

Estudo Prospectivo para Uso de Gás Natural Liquefeito (GNL) como Combustível em Transporte Aquaviário no Estado no Amazonas

Prospective Study for the Use of Liquefied Natural Gas (LNG) as Fuel in Waterway Transportation

Vera Lucia Lima Gomes¹, Rosana Zau Mafra¹

¹Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, Brasil

Resumo

O gás natural tem sido usado em vários setores da atividade econômica, desde o uso residencial, em usinas termelétricas até como combustível de automóveis. Considerando que o Estado do Amazonas tem o modal fluvial como o principal meio de transporte para cargas e passageiros e ao mesmo tempo é um grande produtor nacional desse recurso, buscou-se prospectar o estado da arte de tecnologias de uso de gás natural liquefeito como combustível nas embarcações para se propor melhorias para o estado. Trata-se de uma pesquisa qualitativa cujos dados foram coletados nas bases de literatura e de patentes Scopus e Orbit Intelligence, respectivamente; usando como palavras-chave “gás natural liquefeito”, “tanque de armazenagem”, “embarcação”, “sistema de propulsão”. As tecnologias identificadas, como tanque para duplo combustível ou tanque que evita respingos de GNL, poderão ser adotadas nas embarcações do Estado do Amazonas, contribuindo para a transição energética e a sustentabilidade.

Palavras-chave: Tanques Cilíndricos de GNL; Transporte Aquaviário; Estado do Amazonas.

Áreas Tecnológicas: Divulgação da Produção. Serviços Técnicos.

Abstract

Natural gas has been used in various sectors of economic activity, from residential use, in thermoelectric plants, to as a fuel for automobiles. Considering that the state of Amazonas has the river transport as the main means of transportation for cargo and passengers and, at the same time, is a major national producer of this resource, the aim was to prospect the state of the art in technologies the uses liquefied natural gas as fuel for vessels in order to propose sustainable and economic improvements for the state. This is a quali-quanty study which data were collected from the Scopus and Orbit Intelligence databases, respectively; using the keywords “liquefied natural gas”, “storage tank”, “vessel”, “propulsion system”. The technologies identified, such as dual-fuel tanks or tanks that prevent LNG splashes, could be adopted on vessels in the state of Amazonas, contributing to the energy transition and sustainability.

Keywords: LNG Cylindrical tanks; Water Transportation; State of Amazonas.



1 Introdução

O Gás Natural Liquefeito (GNL) tem sido utilizado na indústria, no comércio, nas residências, entre outros setores, por possuir menor índice de poluição atmosférica quando comparado a outros combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão mineral, além de possuir também grande rendimento térmico. O setor naval também passou a adotar esse combustível recentemente devido às exigências mais severas das regulamentações ambientais para que as embarcações passem a utilizar combustíveis mais limpos (Oliveira, 2019).

Ocorre que, os regulamentos da Organização Marítima Internacional (OMI) sobre a obrigatoriedade na redução das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) para a descarbonização do setor marítimo até 2050 tem colocado o setor sob pressão imediata, sendo necessário atingir esses objetivos rapidamente com soluções práticas e seguras. Dessa forma, os combustíveis alternativos (bioderivados ou combustíveis que utilizam captura e armazenamento de carbono) ainda não são tão viáveis a curto prazo, comparado ao GNL que apresenta uma redução imediata nas emissões de GEE de até 23% e tem movimentado a maior parte da tonelagem marítima mundial (SEA-LNG, 2024).

Devido a essa urgência na redução das emissões de gases tóxicos para a atmosfera, o setor naval necessita de inovação nas suas tecnologias para que os combustíveis aplicados nas embarcações reduzam ao máximo as emissões de gases poluentes de forma a atender ao que preconiza a Organização Marítima Internacional (IMO) (Zhang *et al.*, 2017).

O GNL precisa ser armazenado em tanques isolados por causa da sua alta densidade volumétrica, que, quando liquefeito, aumenta em dobro seu volume inicial, exigindo-se o uso de tanques específicos para armazenamento, pois o GNL ocupará três vezes a quantidade armazenada, equivalente à capacidade energética do óleo combustível (Splash, 2018).

Para a fabricação de um navio movido a gás, o projeto desses tanques é regulamentado pela IMO via Código Internacional para a Construção e Equipamentos de Navios Transportadores de Gases Liquefeitos a Granel (código IGC) (Bogaert, 2018). Os tanques das embarcações movidas a gás, segundo a IMO, são de três tipos: A, B e C, que diferem entre si conforme o projeto. O tipo C, que é o objeto deste estudo, não pode ser utilizado para transporte de grandes volumes, pois é um tanque de maior peso e precisa ocupar espaço adequado no casco do navio.

No Estado do Amazonas, há uma grande dependência do transporte fluvial para o deslocamento entre cidades do estado e pouca infraestrutura no setor naval. Na região, o

transporte aquaviário não tem fiscalização adequada, o que acaba sendo preocupante para a garantia da geração de energia. A disponibilidade de combustível no estado é limitada e é necessário garantir o suprimento desse combustível não somente para o abastecimento de veículos de transporte como das termelétricas da região, já que pode haver escassez de energia elétrica e estas são enormemente dependentes do fornecimento de diesel (Paula, 2022).

Ainda que o estado esteja entre os maiores produtores de GNL, em diversas embarcações regionais que operam com motor a diesel ou a gasolina, o responsável substitui o tanque de combustível por botijão de cozinha, colocando em risco a segurança da navegação e de todos os envolvidos (Nogueira; Oliveira Neto, 2022). Segundo os autores, os responsáveis pelas embarcações justificam essa prática alegando ser esta a possibilidade de armazenamento do gás sem contaminantes, afirmando que o diesel e a gasolina são adulterados inúmeras vezes e isso causa problemas nos motores a combustão. Com essa prática, eles empreendem viagens longas sem a necessidade de reabastecimento, reduzindo custos e, em caso de acidentes com a embarcação, o botijão não afunda. Porém, outros acidentes sérios podem ocorrer com o uso do gás em caso de vazamentos ou explosões.

Também no Estado do Amazonas, foram realizados estudos sobre uso do gás natural em balsas, uma das modalidades de transporte de passageiros e cargas que coexistem nas vias fluviais do estado, o que alavancará o mercado regional de transporte aquaviário e auxiliará na redução dos custos do transporte, trazendo benefícios econômicos para o estado (Amazonas Hoje, 2023). As demais modalidades de transportes fluviais são: navio motor, *ferry boat*, navios cargueiros, lancha expresso, entre outras (Queiroz, 2019).

Considerando os vários benefícios para o uso do gás natural e sua relação com meio ambiente, e tendo em vista que o estado do Amazonas, embora esteja entre os principais produtores de GNL no Brasil, não o utiliza em suas embarcações devido à necessidade de uso de tecnologias adequadas como os tanques de armazenamento apropriados, buscou-se prospectar o estado atual de desenvolvimento tecnológico relacionado ao uso de tanques cilíndricos de armazenagem de GNL como fonte de energia para as embarcações.

2 Metodologia

Trata-se de uma pesquisa descritiva, com abordagem quantitativa e qualitativa. Para tanto, coletou-se dados nas bases de documentos literários e de patentes, utilizando os termos de busca dispostos no Quadro 1.

Quadro 1 – Escopo e estratégia da produção científica de artigos e patentes

BASES	EQUAÇÃO DE BUSCA	RESULTADOS
Scopus	(TITLE-ABS-KEY (liquefied AND natural AND gas) OR TITLE-ABS-KEY (lng) AND TITLE-ABS-KEY (storage AND tank) OR TITLE-ABS-KEY (cylinder) AND TITLE-ABS-KEY (vessel) OR TITLE-ABS-KEY (ship) AND TITLE-ABS-KEY (propulsion) OR TITLE-ABS-KEY (power))	120
Orbit – Etapa 1	((Liquefied Natural Gas OR LNG)/TI/AB AND (Storage Tank OR Cylinder)/TI/AB AND (vessel OR ship)/TI/AB AND (Propulsion OR power)/TI/AB)	286
Orbit – Etapa 2	((((Liquefied Natural Gas OR LNG)/TI/AB AND (Storage Tank OR Cylinder)/TI/AB AND (vessel OR ship)/TI/AB AND (Propulsion OR power)/TI/AB) AND (F17C-001/00)/IPC)	81

Fonte: Elaborado pelas autoras deste artigo (2022)

Para familiarização do assunto, inicialmente foram consultados os artigos científicos da Scopus, “um banco de dados de resumos e citações com curadoria especializada” (Elsevier, 2024). Em abril de 2024, nos campos Resumo, Palavras-chave e Título da Base foram inseridos os termos de pesquisa “Liquefied Natural Gas”, “LNG”; “Storage Tank”, “Cylinder”; “vessel”, “ship”. “Propulsion” e “power”, todos combinados com o operador booleano AND para termos adicionais e OR para alternativos. Não se estabeleceu intervalo de tempo, pois a intenção é compreender o período em que os estudos sobre o tema iniciaram. Foram recuperados 120 documentos (Quadro 1). Os resultados das buscas foram tratados no Bibliometrix, que carrega dados de diversas bases, entre elas a *Scopus*. Os dados importados da busca foram organizados segundo o autor, título do documento, afiliação do autor, data de publicação e termos chaves.

No que diz respeito às patentes de produtos e de processos tecnológicos de uso do GNL como combustível em embarcações, também em abril de 2024, utilizou-se a Orbit Intelligence, que permite a pesquisa em diversas bases mundiais e, ao mesmo tempo, trata os dados obtidos (Orbit Intelligence, 2024). Como estratégia de busca utilizou-se os termos semelhantes aos da pesquisa realizada na Scopus (Quadro 1), também sem estabelecer intervalo de tempo. Os resultados foram comparados aos da pesquisa literária para se conhecer o panorama das proteções dos conhecimentos gerados e as instituições interessadas.

Entretanto, muitas patentes retornadas continham pouca ou nenhuma relação com o objetivo proposto. Isso demandou diversos refinamentos até que se chegasse à sintaxe que contempla a utilização do termo GNL e suas variações juntamente com o tipo de tanque do tipo ‘C’ regulamentado pela IMO com configuração cilíndrica. Para esse novo refinamento, adotou-se a Classificação Internacional de Patentes (CIP) F17C. Ainda assim, como

o objetivo é identificar tanques cilíndricos tipo ‘C’ para embarcações de pequeno e médio porte, refinou-se a busca pela ‘semelhança’ (um recurso disponível na Orbit Intelligence), para auxiliar a análise qualitativa. Foram selecionadas as famílias de patentes que aparecem no topo da lista cujos escores de relevância são baseados no grau de similaridade e de frequência dos termos de busca (Axonal, 2020), resultando em 81 patentes, as quais foram selecionadas para este estudo.

3 Resultados e Discussão

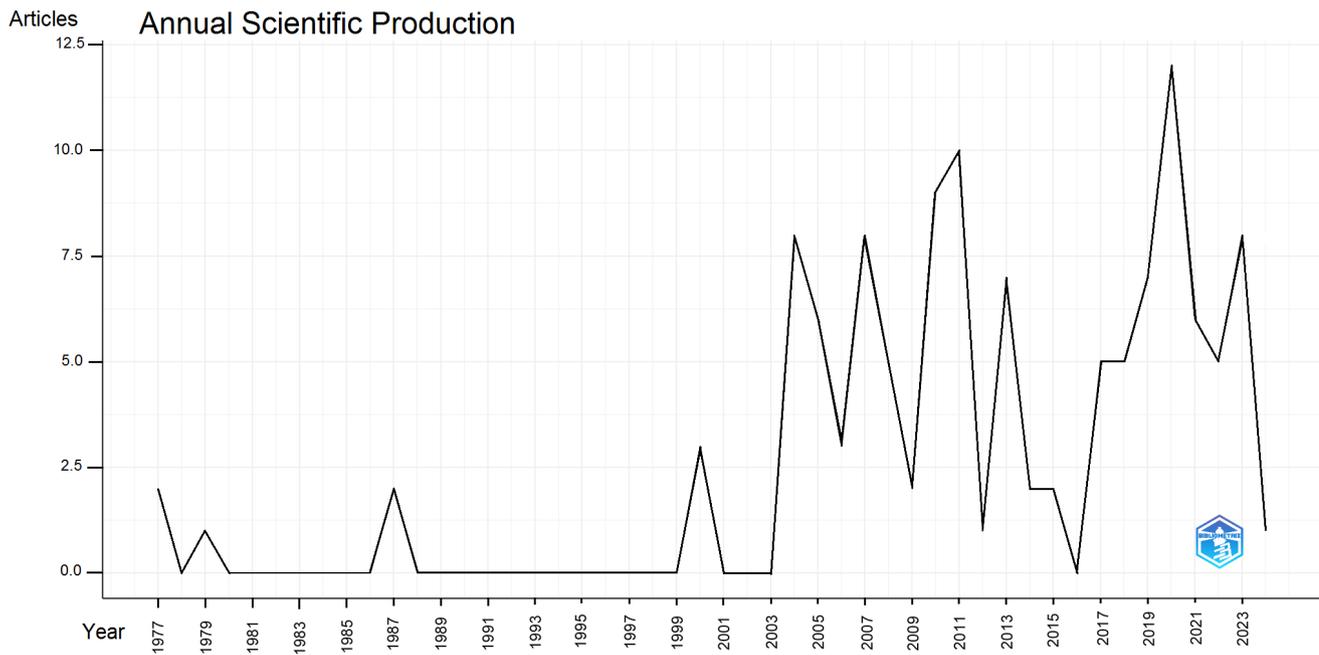
Apresenta-se nesta seção, inicialmente, um breve panorama acerca da evolução de documentos literários em nível mundial. Do mesmo modo, posteriormente, apresenta-se um panorama da evolução dos depósitos de patentes, identificando o domínio tecnológico e os principais mercados e *players*. Pretende-se com esses dados, analisar a viabilidade do uso das tecnologias nas embarcações do Estado do Amazonas, considerando as 81 patentes identificadas.

3.1 Evolução e Cenário dos Documentos Literários e das Patentes sobre Uso de GNL em Embarcações

No que se refere à evolução da produção científica sobre o tema, observa-se pela Figura 1 que as primeiras publicações datam do final da década de 1970, sendo o início dos anos 2000 o intervalo em que a média de publicações é maior.

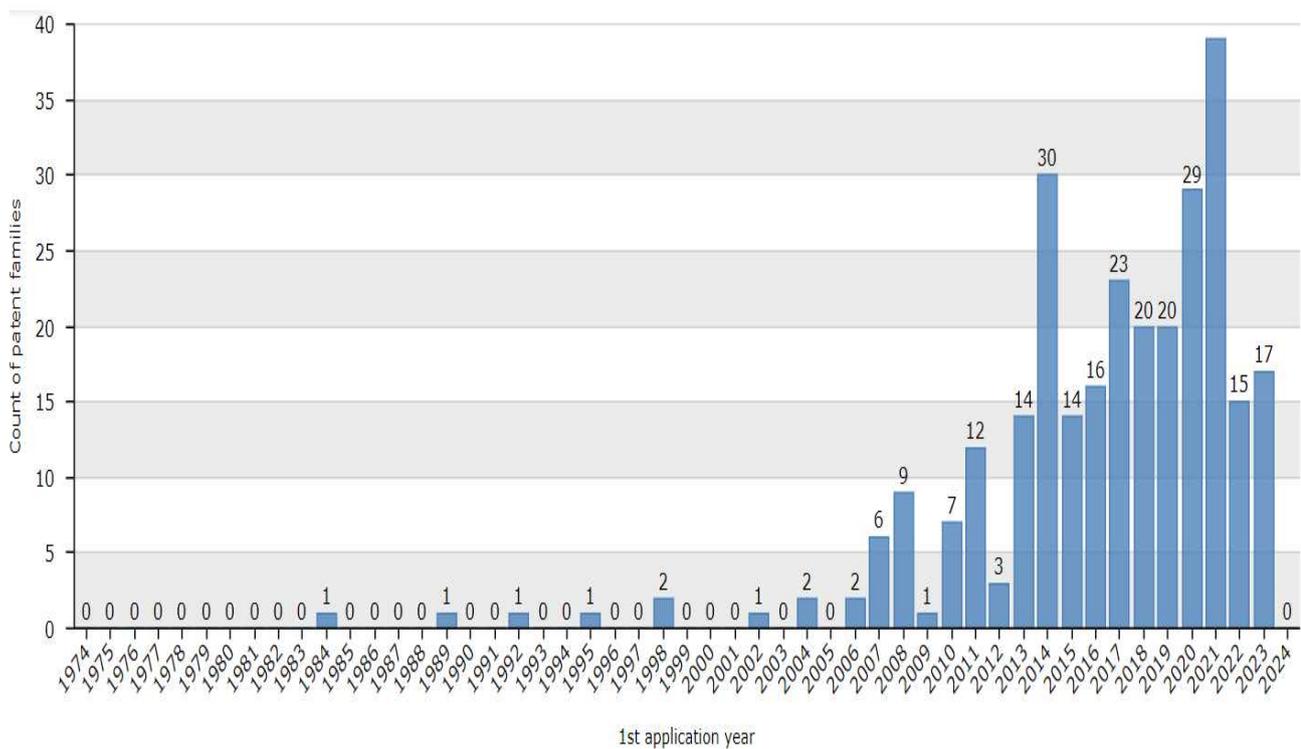
Esse mesmo comportamento se repete quanto aos depósitos de patentes, conforme é possível observar na Figura 2, considerando a opção ‘primeiro depósito’.

Figura 1 – Produção científica sobre o Gás Natural Liquefeito desde o final da década de 1970



Fonte: Scopus (2024)

Figura 2 – Depósito anual de patentes sobre o Gás Natural Liquefeito



Fonte: Orbit Intelligence (2024)

O aumento no interesse por esse tema pode estar relacionado com o início dos debates sobre as questões ambientais. No ano de 1972, foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, em Estocolmo, resultando na elaboração da Declaração de Estocolmo, na qual se reconhece, em nível internacional, a importância dos instrumentos de gestão ambiental para a promoção do desenvolvimento sustentável. A partir desses encontros e em meio a Eco-92, a primeira Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro no ano de 1992, os países industrializados começaram a perceber o impacto negativo das suas tecnologias no meio ambiente, dando início às ideias de preservação, o que atraiu aos poucos a atenção mundial. Ressalta-se que, até a década de 1970, a proteção ambiental era escassa e o meio ambiente era visto somente como um espaço para a satisfação das necessidades e dos interesses humanos (Ignácio, 2020).

Em uma perspectiva estreita sobre o transporte marítimo, argumenta-se que os vários combustíveis com zero e baixo carbono influenciam diretamente na energia global, pois percebeu-se que o consumo global de energia na década de 1990 tem direta ligação com as alterações climáticas, destaca-se que o consumo global de energia teve um aumento anual de 1,7%, percentual triplicado quando comparado aos dados do período de 1970. Desse percentual, a energia fóssil representa 81% da energia total consumida tanto em 1990 como em 2018. Dessa forma, esse aumento do consumo de energias fósseis e a baixa

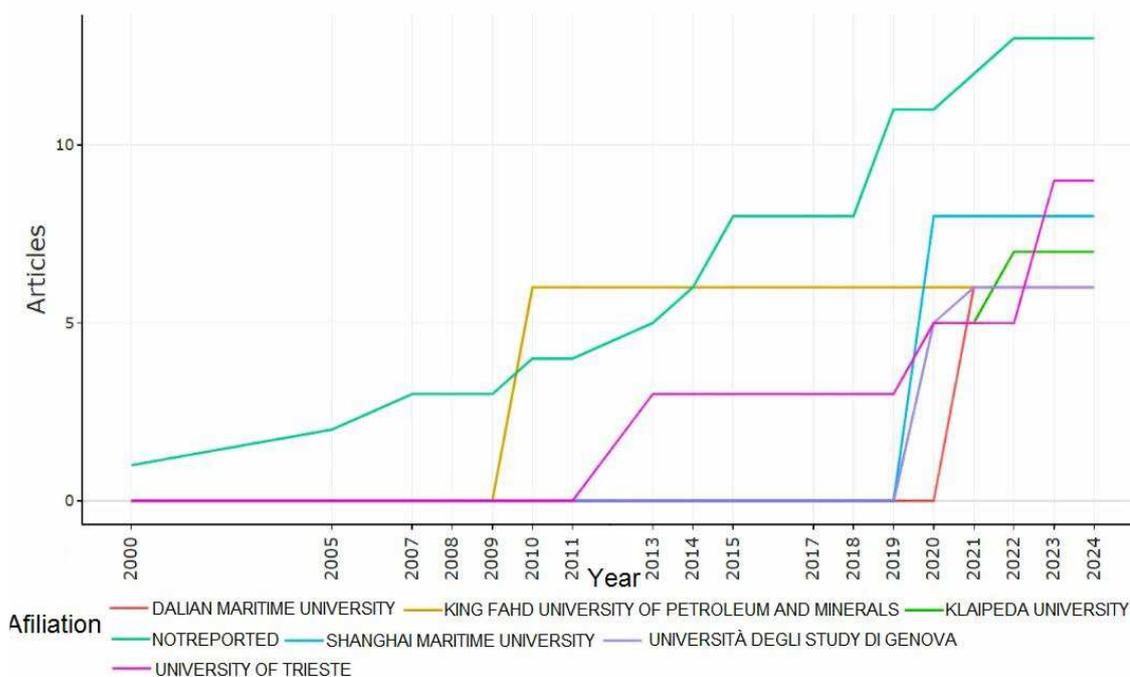
quota do uso de energias renováveis contribuíram para o aumento das emissões mundiais, porém, para que se alcance maior redução global nessas emissões, é necessário nova capacidade e produção de energias renováveis (Lindstad *et al.*, 2021).

O período entre 2011 e 2021 marcou momentos importantes sobre o consumo do gás natural. Durante esse tempo, o consumo de gás natural em todo o mundo expandiu cerca de 25% e foi responsável por 40% do crescimento e do fornecimento de energia primária em todo o mundo – mais do que qualquer outro combustível. Esse rápido crescimento foi sustentado por vários fatores, incluindo a disponibilidade de fornecimento de gás relativamente barato e competitivo em termos de custos, políticas de ar limpo nos mercados em rápido crescimento principalmente na região da Ásia-Pacífico e também devido ao aumento da produção de xisto nos Estados Unidos (IEA, 2023).

Os picos crescentes nos depósitos a partir de 2020, observados na Figura 2, podem ser decorrentes da pressão que os regulamentos da Organização Marítima Internacional (IMO) de 2020 exerce sobre os limites de enxofre para as embarcações, desde que entraram em vigor, aumentaram os interesses no GNL em todo o mundo, pois acredita-se que essa seja uma alternativa promissora para a redução da poluição do ar (Li; He; Gao, 2021).

As instituições que mais publicaram documentos literários sobre o tema são as de origem europeia e asiática, conforme se observa na Figura 3.

Figura 3 – Produção sobre o Gás Natural Liquefeito por afiliação



Fonte: Scopus (2024)

Tem-se a Itália como exemplo de país muito dependente do gás natural, pois o país não extrai uma quantidade suficiente de gás natural para satisfazer seu consumo interno. Assim, a Itália adotou diferentes caminhos para o abastecimento do país de forma a torná-la menos dependente dos países fornecedores de GNL. Foi autorizado o projeto no ano de 1988 do “Terminal de GNL do Adriático” para regaseificação de Gás Natural Liquefeito, o qual teve monitoramento do Ministério do Meio Ambiente italiano que avaliou a compatibilidade ambiental do projeto para verificar possíveis impactos no ambiente marinho associados à construção e à operação da estrutura (Lambert, 2013).

No que se refere às instituições depositantes das patentes relacionadas à tecnologia pesquisada, as instituições asiáticas dominam essa área, conforme se observa na Figura 4.

Os primeiros depósitos foram realizados pela empresa japonesa Kobe Steel, que atua no segmento de ferro e aço (Kobelco, 2024). No entanto, a empresa com maior quantidade de patentes é o estaleiro Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering, de grande porte, com sede em Seul, na Coreia do Sul. O estaleiro constrói navios comerciais (incluindo petroleiros, navios de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), navios de minério, balsas de passageiros, navios de Gás Natural Liquefeito (GNL), navios *roll-on roll-off* e graneleiros) e estruturas *offshore* que incluem navios de perfuração, plataformas fixas, plataformas de perfuração e embarcações flutuantes de armazenamento e descarga (FPSO), estruturas para indústrias de exploração e produção de petróleo e gás, etc. A empresa tem operações no Reino Unido, Noruega, Angola, Grécia, Estados Unidos, Indonésia, Emirados Árabes Unidos, Cingapura, Japão e Brasil (Globaldata, 2023).

Em relação à densidade e à centralidade dos temas, a centralidade indica a importância do tema em todo o campo de pesquisa e a densidade indica o grau de desenvolvimento dos temas, sendo assim, as bolhas representam o tamanho

dos *clusters* (Barreto; Quintella, 2023). Observa-se na Figura 5 alta densidade e alta centralidade (quadrante superior direito) para os temas: gás natural liquefeito, *Boil-Of-Gas* (BOG), tanques, eficiência energética, propulsão de navio, motores a diesel, vasos de pressão, eficiência energética, gás natural comprimido e criogênico.

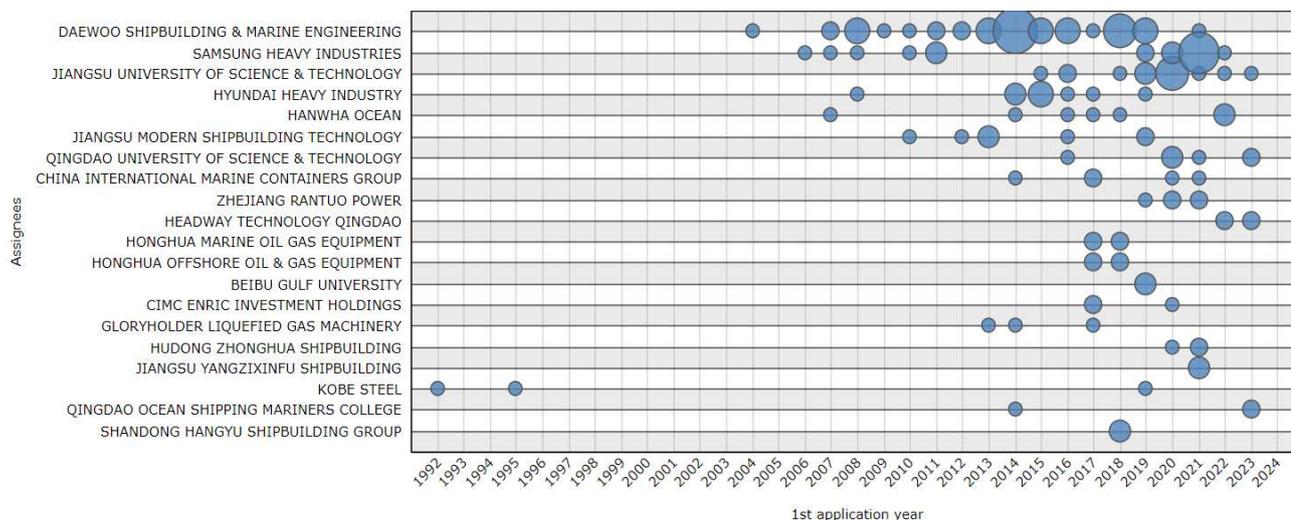
Sobre o *Boil-Off-Gas*, importante mencionar que é uma ocorrência natural em tanques de GNL a bordo de navios. Apesar de os tanques possuírem isolamento de alto nível, há a ocorrência de algum vazamento de gás, pois existe transferência de calor do ambiente para a carga. Esse GNL evaporado é chamado de *Boil-Off-Gas* (BOG), e, dependendo do sistema de isolamento térmico, sua taxa de evaporação ou de ebulição ocorre em cerca de 0,10 a 0,15% em volume por dia (Panagiotopoulos, 2024).

A respeito dos vasos de pressão, estes são usados para armazenar substâncias líquidas ou gasosas sob pressão interna ou externa, que são regularizados pelo Código ASME, que regulamenta a construção de vasos de pressão e delinea a fabricação, os testes e as certificações exigidas. Essas tecnologias são compostas de uma estrutura com cabeçotes, suportes e acessórios adicionais necessários para a aplicações específicas, e cada componente tem uma composição diferente baseada no uso pretendido (American Alloy Fabricators, 2024).

Os temas posicionados no quadrante superior direito, conhecidos como temas-motores, são relevantes para o desenvolvimento e a estruturação do campo de pesquisa (Herrera-Viedma *et al.*, 2020). Observa-se que pesquisas sobre GNL constam nesse quadrante, bem como as relacionadas à propulsão, ao combustível e aos tanques.

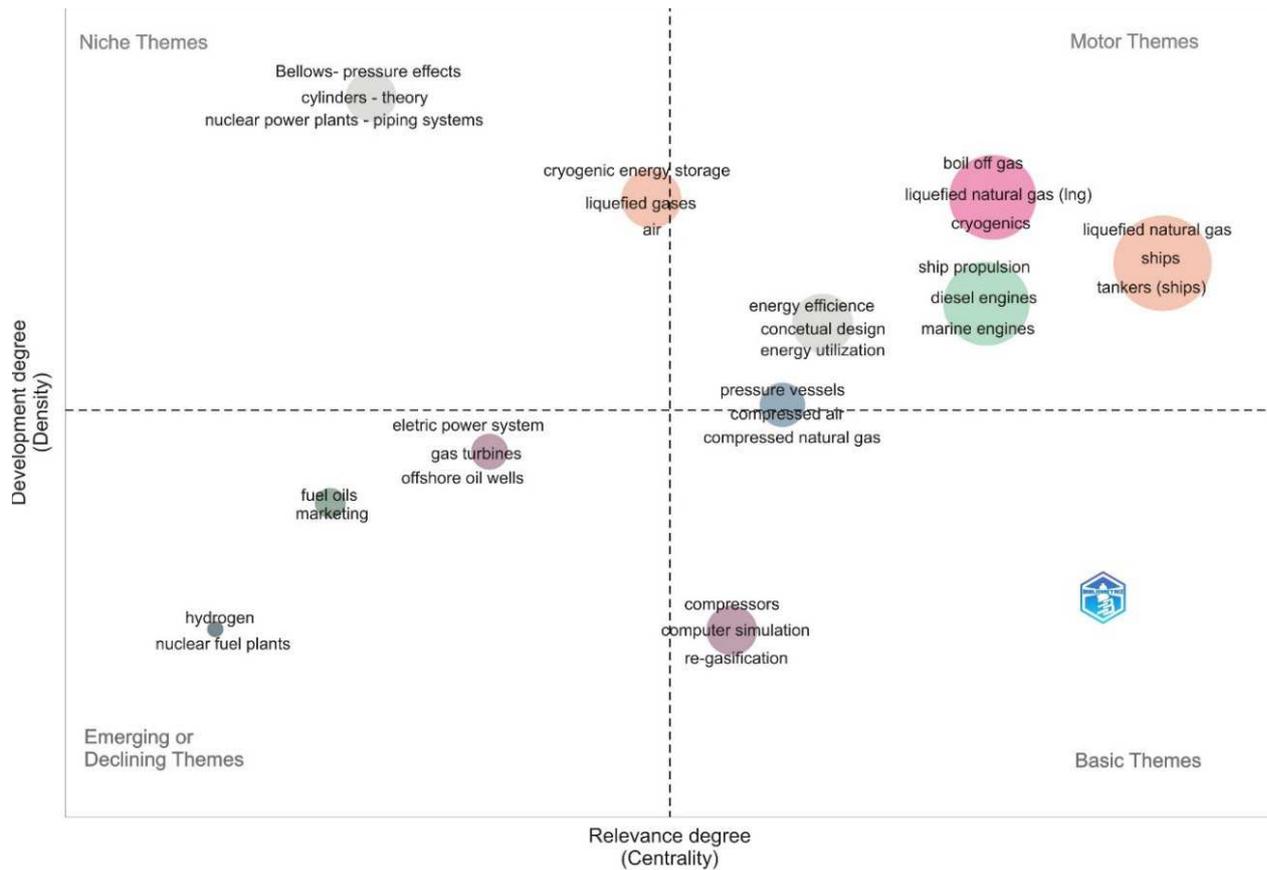
No que se refere aos domínios tecnológicos das patentes depositadas, a Figura 6 mostra a distribuição das patentes de acordo com os principais *players* e o domínio tecnológico.

Figura 4 – Depositantes das patentes relacionadas às tecnologias de tanques de combustíveis de armazenagem de GNL



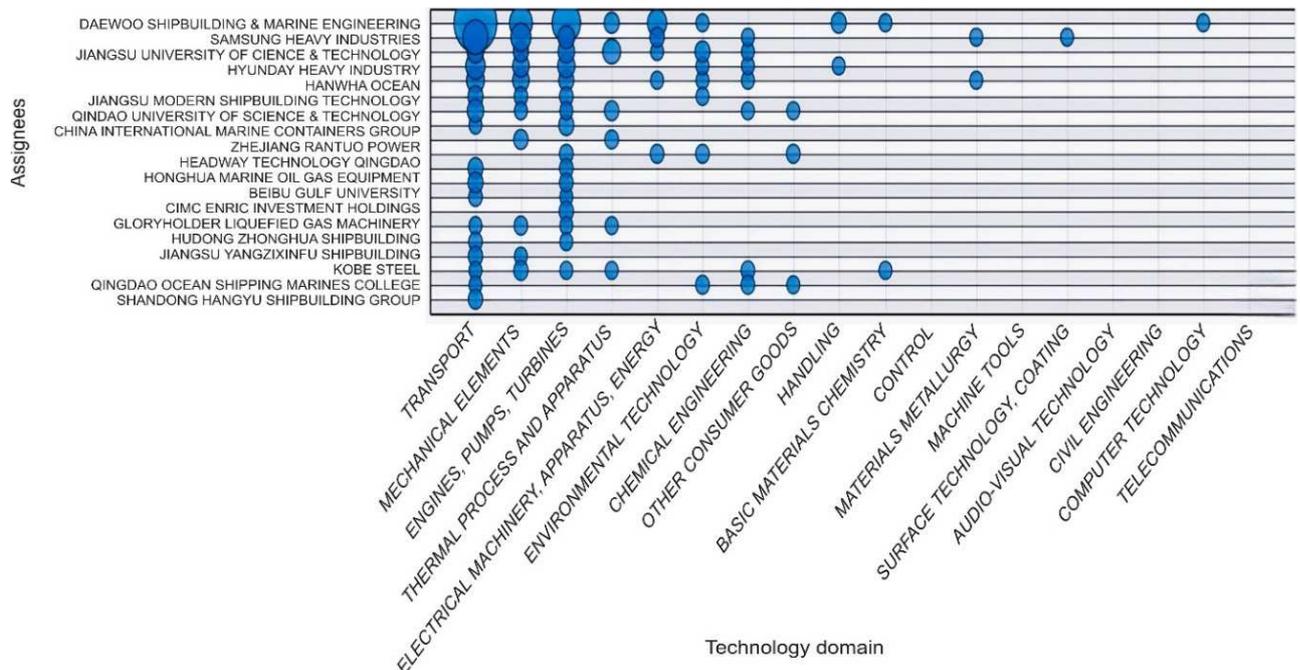
Fonte: Orbit Intelligence (2024)

Figura 5 – Relação da densidade e da centralidade dos temas



Fonte: Scopus (2024)

Figura 6 – Domínio tecnológico acerca do Gás Natural Liquefeito segundo os depositantes



Fonte: Orbit Intelligence (2024)

Observa-se, pela Figura 6, que Transporte e Elementos Mecânicos aparecem entre os primeiros do *ranking* dos domínios tecnológicos e observa-se também que os dez principais *players* são empresas pertencentes à República da Coreia e à China, o que confirma a liderança da Ásia no depósito de tecnologias relacionadas a tanques cilíndricos de GNL como combustível. Cabe destacar ainda que o setor de Elementos Mecânicos ‘abriga’ os tanques cilíndricos de armazenamento de GNL das embarcações movidas a gás. Ainda dentro desse setor, estão os vasos de pressão e os acessórios mecânicos diversos para a sua fabricação, objeto principal desta pesquisa. Uma breve análise dessas tecnologias com potencial de aplicabilidade nas embarcações regionais do Estado do Amazonas é apresentada a seguir.

3.2 Considerações sobre os Tanques para Combustível de GNL e sua Aplicabilidade nas Embarcações do Amazonas

A partir da análise das patentes pesquisadas, foi possível dar início ao levantamento do estado da arte das tecnologias de tanques de armazenagem de GNL como combustível para embarcações e a uma iminente aplicabilidade nas embarcações do Amazonas. A pesquisa retornou diversas tecnologias que abrangem o sistema propulsivo das embarcações movidas a gás, por exemplo: “Sistema de arranjo de tanque de armazenamento de GNL (Gás Natural Liquefeito) e sistema de arranjo de fornecimento de gás de navio de propulsão com duplo combustível”; “Sistema de difusão de tanque de armazenamento de Gás Natural Liquefeito (GNL) de navio movido a GNL”; “Navio monocombustível de GNL (Gás Natural Liquefeito)”; “Estrutura de popa de navio de carga movido a GNL”, “Sistema de armazenamento e abastecimento de combustível para navio de GNL”, entre outras tecnologias referentes ao uso do GNL como combustível em embarcações.

Em relação às tecnologias de tanques de armazenagem de GNL, nos resultados, observou-se que existem alguns deles, como: CN201779441, que se refere a um “Tanque de armazenamento de GNL (Gás Natural Liquefeito) para navio híbrido de óleo diesel-GNL”; CN101915356, que se refere a “Tanque de armazenamento de GNL para navio híbrido diesel-GNL”; CN214875414, que se trata de um “Tanque GNL de terminal duplo”; e CN213036012, que se refere a um “Novo tanque de combustível, navio de transporte de GNL e navio de óleo combustível”, todas tecnologias que podem ser adaptadas para a aplicabilidade em diversas embarcações a depender das suas configurações.

A patente ‘CN201779441’ apresenta a tecnologia de um tanque para duplo combustível, o que favorece a economia de combustível, visto que um navio movido a diesel, por

exemplo, tem consumo considerável de combustível, alto custo de operação e um grave nível de poluição. A tecnologia de energia híbrida (diesel e GNL) possibilitaria uma ampla perspectiva de aplicação em diversas embarcações do Amazonas. Essa patente em questão possui capacidade para armazenamento adequado, além de possuir um bom desempenho de isolamento térmico, o que traz segurança para que o sistema híbrido possa ser usado sem problemas em barcos e navios.

A patente ‘CN213036012’ apresenta um tanque que possui elementos capazes de evitar que haja respingos de GNL durante os movimentos irregulares dos navios enquanto navegam, o que ajuda a conter o desperdício de combustível. Essa patente em questão também possui potencial para aplicabilidade da região amazônica, pois a área possui uma navegabilidade irregular devido aos obstáculos com os quais as embarcações podem se deparar no trajeto de suas viagens, como troncos de árvores, pedras, entre outras situações que podem causar vários solavancos na embarcação. Um tanque com essas características traria resultados benéficos para essas embarcações.

As tecnologias de tanques cilíndricos analisadas representam o ponto de partida para a compreensão do estado da arte dos tanques cilíndricos de armazenagem de GNL como combustível para as embarcações ao se vislumbrar uma futura aplicação nas embarcações do Amazonas, trazendo inúmeros benefícios para o setor aquaviário, para a comunidade como um todo, além de atender às demandas de sustentabilidade e de meio ambiente.

4 Considerações Finais

Neste estudo prospectivo, buscou-se conhecer o estado atual de desenvolvimento tecnológico dos tanques cilíndricos de armazenagem de GNL como combustível em embarcações para provável aplicabilidade no Amazonas. Com esse intuito, foi realizado levantamento de artigos científicos na base de dados Scopus para entender a evolução da produção científica sobre o uso do GNL como combustível no setor marítimo, os mercados e os fatores socioambientais. Também foram realizadas buscas de patentes na plataforma Orbit Intelligence, apresentando tecnologias abrangentes sobre o tema que servem como ponto de partida para pesquisas mais delimitadas.

Discutiu-se sobre os resultados das buscas, quanto à situação das tecnologias supracitadas no cenário mundial, suas características principais e as tecnologias com potencial de aplicabilidade no setor aquaviário do Amazonas. Ressalta-se que a Ásia e a Europa são os continentes que mais se destacam quanto às produções técnicas e científicas, uma vez que utilizam em grande escala o gás natural na movimentação de sua economia. Além do mais, a China,

por possuir grande expressividade na construção de navios e ainda para atender às recomendações da Organização Marítima Internacional quanto à redução nas emissões, vem se especializando cada vez mais em tecnologias promissoras sobre o uso do GNL, o que pode ser útil também para boas referências sobre a inovação do setor aquaviário do Amazonas.

Conclui-se que o uso do gás natural como combustível alternativo nas embarcações do Estado do Amazonas é viável desde que de forma segura e regularizada e não de maneira imprudente com o uso de vasilhames improvisados. O resultado da pesquisa pode servir de referência para decisões dos demandantes do setor aquaviário e demais setores relacionados que formulam planos estratégicos para potenciais avanços tecnológicos no setor beneficiando todo o estado.

5 Perspectivas Futuras

Ao reforçar a viabilidade do uso do gás natural como combustível alternativo nas embarcações do estado, este estudo mostra que é possível atender às orientações da Organização Marítima Internacional, a qual recomenda melhorias nas emissões geradas pelos navios. Ao adotar tecnologias de redução de emissões, o setor marítimo inova e se mantém competitivo no mercado global.

Trazendo a análise para o contexto local, na região amazônica, o transporte aquaviário depende amplamente de combustíveis líquidos tradicionais, como diesel e gasolina, devido à infraestrutura já estabelecida e à capilaridade da rede de distribuição. O fornecimento de gás natural para abastecimento na cidade de Manaus, por exemplo, é feito pela empresa CIGÁS há mais de dez anos, e o consumo do gás natural vem aumentando consideravelmente no estado, principalmente pelas usinas termelétricas que, somente em 2021, consumiram 4,69 milhões de m³/dia, enquanto o consumo industrial foi de 145,9 mil m³/dia, o que representa um aumento de mais de 26% em relação ao ano anterior (Nogueira; Oliveira Neto, 2022). Esses números reforçam que as usinas termelétricas estão substituindo o óleo diesel pelo gás natural.

Entretanto, essa dependência representa um desafio para a introdução de alternativas energéticas, especialmente em uma região com vasta extensão e logística complexa. A transição para o uso do Gás Natural Liquefeito (GNL) no setor aquaviário se apresenta como uma oportunidade de inovação tecnológica, com impactos positivos na redução de emissões e na sustentabilidade ambiental. Essa transformação, no entanto, exige um planejamento estratégico escalonado em curto, médio e longo prazo para superar os obstáculos atuais e consolidar a nova matriz energética. Nesse sentido, foram apontadas as seguintes implementações tecnológicas, a curto, médio e longo prazos

A curto prazo, a infraestrutura e a adoção inicial seria consolidada. A introdução do GNL no transporte aquaviário pode ser viabilizada em rotas em que o gás natural já esteja disponível, facilitando a adaptação gradual. Especificamente, frotas que operam entre as cidades do Amazonas, Itacoatiara e Coari, as quais apresentam um cenário favorável para o uso de GNL, considerando a proximidade com as bacias de grandes reservas de gás natural na região, o que contemplaria:

- 1) Desenvolvimento de Terminais de Abastecimento: a instalação de terminais de abastecimento de GNL em pontos estratégicos nessas rotas permitirá o atendimento das embarcações que transitam entre Itacoatiara e Coari, municípios que deverão ser dotados de capacidade para atender à demanda inicial de GNL e assegurar a autonomia necessária para as embarcações de pequeno e médio porte que operam nessas localidades.
- 2) Adaptabilidade das Frotas Existentes: a tecnologia de conversão para GNL inicialmente seria focada em embarcações que possam ser readequadas para a nova matriz, reduzindo os custos de adaptação. Essa abordagem permitiria uma experiência operacional mais controlada e possibilitaria ajustes conforme a necessidade de desempenho e segurança.
- 3) Capacitação e Regulamentação: a introdução do GNL requer capacitação técnica para operação e manutenção das embarcações adaptadas e dos terminais de abastecimento. Paralelamente, é necessária a criação de regulamentações específicas que incentivem o uso seguro e sustentável do GNL.

A médio prazo, o uso em embarcações menores e a infraestrutura de apoio se expandiria. Com a consolidação inicial e um melhor entendimento das demandas logísticas e tecnológicas, o médio prazo envolveria o avanço do GNL para embarcações menores e a expansão da rede de abastecimento para atender a novas rotas na Amazônia, assim sendo, seria necessário:

- 1) Ampliação do Alcance das Estações de Suprimento: com terminais de abastecimento em funcionamento, dessa forma, seria possível expandir a cobertura do GNL para embarcações menores, que passariam a ter autonomia para navegar em torno dessas estações.
- 2) Incentivo à Produção de Embarcações Adaptadas: além da adaptação de frotas existentes, haveria o incentivo à construção de novas embarcações projetadas para operar com GNL, permitindo o desenvolvimento de uma frota aquaviária mais eficiente e alinhada à sustentabilidade energética da região.

- 3) Pesquisa e Desenvolvimento (P&D): o avanço do uso de GNL no transporte aquaviário demandaria investimentos contínuos em P&D, explorando novas tecnologias para o aumento na eficiência do GNL e a compatibilidade com as condições ambientais da Amazônia, além de possíveis associações com outras fontes renováveis.

A longo prazo, o transporte para longas distâncias e a introdução do hidrogênio se ampliaria. Espera-se que a tecnologia de GNL avance ao ponto de ser viável para embarcações de grande porte e longas rotas, como as que realizam a cabotagem e conectam Manaus com os principais portos do Brasil, como Belém e Porto Velho, desse modo, pode-se vislumbrar o seguinte:

- 1) Expansão para Embarcações Maiores: com o desenvolvimento e o fortalecimento da infraestrutura de GNL na Amazônia, tornando-se possível adaptar o uso desse combustível para embarcações maiores e para rotas de longo alcance, seria possível as operações de cabotagem e de conexão interestadual.
- 2) Integração com Portos Nacionais: embarcações que conectam Manaus aos principais portos nacionais poderiam, a longo prazo, aproveitar uma infraestrutura de abastecimento nacional de GNL. Essa abordagem expandiria o uso de GNL para rotas mais extensas e integraria a Amazônia ao sistema de transporte aquaviário sustentável em todo o Brasil.
- 3) Transição para o Hidrogênio: a infraestrutura estabelecida para o GNL poderá, futuramente, ser utilizada para distribuição de hidrogênio. Esse processo poderia envolver a produção de hidrogênio a partir de fontes locais, como a reforma de derivados de petróleo e gás da própria região e de hidrogênio verde, proveniente das usinas hidrelétricas e parques fotovoltaicos disponíveis. Essa transição representa um passo importante para um transporte aquaviário de baixíssimo impacto ambiental na Amazônia, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade e de descarbonização a longo prazo.

Ao reunir as informações das análises feitas neste estudo, é possível vislumbrar a possibilidade da adaptação tecnológica para a introdução de sistemas de armazenagem de GNL em embarcações regionais amazônicas. O que representa uma iniciativa de grande impacto ambiental e econômico, no entanto, essa tarefa exige um esforço significativo em pesquisa, desenvolvimento e inovação. A maioria das embarcações utilizadas atualmente é totalmente adaptada para o armazenamento de diesel e gasolina, o que significa que a transição para o uso de cilindros de GNL envolve não apenas modificações nos sistemas de

armazenagem e propulsão, mas também uma revisão estrutural e técnica em cada modelo de embarcação.

Essas adaptações demandam estudos detalhados sobre a viabilidade e segurança do GNL como fonte de energia para as embarcações fluviais. Será necessário avaliar aspectos como a resistência dos materiais e componentes que constituirão os novos cilindros de armazenamento, especialmente considerando as condições climáticas e hídricas da Amazônia, como temperaturas elevadas, alta umidade e contato frequente com água doce e sedimentos. Outro ponto crítico é a estabilidade das embarcações com os novos sistemas de armazenagem, uma vez que o GNL possui características físicas e de densidade diferentes do diesel e da gasolina, impactando a distribuição de peso e o centro de gravidade das embarcações.

Além disso, é indispensável a união com as instâncias reguladoras e fiscalizadoras, incluindo o Inmetro, a Marinha do Brasil e a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (Antaq) para alinhamento das futuras ações. Essas instituições terão um papel fundamental na criação de normas e diretrizes que garantirão a segurança e a sustentabilidade do uso de GNL na navegação regional. A construção de normativas específicas, como padrões para os cilindros de GNL, regulamentos de segurança para manuseio e transporte do combustível, além de protocolos de manutenção e inspeção das embarcações adaptadas, são passos essenciais para o avanço dessa iniciativa. Esses regulamentos deverão ser robustos e atualizados regularmente, com base nas inovações e nas descobertas tecnológicas que o próprio processo de adaptação trará.

A viabilização desse projeto envolve ainda o desenvolvimento de uma cadeia de fornecimento de GNL eficiente e segura, que suporte o abastecimento regular e economicamente viável das embarcações na Amazônia. Esse processo demandará colaborações entre o setor público, as empresas de transporte e os fornecedoras de gás, além de possíveis incentivos governamentais para mitigar os custos iniciais da transição energética.

Portanto, a adaptação dos sistemas de armazenagem de GNL nas embarcações fluviais da Amazônia é um processo que, embora desafiador, representa uma oportunidade única para impulsionar a sustentabilidade na região. Com o esforço coordenado entre inovação tecnológica, regulamentação e parcerias estratégicas, é possível que essa transição contribua para uma matriz energética mais limpa, eficiente e integrada com as necessidades ambientais e socioeconômicas da Amazônia e, ainda, prospecte a realização de trabalhos futuros que possam falar dessa temática para o maior aprofundamento do tema, visto que os estudos existentes são incipientes no país. Há a necessidade de mais abordagens relacionadas às diversas alternativas energéticas, sobre as mais vantajosas e as desvantajosas tanto do ponto de vista econômico como ambiental. Espera-

se também que os sistemas mundiais de transformação científica melhorem os resultados das pesquisas para a promoção de novas tecnologias de armazenagem do GNL e, quiçá, de outros combustíveis promissores.

Agradecimentos

As autoras agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (Fapeam) pelo Programa de Apoio à Pós-Graduação *Stricto Sensu* (Posgrad). Agradecem ainda ao professor Dr. Nelson Kuwahara, da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), pelas orientações iniciais para esta pesquisa.

Referências

- AMAZONAS HOJE. Sedecti destaca avanço para o transporte hidroviário em estudo sobre uso do gás natural em balsas. **Portal de Notícias**, 23 de julho de 2023. Disponível em: <https://amazonashoje.com.br/noticias/sedecti-destaca-avanco-para-o-transporte-hidroviario-em-estudo-sobre-uso-do-gas-natural-em-balsas/>. Acesso em: 7 mar. 2024.
- AMERICAN ALLOY FABRICATORS, Inc. **Custom Metal Fabrication Experts – Pressure Vessels**. 2024. Disponível em: <https://americanalloyfab.com/>. Acesso em: 16 abr. 2024.
- AXONAL. **Navegação Geral, Busca, Seleção, Exportação**. 2020. Oficina I. Disponível em: www.axonal.com.br/arquivos/PDF/Oficina_1_Busca_Visualizacao_Exportacao_Questel_Orbit.pdf. Acesso em: 30 abr. 2024.
- BARRETO, W. A.; QUINTELLA, C. M. Transporte Hidroviário: uma análise de Revisão Sistemática Patentária e de Literatura (RSL) sobre os impactos da Internet das Coisas no contexto das cidades inteligentes pós-ODS 11. **Cadernos de Prospecção**, Salvador, v. 16, n. 6, p. 1.863-1.878, 2023. DOI: 10.9771/cp.v16i6.52127. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/nit/article/view/52127>. Acesso em: 29 out. 2024.
- BOGAERT, H. **An experimental investigation of sloshing impact physics in membrane LNG tanks on floating structures**. 2018. 275f. Dissertação (Mestrado) – Delft University of Technology, Delft, Holanda, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4233/uuid:96870b88-e07b-4ec2-8bd4-ef2cd3713568>. Disponível em: <https://research.tudelft.nl/en/publications/an-experimental-investigation-of-sloshing-impact-physics-in-membr>. Acesso em: 29 out. 2024.
- ELSEVIER. **Scopus**: banco de dados de resumos e citações multidisciplinar, abrangente e confiável. Seção Produtos Scopus, 2024. Disponível em: <https://www.elsevier.com/pt-br/products/scopus>. Acesso em: 24 maio 2024.
- GLOBALDATA, Oil and gas industry overall contract value drops by 26% QoQ during Q3 2023, reveals GlobalData. **Oil & Gas**, 13 nov. 2023. Disponível em: <https://www.globaldata.com/media/oil-gas/oil-gas-industry-overall-contract-value-drops-26-qoq-q3-2023-reveals-globaldata/>. Acesso em: 20 abr. 2024.
- HERRERA-VIEDMA, E. *et al.* Global trends in coronavirus research at the time of Covid-19: A general bibliometric approach and content analysis using SciMAT. **El Profesional de la Información**, [s.l.], n. 29, v. 3, jun. 2020.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Medium-Term Gas Report 2023, Including the Gas Market Report (Q4-2023)**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/medium-term-gas-report-2023>. Acesso em 25 abr. 2024.
- IGNÁCIO, J. ECO-92: o que foi a conferência e quais foram seus principais resultados? **Politize!** 24 de novembro de 2020. Disponível em: <https://www.politize.com.br/eco-92/>. Acesso em: 1º abr. 2024.
- KOBELCO. **About us**. 2024. Disponível em: <https://www.kobelco-welding.jp/portuguese/company/index.html>. Acesso em: 24 abr. 2024.
- LAMBERT, C. V. *et al.* An environmental monitoring plan for the construction and operation of a marine terminal for regasifying Liquefied Natural Gas (LNG) in the North Adriatic Sea. In: HUGHES, T. B. (ed.). **Mediterranean sea: ecosystems, economic importance and environmental threats**. [S.l.]: Nova Science Publisher, 2013. p. 115-133.
- LI, T.; HE, X.; GAO, P. Analysis of offshore LNG storage and transportation technologies based on patent informatics. **Cleaner Engineering and Technology**, [s.l.], v. 5, 100317, 2021. Elsevier. Disponível em: [sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790821002779](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790821002779). Acesso em: 5 abr. 2024.
- LINDSTAD, E. *et al.* Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels. **Elsevier, Transportation Research**, [s.l.], art D 101, 103075, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920921003722>. Acesso em: 20 abr. 2024.
- NOGUEIRA, R. J. B.; OLIVEIRA NETO, T. O. A Geografia do Gás na Amazônia Brasileira. **Revista GeoAmazônia**, Belém, v. 10, n. 20, p. 224-250, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/geoamazonia/article/view/13666>. Acesso em: 27 out. 2024.
- OLIVEIRA, D. **Propulsão a Gás para Balsas**. Portos e Navios, Indústria Naval. Publicado em 20 mar. 2019. Disponível em: <https://www.portosenavios.com.br/noticias/ind-naval-e-offshore/propulsao-a-gas-para-balsas>. Acesso em: 24 fev. 2024.

ORBIT INTELLIGENCE. **Orbit**. 2024. Disponível em: <https://www.orbit.com/#PatentRegularAdvancedSearchPage>. Acesso em: 1º abr. 2024.

PANAGIOTOPOULOS, N. K. **Investigation of BOG management during marine LNG transport focusing on its use for ship propulsion**. 2024. 117f. Tese (Department of Naval Architecture) – University of West Attica School of Engineering, Athens, 2024.

PAULA, A. **Desafios do Abastecimento na Amazônia: falta de segurança no transporte aquaviário de combustíveis é alarmante**. Rio de Janeiro: Instituto Combustível Legal, 2022. Disponível em: <https://institutocombustivellegal.org.br/desafios-do-abastecimento-na-amazonia-falta-de-seguranca-no-transporte-aquaviario-de-combustiveis-e-alarmanete/>. Acesso em: 30 abr. 2024.

QUEIROZ, K. O. Transporte fluvial no Solimões – uma leitura a partir das lanchas Ajato no Amazonas. **Portal de Revistas da USP**, 18 de julho de 2019. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/133370>. Acesso em: 24 fev. 2024.

SCOPUS. **Página de busca**. 2024. Disponível em: <https://www.scopus.com/home.uri>. Acesso em: 24 fev. 2024.

SEA-LNG. Leading Maritime Decarbonisation. **News & Views**, 18 de janeiro de 2024. Disponível em: <https://sea-lng.org/2024/01/lng-leading-maritime-decarbonisation/>. Acesso em: 30 abr. 2024.

SPLASH. Why LNG Represents a Bridge of Pragmatism On Shipping’s Road to Decarbonisation. **Portal de Notícias Setoriais**, Contributions, 10 maio de 2018. Disponível em: <https://splash247.com/lng-represents-bridge-pragmatism-shippings-road-decarbonisation/>. Acesso em: 30 abr. 2024.

ZHANG, Y. *et al.* Shipping emissions and their impacts on air quality in China. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 581-582, p. 186-198. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969716327851>. Acesso em: 25 abr. 2024.

Sobre as Autoras

Vera Lucia Lima Gomes

E-mail: veralucial@yahoo.com.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0982-4570>

Mestre em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação pela Universidade Federal do Amazonas em 2024.

Endereço profissional: Rua Teófilo Otoni, n. 63, 11º andar, Centro, Rio de Janeiro, RJ. CEP: 20090-080.

Rosana Zau Mafra

E-mail: rosanazau@ufam.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7133-9824>

Doutora em Gestão da Inovação em Biotecnologia pela Universidade Federal do Amazonas em 2018.

Endereço profissional: Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de Estudos Sociais, Departamento de Economia, Câmpus Universitário, Av. Rodrigo Otávio, n. 6.200, Coroado, Setor Norte, Manaus, AM. CEP: 69080-900.