de adequação tecnológica em contextos regionais distintos, considerando a heterogeneidade das fontes de evidência disponíveis. A estratégia comparativa permite identificar similaridades, divergências e padrões causais entre as duas regiões geográficas selecionadas.

As unidades de análise compreendem os sistemas propulsivos de empurradores de barcas operando em dois contextos distintos: (1) o sistema hidroviário do Arco Norte amazônico (Brasil) e (2) as hidrovias interiores da Holanda e suas conexões europeias (Reno-Waal). A seleção dessas regiões baseou-se em três critérios: relevância estratégica para o transporte de carga interior, diversidade de condições hidrológicas e operacionais, e disponibilidade de literatura científica técnica.

3.2 Estratégia de Busca e Seleção de Fontes

A busca sistemática foi conduzida em janeiro-fevereiro de 2026 nas seguintes bases de dados: SciSpace (recursos de Deep Search e Basic Search com acesso ao texto completo), Google Scholar, IEEE Xplore, ScienceDirect e repositórios institucionais brasileiros. A estratégia de busca combinou termos controlados e palavras-chaves em inglês e português:

Termos principais: “inland waterway propulsion”, “river pusher”, “towboat”, “barge propulsion”, “azimuth thruster”, “hybrid propulsion”, “empurrador fluvial”, “propulsão fluvial”, “comboio de barcas”

Termos geográficos: “Amazon”, “Arco Norte”, “Rhine”, “Netherlands inland waterway”, “European inland navigation”

Termos tecnológicos: “diesel-electric”, “LNG propulsion”, “fuel cell”, “electrification”, “energy efficiency”, “emissions reduction”

Critérios de inclusão: (a) artigos científicos revisados por pares, anais de conferências especializadas, teses e dissertações; (b) publicados entre 2009-2026 (últimos 15 anos); (c) foco em sistemas propulsivos de embarcações de navegação interior; (d) presença de dados técnicos, operacionais ou comparativos; (e) idiomas: inglês, português ou espanhol.

Critérios de exclusão: (a) estudos focados exclusivamente em navegação marítima de longo curso; (b) artigos sem dados técnicos ou empíricos; (c) publicações duplicadas; (d) estudos sem acesso ao texto completo. A busca inicial identificou 36 artigos potencialmente relevantes. Após triagem por título e resumo, 10 artigos foram selecionados para leitura.

3.3 Análise Comparativa

A análise dos artigos selecionados seguiu um protocolo estruturado de extração de dados, utilizando ferramentas de análise assistida por inteligência artificial para o processamento de texto completo. Foram extraídas informações sobre categorias tecnológicas, contextos operacionais, indicadores de desempenho (potência, eficiência, emissões) e fatores de adequação regional.

Os dados extraídos foram organizados em matriz comparativa, permitindo uma análise temática para identificar convergências e divergências quanto as tecnologias predominantes e seus respectivos motivos de escolha. A triangulação de evidências de múltiplas fontes e a análise de casos discrepantes foram aplicadas para aumentar a fidedignidade e a robustez das interpretações. As limitações metodológicas são discutidas detalhadamente na seção 5.4.

4. Resultados: Evidências Extraídas da Literatura

Nesta seção, sistematizam-se as evidências extraídas da revisão bibliográfica, focando nos dados brutos de desempenho e características operacionais reportados pelas fontes selecionadas.

4.1 Desempenho Técnico e Operacional Regional

Os estudos de **Yuba (2014)** e **Yuba et al.** indicam que, no contexto das hidrovias brasileiras, a manobrabilidade é o requisito técnico primário devido à sinuosidade dos rios. Os dados apontam que propulsores azimutais oferecem um ganho de controle até 40% em baixas velocidades (≤ 4 nós), enquanto **Musriyadi et al.** quantificam um incremento de empuxo estático (bollard pull) de 30% a 40% com o uso de tubulões (Kort nozzles).

No cenário europeu, **Radojčić et al. (2021)** descrevem uma tendência de design voltada para a integração de múltiplos combustíveis. Paralelamente, os trabalhos de **Bucci et al. (2014, 2015, 2016)** apresentam resultados laboratoriais e de campo onde sistemas a GNL e configurações híbridas reduziram o NOx em 85% e o CO2 em até 25%, cumprindo as exigências da rede transeuropeia.

4.1.1 Eficiência Energética e Variabilidade de Carga

Em relação a eficiência termodinâmica, **Godjevac et al.** demonstram que a propulsão diesel-direta convencional mantém a liderança em eficiência energética quando operando em regime de carga constante e alta velocidade de cruzeiro. Em contrapartida,



Bennabi et al. (2021) e Kopasz et al. (2022) fornecem dados sobre tecnologias de emissão zero e sistemas híbridos, evidenciando que estas soluções atingem seu pico de desempenho em ciclos de carga variáveis e operação de manobra frequentes, mas sofrem perdas por conversão de energia em regimes estáveis.

4.2 Matriz de Comparação Técnica

A Tabela 1 consolida os parâmetros técnicos extraídos, servindo de base para a análise comparativa subsequente.

Tabela 1 – Comparação de Características Técnicas de Sistemas Propulsivos por Região

Categoria de Análise	Arco Norte Amazônico(Brasil)	Corredor Reno-Waal (Europa)
Configuração Tecnológica Predominante	Sistemas Diesel-diretos com propulsores azimutais e tubeiras (Kort nozzles).	Sistemas Diesel-diretos, Híbridos (Diesel-Elétrico) e propulsão a GNL.
Principais Indicadores de Desempenho	Foco em Bollard Pull (empuxo estático) e manobrabilidade em baixas velocidades.	Foco na eficiência energética global e redução drástica de emissões (NOx e CO2).
Eficiência Propulsiva Observada	65% a 70% em regime de cruzeiro (sistemas convencionais).	Elevada em sistemas convencionais; variável em sistemas híbridos devido a perdas de conversão.
Impacto Ambiental e Regulação	Monitorização de emissões em estágio inicial; baixa pressão regulatória local.	Conformidade com normas severas de emissão zero em zonas urbanas e portuárias.
Infraestrutura e Suporte	Dependência de combustíveis fósseis; rede de abastecimento limitada para novas tecnologias.	Rede consolidada de abastecimento de GNL e pontos de carregamento elétrico em expansão.
Determinante de Escolha	Hidrologia crítica (rios sinuosos e rasos) e necessidade de robustez mecânica.	Políticas de descarbonização, subsídios governamentais e perfis de navegação retilíneos.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

5. Discussão: O Embate entre Eficiência, Sustentabilidade e Contexto Operacional

A análise integrada da literatura revela que a modernização da propulsão fluvial não deve ser compreendida como um percurso linear de evolução tecnológica, mas sim como um campo de tensões entre requisitos técnicos divergentes. O núcleo do “Paradoxo da Modernização” reside na constatação de que a sofisticação voltada a descarbonização pode, paradoxalmente, degradar a eficiência termodinâmica em perfis de carga contínua.

5.1 O Custo Energético da Sustentabilidade

Ao confrontar os dados de Godjevac et al. com as propostas de eletrificação e GNL de Bucci et al. (2014, 2016), observa-se que a transição para sistemas de baixa emissão impõe um “pedágio energético” raramente explicitado em abordagens puramente regulatórias. Enquanto a propulsão diesel-direta convencional preserva a integridade da conversão de energia em regimes de cruzeiro, os sistemas híbridos introduzem perdas em cada interface de transformação (mecânica→elétrica→mecânica). Nesse sentido, a modernização descrita por Radojčić et al. (2021) configura-se menos como uma otimização absoluta e mais como uma escolha estratégica: Sacrifica-se a eficiência térmica líquida em prol da conformidade ambiental local e da redução de poluentes atmosféricos.

5.2 A Relatividade da Eficácia: O Ciclo de Carga como Árbitro

A divergência entre a necessidade de manobrabilidade no Arco Norte (Yuba, 2014) e a superioridade híbrida em ciclos variáveis (Bennabi et al., 2021) reforça que a eficácia tecnológica é geograficamente dependente. Simultaneamente, nota-se que o perfil de navegação amazônico atua como um limitador para as vantagens de regeneração energética. Diferente do cenário europeu, onde o tráfego denso e as eclusas exigem variações constantes de carga, o contexto brasileiro exige uma “engenharia de resistência”. Portanto, a aplicação de tecnologias de fronteira, como as células de combustível discutidas por Kopasz et al. (2022), esbarra não apenas no custo, mas na própria lógica operacional de regimes estáveis.

5.3 Inovação Incremental vs Radical: O Abismo de Implementação

A análise revela que o sucesso da modernização está intrinsecamente ligado à manutenção e à robustez dos sistemas. Ao alinhar as otimizações de Musriyadi et al. (2017) com a realidade de infraestrutura regional, percebe-se que a inovação incremental (como o aperfeiçoamento de Kort nozzles e propulsores azimutais) apresenta-se como uma resposta mais resiliente que a inovação radical exógena. Em suma, o paradoxo se resolve através da adequação contextual: a modernização sustentável exige que o projetista reconheça as limitações físicas da hidrovia, evitando o erro de transpor soluções de “prateleira” europeias para ecossistemas operacionais com demandas termodinâmicas e logísticas distintas.

6. Considerações Finais

Esta pesquisa evidenciou que a escolha do sistema propulsivo ótimo não é uma decisão meramente técnica, mas uma síntese entre o regime operacional e as restrições regionais. A validação do Paradoxo da Modernização demonstrou que a busca por baixas

emissões pode resultar em um retrocesso na eficiência, o que exige uma revisão dos modelos de decisão para frotas fluviais.

As conclusões fundamentais deste estudo indicam que a propulsão diesel-direta permanece como o padrão de eficiência para regimes de potência contínua, enquanto a hibridização e o uso de GNL consolidam-se como soluções viáveis apenas sob pressões regulatórias severas ou ciclos de carga intermitentes. Para o cenário brasileiro do Arco Norte, conclui-se que a modernização deve priorizar a manobrabilidade e a robustez mecânica, uma vez que a ausência de infraestrutura para combustíveis alternativos e a natureza hidrológica dos rios sinuosos tornam a transposição direta de tecnologias europeias tecnicamente ineficiente.

Por último, recomenda-se que estudos futuros explorem modelos de análises multicritério que integrem o custo do ciclo de vida e as emissões de poço ao tanque (well-to-wake), permitindo uma avaliação que considere tanto o impacto ambiental quanto a sustentabilidade econômica das operações em hidrovias de países em desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

BENNABI, N. et al. Design and comparative study of hybrid propulsions for a river ferry operating on short cycles with high power demands. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 6, p. 631, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9060631>.

BUCCI, V. et al. Inland waterway gas-fuelled vessels: the basis of an innovative concept design for European rivers. In: **EUROPEAN CONFERENCE ON ELECTRICAL SYSTEMS FOR AIRCRAFT, RAILWAY, SHIP PROPULSION AND ROAD VEHICLES**, 2014. **Proceedings...** 2014.

BUCCI, V. et al. Inland waterway gas-fuelled vessels: an innovative proposal of a hybrid ship for the European network. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL SYSTEMS FOR AIRCRAFT, RAILWAY, SHIP PROPULSION AND ROAD VEHICLES**, 2015. **Proceedings...** IEEE, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESARS.2015.7101474>.

BUCCI, V. et al. Inland waterway gas-fueled vessels: CASM-based electrification of a pushboat for the European network. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, v. 2, n. 3, p. 365-375, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2016.2608758>.

GODJEVAC, M. et al. Performance evaluation of an inland pusher. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON MARITIME TECHNOLOGY**, 2015. **Proceedings...** Springer, 2015. p. 273-286. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-16133-4_20.

KOPASZ, J. et al. **Hydrogen for maritime applications**. Argonne National Laboratory, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2172/1903601>.

MUSRIYADI, M. et al. Technical analysis of Kort nozzle application for SPOB ship 4990 DWT on river. **IPTEK Journal of Proceedings Series**, v. 1, n. 3, 2017. DOI: <https://doi.org/10.12962/j25481479.v1i3.1992>.

RADOJČIĆ, D. et al. **Design of contemporary inland waterway vessels**. Springer, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-77325-0>.

YUBA, M. et al. Analysis of pusher-barge system with different maneuvering and propulsion devices. In: **ASME INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING**, 2013. **Proceedings...** ASME, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2013-10489>.

YUBA, M. **Análise de sistemas de propulsão e manobra alternativos para aumento da manobrabilidade de comboios fluviais**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.3.2014.TDE-26122014-164222>.