

MODELO DE GESTÃO COLABORATIVA NA CADEIA DE SUPRIMENTOS MARÍTIMA: REINTEGRAÇÃO CIRCULAR DO N² NA PRODUÇÃO DE AMÔNIA COMO ESTRATÉGIA SUSTENTÁVEL

Caio Pereira - FGV EAESP

Daianne Oliveira Andrade - Fundação Getúlio Vargas - FGV

Resumo

A transição energética no setor marítimo exige soluções sustentáveis e inovadoras frente às crescentes pressões regulatórias e ambientais. Em 2018 a navegação respondeu por emissões com volume estimado em 1.076 Mt de CO₂, figurando com equivalência às emissões anuais de potências industriais como Japão e Alemanha. Nesse cenário, a amônia desponta como alternativa promissora de combustível para navegação por sua elevada densidade energética e ausência de carbono na combustão, contudo, sua queima gera nitrogênio molecular (N₂), usualmente descartado. O modelo conceitual proposto é o principal produto deste estudo e foi elaborado através de abordagem qualitativa e exploratória, articulando revisão bibliográfica seletiva com análise de cadeias complexas. O modelo estruturou-se em três camadas complementares e interdependentes: (i) a gestão colaborativa da cadeia de suprimentos; (ii) os fluxos técnicos operacionais para captura e reintegração do N₂ ao ciclo produtivo; (iii) a infraestrutura institucional e o sistema de ciência, tecnologia e inovação. Ao articular elementos técnicos e organizacionais em um modelo de governança circular, a proposta oferece uma nova lente para a administração de cadeias complexas, conectando armadores, fornecedores de tecnologia, produtores de amônia, agências reguladoras da navegação, políticas públicas, e cooperação entre universidades e empresas.

Palavras-chave: Logística Marítima Sustentável, Cadeia de Suprimentos Colaborativa, Economia Circular**Abstract**

The energy transition in the maritime sector demands sustainable and innovative solutions in the face of increasing regulatory and environmental pressures. In 2018, shipping accounted for an estimated 1,076 Mt of CO₂ emissions, a volume equivalent to the annual emissions of major industrial powers such as Japan and Germany. In this context, ammonia emerges as a promising alternative fuel for shipping due to its high energy density and carbon-free combustion. However, its burning releases molecular nitrogen (N₂), which is usually discarded. The conceptual model proposed is the main outcome of this study and was developed through a qualitative and exploratory approach, combining a selective literature review with an analysis of complex supply chains. The model is structured into three complementary and interdependent layers: (i) the collaborative management of the supply chain; (ii) the technical-operational flows for capturing and reintegrating N₂ into the production cycle; and (iii) the institutional infrastructure and the science, technology, and innovation (ST&I) system. By articulating technical and organizational elements in a circular governance model, the proposal offers a new lens for managing complex supply chains, connecting shipowners, technology providers, ammonia producers, maritime regulatory agencies, public policies, and university industry cooperation.

Keywords: Sustainable Maritime Logistics, Collaborative Supply Chain, Circular Economy

MODELO DE GESTÃO COLABORATIVA NA CADEIA DE SUPRIMENTOS MARÍTIMA: REINTEGRAÇÃO CIRCULAR DO N₂ NA PRODUÇÃO DE AMÔNIA COMO ESTRATÉGIA SUSTENTÁVEL

1 INTRODUÇÃO

A transição para modelos de negócio sustentáveis impõe desafios estratégicos às organizações que operam cadeias logísticas globais. No setor marítimo, responsável por mais de 80% do comércio internacional, a pressão por descarbonização intensifica-se diante das metas regulatórias e das demandas de stakeholders por práticas ambientais responsáveis (IMO, 2023; ICCT, 2020). Em 2018 o transporte marítimo respondeu por aproximadamente 1.076 Mt de CO₂, volume equivalente às emissões anuais de países como Japão ou Alemanha (Olmer et al., 2017; IEA, 2021) tornando-se um alvo para ações de mitigação de emissões.

Neste cenário, a adoção de combustíveis alternativos como a amônia representa não apenas uma resposta tecnológica, mas uma inflexão estratégica na gestão da cadeia de suprimentos naval (Bertagni et al., 2023). A amônia, por sua alta densidade energética e ausência de carbono em sua queima, desponta como vetor promissor para o transporte marítimo de longo curso (IEA, 2021). No entanto, sua combustão libera nitrogênio molecular (N₂) em grande escala, que, apesar de inerte, representa um recurso subutilizado (Bocken et al., 2016). O reaproveitamento desse subproduto oferece uma oportunidade de inovação circular com potencial para aumentar a eficiência logística e reduzir a dependência de insumos primários na produção de novos combustíveis (Bocken et al., 2014; Adebayo et al., 2024).

Diante disso, a seguinte pergunta de pesquisa orienta este estudo: como o reaproveitamento do N₂ gerado na combustão da amônia pode ser integrado, de forma circular, à cadeia de suprimentos do transporte marítimo, promovendo eficiência energética e redução de impactos ambientais? Para responder a essa questão, este estudo propõe a construção de um modelo conceitual baseado nos princípios da economia circular e da logística sustentável. A metodologia qualitativa de natureza conceitual para a construção do modelo estrutura-se em duas etapas: uma revisão bibliográfica seletiva e uma de formulação dedutiva do modelo.

Do ponto de vista acadêmico, o artigo contribui com o campo da administração ao introduzir um modelo analítico original que conecta sustentabilidade logística, economia circular e inovação setorial. No plano prático, oferece um arcabouço estratégico para armadores, formuladores de políticas e *stakeholders* interessados em implementar soluções regenerativas no setor marítimo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Economia Circular e Modelos de Negócio Sustentáveis

A economia circular tem sido incorporada como uma abordagem estratégica

de gestão capaz de transformar modelos de negócios tradicionais ao promover a reintegração de recursos, extensão do ciclo de vida dos produtos e aumento da eficiência operacional. Mais do que uma solução técnica, trata-se de um novo paradigma organizacional que visa gerar valor sustentável a partir da redução de resíduos, inovação em processos e colaboração entre atores da cadeia. Esse conceito, amplamente discutido por autores como Kirchherr et al. (2017) e Geissdoerfer et al. (2017), apresenta-se como estratégia fundamental para lidar com os desafios ambientais e econômicos contemporâneos.

No contexto da administração, a circularidade se manifesta como fundamento para novos modelos de negócios, que priorizam o uso eficiente de recursos e a geração de valor compartilhado. Bocken et al. (2014) classificaram os modelos de negócios circulares em oito arquétipos de sustentabilidade, representando padrões estratégicos para orientar organizações na transição de modelos lineares para circulares. Os autores defenderam que ao adotar essas estratégias, as organizações ampliam sua capacidade de inovação e se posicionam de maneira proativa frente às transformações regulatórias e de mercado associadas à economia de baixo carbono. A figura 1 demonstra os arquétipos de modelos de negócios propostos por Bocken et al. (2014).

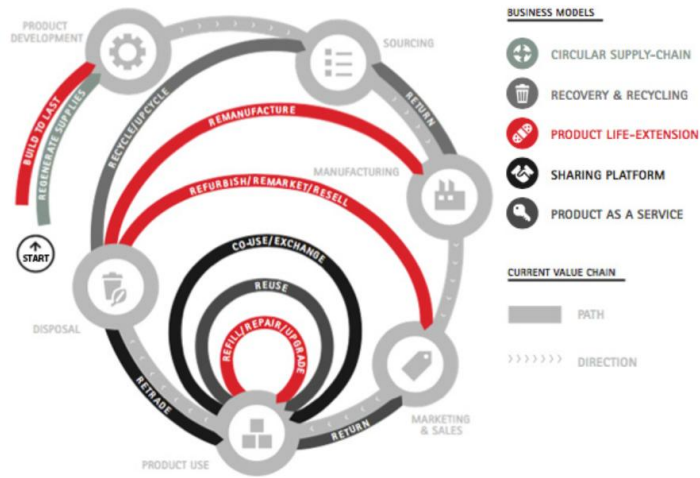
Figura 1– Abordagem metodológica da pesquisa

Groupings	Technological			Social			Organisational	
	Maximise material and energy efficiency	Create value from waste	Substitute with renewables and natural processes	Deliver functionality rather than ownership	Adopt a stewardship role	Encourage sufficiency	Repurpose for society/ environment	Develop scale up solutions
Archetypes	Low carbon manufacturing/ solutions	Circular economy, closed loop	Move from non-renewable to renewable energy sources	Product-oriented PSS - maintenance, extended warranty	Biodiversity protection	Consumer Education (models); communication and awareness	Not for profit	Collaborative approaches (sourcing, production, lobbying)
	Lean manufacturing	Cradle-2-Cradle	Solar and wind-power based energy innovations	Use oriented PSS- Rental, lease, shared	Consumer care - promote consumer health and well-being	Demand management (including cap & trade)	Hybrid businesses, Social enterprise (for profit)	Incubators and Entrepreneur support models
	Additive manufacturing	Industrial symbiosis	Zero emissions Initiative	Result-oriented PSS- Pay per use	Ethical trade (fair trade)	Slow fashion	Alternative ownership: cooperative, mutual, (farmers) collectives	Licensing, Franchising
	De-materialisation (of products/ packaging)	Reuse, recycle, re-manufacture	Blue Economy	Private Finance Initiative (PFI)	Choice editing by retailers	Product longevity	Social and biodiversity regeneration initiatives ('net positive')	Open innovation (platforms)
	Increased functionality (to reduce total number of products required)	Take back management	Biomimicry	Design, Build, Finance, Operate (DBFO)	Radical transparency about environmental/ societal impacts	Premium branding/ limited availability	Base of pyramid solutions	Crowd sourcing/ funding
		Use excess capacity	The Natural Step	Chemical Management Services (CMS)	Resource stewardship	Frugal business	Localisation	"Patient / slow capital" collaborations
		Sharing assets (shared ownership and collaborative consumption)	Slow manufacturing			Responsible product distribution/ promotion	Home based, flexible working	
		Extended producer responsibility	Green chemistry					

Fonte: Bocken et al. (2014)

Lacy e Rutqvist (2015) também estudaram modelos de negócios sustentáveis e propuseram 5 estratégias gerenciais circulares: cadeia de suprimentos circular, recuperação e reciclagem, extensão da vida útil do produto, compartilhamento de plataformas e produtos operados como serviço. A figura 2 ilustra as estratégias propostas.

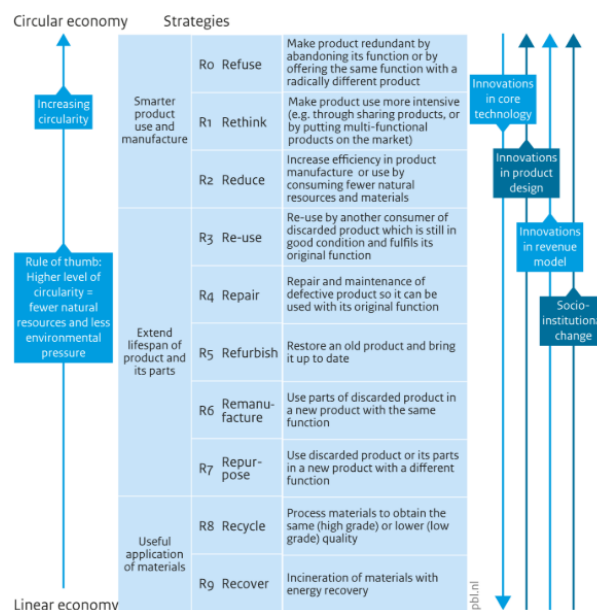
Figura 1 – 5 Estratégias de Negócio Circulares



Fonte: Lacy e Rutqvist (2015)

Potting et al. (2017) propuseram um framework ilustrativo, que classificou as ações circulares em nove níveis estratégicos. No topo da hierarquia residiram as estratégias de recusar (R0) e repensar (R1), que eliminam ou transformam a necessidade de consumo por meio de abordagens como modelos “as-a-service” e design funcional radicalmente distinto. Em seguida, ações para reduzir, reutilizar e reparar, voltadas à extensão da vida útil dos produtos. As estratégias intermediárias, como remanufatura e repurpose, permitem a re inserção de componentes com novas funções. Por fim, práticas como reciclagem e recuperação de energia compõem os níveis mais baixos de circularidade, pois demandavam mais energia e resultavam em maior perda de valor dos materiais. A figura 3 ilustra o modelo de Potting et al. (2017).

Figura 3– Estratégias Circulares na cadeia de produção em ordem de prioridade

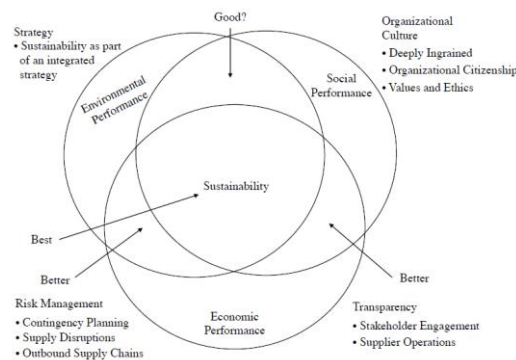


Fonte: Potting et al. (2017)

2.2 Logística Sustentável e *Green Supply Chain Management*

A logística desempenha um papel estratégico na promoção da economia circular, especialmente em setores complexos operacionalmente e intensivos em recursos, como o marítimo. A abordagem de *Green Supply Chain Management* (SSCM) representa uma evolução do modelo tradicional ao incorporar critérios ambientais e sociais, além dos econômicos, na gestão das cadeias de suprimentos. Fundamentado nos princípios do *Triple Bottom Line* (TBL), esse modelo busca simultaneamente eficiência financeira, redução de impactos ambientais e promoção de práticas sociais responsáveis ao longo da cadeia (Carter & Rogers, 2008).

Figura 2– Gestão Sustentável da Cadeia de Suprimentos



Fonte: Carter & Rogers (2008)

No setor marítimo, essa perspectiva é ainda mais relevante diante da elevada contribuição para as emissões de gases de efeito estufa. A gestão sustentável da cadeia de suprimentos (SSCM) requer estratégias colaborativas entre os atores organizacionais, orientadas à criação de valor ambiental, econômico e social (Pagell & Wu, 2009). Genovese et al. (2017) evidenciaram que a transição para uma economia circular exige o redesenho sistêmico das cadeias de suprimentos, o que implica não apenas alterações em processos produtivos, mas, sobretudo, uma reconfiguração dos fluxos logísticos. Isso inclui o desenvolvimento de capacidades específicas para a captura, reutilização e redistribuição de subprodutos, promovendo ciclos fechados de materiais e aumentando a resiliência das operações.

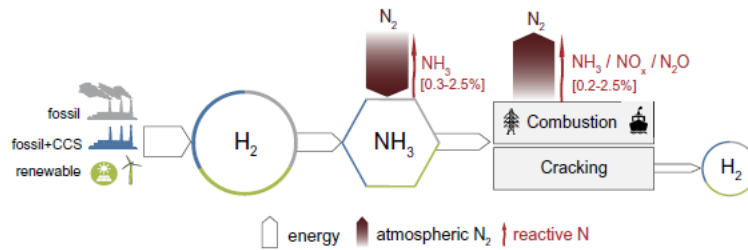
2.3 Cadeia de Valor da Amônia e Gestão de Subprodutos

A cadeia de valor da amônia passa a ser reconfigurada com a ascensão desse composto como vetor energético na transição marítima (IEA, 2021). Bertagni et al. (2023) discutiram os desafios e oportunidades relacionados à circularidade do nitrogênio no contexto da economia do uso da amônia como vetor energético. Os autores enfatizaram que, apesar do potencial da amônia como combustível livre de carbono, seu uso em larga escala pode gerar desequilíbrios no ciclo do nitrogênio, devido à liberação de subprodutos como NO_x e ao descarte não reaproveitado do N_2 .

O estudo recomendou uma abordagem sistêmica para mitigar esses impactos, sugerindo a reintegração de subprodutos à cadeia de valor por meio de tecnologias de captura, purificação e reuso. Destacou-se a importância de repensar o desenho da cadeia de suprimentos da amônia para promover eficiência ambiental,

evitando o desperdício de insumos e reduzindo os riscos de impactos climáticos e ecotoxicológicos. Essa proposta está alinhada aos princípios da economia circular, ao passo que exige colaboração entre diferentes setores industriais e uma infraestrutura regulatória e tecnológica robusta para viabilizar a circularidade dos subprodutos nitrogenados. A figura 3 ilustra a cadeia de valor da amônia e seu potencial impacto sobre o ciclo do nitrogênio.

Figura 3– Cadeia de valor da amônia e seu potencial impacto sobre o ciclo do nitrogênio

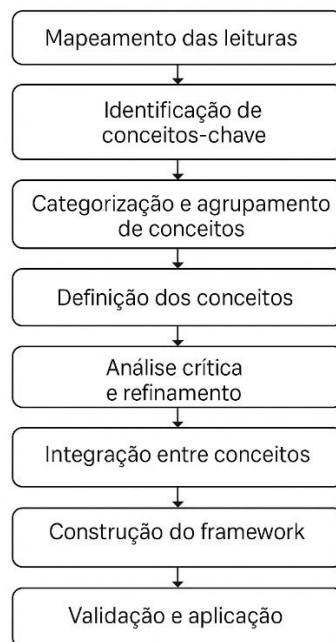


Fonte: Bertagni et al. (2023)

2.4 Modelagem Conceitual na Administração

A modelagem conceitual representa uma abordagem consolidada na área de Administração para estruturar fenômenos complexos de forma visual e analítica. Segundo Jabareen (2009), modelos conceituais funcionam como construções teóricas dedutivas que permitem integrar múltiplas dimensões de análise, servindo como arcabouço explicativo e propositivo. No campo da logística e sustentabilidade, essa metodologia é particularmente útil para propor soluções que articulem inovação, circularidade e colaboração interorganizacional.

Figura 4– Fluxo de Elaboração de Framework Conceitual



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Jabareen (2009)

3 METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem qualitativa, exploratória e de natureza conceitual, voltada à proposição de um modelo teórico integrado de reaproveitamento de N₂ na cadeia de suprimentos marítima. A lógica metodológica do artigo segue um caminho dedutivo, ancorado na articulação de fundamentos teóricos já consolidados na literatura em Administração, com o objetivo de construir uma estrutura analítica aplicável a desafios contemporâneos de sustentabilidade logística. A pesquisa foi estruturada em duas etapas principais descritas a seguir.

3.1 Etapa 1 - Revisão teórica

A primeira etapa consistiu em uma revisão bibliográfica seletiva, com o objetivo de identificar os principais conceitos e domínios necessários à construção do modelo. Três eixos teóricos foram priorizados: (i) Economia circular aplicada à logística e à energia, com base em *frameworks* estratégicos de regeneração de recursos e modelos de negócio circulares (Bocken et al., 2014; Geissdoerfer et al., 2017; Kirchherr et al., 2017); (ii) Cadeia de valor da amônia, considerando sua aplicação como combustível marítimo e os fluxos materiais associados à sua síntese e combustão (IEA, 2021; Bocken et al., 2016); (iii) Práticas e tecnologias de reaproveitamento de subprodutos gasosos, especialmente aplicadas a gases inertes como N₂, já adotadas em setores como semicondutores, metalurgia e alimentos (Kong et al., 2022; Bertagni, et al., 2023).

A seleção dos estudos seguiu critérios de relevância teórica, aplicabilidade setorial e contribuição à proposta de inovação logística, conforme recomendações de Seuring & Gold (2012) para estudos teóricos em gestão da cadeia de suprimentos.

3.2 Etapa 2 - Construção dedutiva do modelo conceitual

A segunda etapa envolveu a elaboração de um modelo conceitual integrado, com base nas categorias analíticas identificadas na revisão. A lógica de construção segue os princípios de desenvolvimento teórico por meio da articulação de eixos explicativos interdependentes (Jabareen, 2009), resultando em uma proposta original que articula três camadas principais:

1. Camada técnico-operacional, que representa o fluxo circular de reaproveitamento do N₂ como subproduto da combustão da amônia;
2. Camada de gestão da cadeia de suprimentos, que identifica principais stakeholders, seus papéis e as interfaces de governança colaborativa;
3. Camada institucional e de ciência, tecnologia e inovação (CT&I), que destaca os elementos regulatórios e institucionais necessários para viabilizar a proposta em escala.

3.3 Objetivo e Contribuição da Proposição Conceitual

A construção do modelo teve como objetivo representar, de forma lógica e visual, uma solução estratégica baseada em economia circular, capaz de gerar valor ambiental, econômico e operacional para o setor marítimo. A proposta é apresentada

no Capítulo 4 deste artigo, como produto do percurso teórico e analítico, e representa uma contribuição original ao campo da Administração, especialmente nas subáreas de logística sustentável e gestão de cadeias complexas. A Tabela 1 demonstra de forma ilustrativa a metodologia aplicada nesse estudo.

Tabela 1– Modelo ilustrativo da metodologia aplicada

Etapas	Eixos Teóricos/Camadas	Referências
Etapa 1 - Revisão teórica	Economia circular aplicada à logística e à energia, com base em frameworks estratégicos de regeneração de recursos e modelos de negócio circulares	Bocken et al., 2014 Geissdoerfer et al., 2017 Kirchherr et al., 2017
	Cadeia de valor da amônia, considerando sua aplicação como combustível marítimo e os fluxos materiais associados à sua síntese e combustão	IEA, 2021 Bocken et al., 2016
	Práticas e tecnologias de reaproveitamento de subprodutos gasosos, especialmente aplicadas a gases inertes como N ₂ , já adotadas em setores como semicondutores, metalurgia e alimentos	Kong et al., 2022 Bertagni, et al., 2023
Etapa 2 - Construção dedutiva do modelo conceitual	Camada técnico-operacional, que representa o fluxo circular de reaproveitamento do N ₂ como subproduto da combustão da amônia	Jabareen, 2009
	Camada de gestão da cadeia de suprimentos, que identifica os principais stakeholders, seus papéis e as interfaces de governança colaborativa	
	Camada institucional e de ciência, tecnologia e inovação (CT&I), que destaca os elementos regulatórios e institucionais necessários para viabilizar a proposta em escala	

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

4 PROPOSIÇÃO DO MODELO CONCEITUAL

A construção do modelo conceitual proposto neste artigo segue uma lógica dedutiva, partindo da articulação entre dois domínios teóricos centrais da Administração: (i) a gestão colaborativa da cadeia de suprimentos, e (ii) os sistemas institucionais de ciência, tecnologia e inovação (CT&I) aplicados à sustentabilidade logística. A integração dessas dimensões sustenta a proposição de um modelo sistêmico de reaproveitamento do N₂ gerado na combustão da amônia, voltado à cadeia de suprimentos do transporte marítimo.

4.1 Fundamentos Administrativos do Modelo

No eixo da gestão da cadeia, o modelo reconhece a interdependência de diversos atores estratégicos, armadores, produtores de amônia, fornecedores de tecnologia e reguladores, cuja atuação coordenada é condição essencial para a operacionalização da circularidade. Essa perspectiva está alinhada à literatura de *Supply Chain Sustainability* (Carter & Rogers, 2008), que enfatiza o papel da governança colaborativa como mecanismo para viabilizar inovações sustentáveis. Em contextos complexos como o setor marítimo, a lógica linear tradicional precisa ser substituída por arranjos Interorganizacionais regenerativos, nos quais o reaproveitamento de subprodutos não é uma externalidade tratada isoladamente, mas um componente integrado da estratégia da cadeia.

Complementarmente, o modelo considera o papel do sistema institucional e

de inovação (CT&I) como fator habilitador para a difusão da solução. Baseando-se na abordagem de sistemas de inovação setorial (Malerba, 2002), se reconhece que normas internacionais (como as da IMO), políticas públicas de incentivo à circularidade e estruturas de cooperação universidade empresa são determinantes para que tecnologias como a captura e compressão de N₂ sejam incorporadas em larga escala na logística marítima. Essas estruturas institucionais oferecem tanto a pressão regulatória quanto os instrumentos de apoio para viabilizar o modelo em contextos operacionais reais.

4.2 Estrutura do Modelo: Camadas e Interações

O modelo conceitual proposto organiza-se em três camadas inter-relacionadas, estruturadas para representar os principais elementos operacionais, estratégicos e institucionais que sustentam a circularidade do N₂ na cadeia logística marítima. Cada camada se articula com as demais, formando um sistema integrado que transforma o subproduto gasoso da combustão da amônia em um insumo reaproveitado na própria cadeia.

4.2.1 Camada de Gestão da Cadeia de Suprimentos

Esta camada contempla os principais agentes organizacionais responsáveis por viabilizar o reaproveitamento do N₂ no contexto da navegação. Os armadores, como operadores diretos da frota marítima, surgem como usuários finais do combustível e potenciais demandantes de soluções circulares, dada a crescente pressão por redução de emissões. Em paralelo, os produtores de amônia têm interesse estratégico na reintegração do N₂ como insumo secundário, otimizando seus processos produtivos. Fornecedores de tecnologia desempenham papel fundamental ao viabilizar as etapas técnicas da proposta, como a separação, purificação e compressão do gás, por meio de soluções industriais adaptadas ao ambiente marítimo. (Fahimnia et al., 2015).

A lógica operacional proposta para essa camada segue os princípios da gestão sustentável da cadeia de suprimentos (*Sustainable Supply Chain Management*, SSCM), que enfatizam a importância da cooperação interorganizacional para a criação de valor compartilhado. Conforme argumentaram Pagell e Wu (2009), cadeias sustentáveis requerem modelos de governança colaborativa que integrem objetivos econômicos, ambientais e sociais. Nesse sentido, a solução proposta se ancora em uma abordagem sistêmica, que reconhece a interdependência entre os elos da cadeia e propõe formas de articulação baseadas na confiança, inovação tecnológica e corresponsabilidade ambiental.

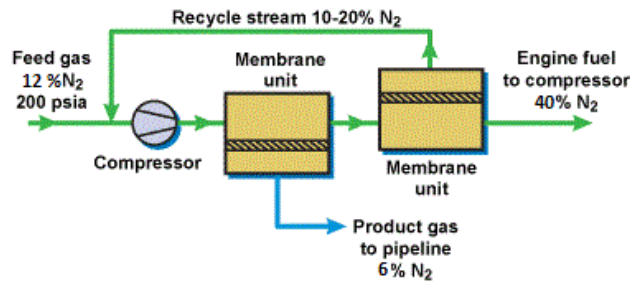
4.2.2 Camada Técnico-Operacional: Reaproveitamento do N₂

Esta é a camada central do modelo, onde ocorre o fluxo circular físico. Ela representa os processos que compõem o reaproveitamento do nitrogênio molecular (N₂), tradicionalmente emitido como subproduto inerte da queima de amônia em motores marítimos. O ciclo conceitual proposto envolve três etapas principais: captura, compressão e reintegração do N₂.

A primeira etapa consiste na separação do nitrogênio do fluxo de gases resultante da combustão da amônia. Tecnologias como membranas seletivas de gás,

exemplificadas por sistemas como o NitroSep™ e processos de Adsorção por Oscilação de Pressão (PSA) vêm sendo amplamente utilizados em outras indústrias para a separação eficiente de N₂, especialmente no setor de gás natural (MTR, 2023). Essas tecnologias são capazes de purificar o nitrogênio para reuso industrial, tornando-se, assim, viáveis para aplicação futura no setor marítimo e energético. A figura 5 ilustra o processo NitroSep™ sugerido para etapa de separação.

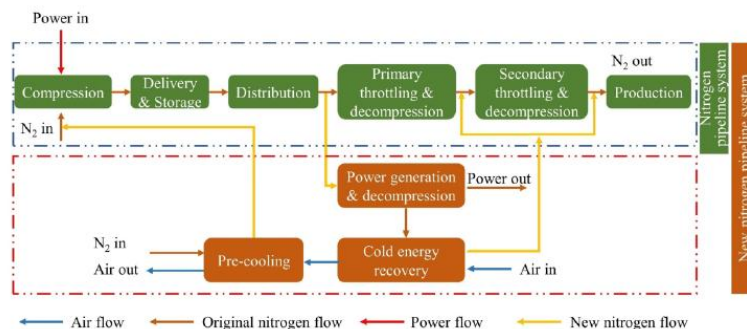
Figura 5 – Processo de Separação NitroSep™



Fonte: MTR (2023)

Na etapa seguinte, o nitrogênio capturado é comprimido para fins de armazenamento e transporte. Para viabilizar o reaproveitamento do N₂ proveniente da combustão da amônia, é necessária a compressão do gás para adequar sua pressão às exigências dos processos industriais subsequentes. A compressão pode ser realizada em múltiplos estágios, com resfriamento intermediário, para garantir a pureza do N₂ e a eficiência energética do sistema. Além disso, Kong et al. (2022) propuseram um modelo de recuperação de energia de pressão em sistemas de reciclagem de nitrogênio podendo reduzir significativamente o consumo energético da compressão e aumentando ainda mais a eficiência global do processo. A figura 6 ilustra a proposta deles de otimizada da compressão do N₂ economizando energia.

Figura 6 – Fluxo original x novo fluxo de compressão de N₂ otimizado

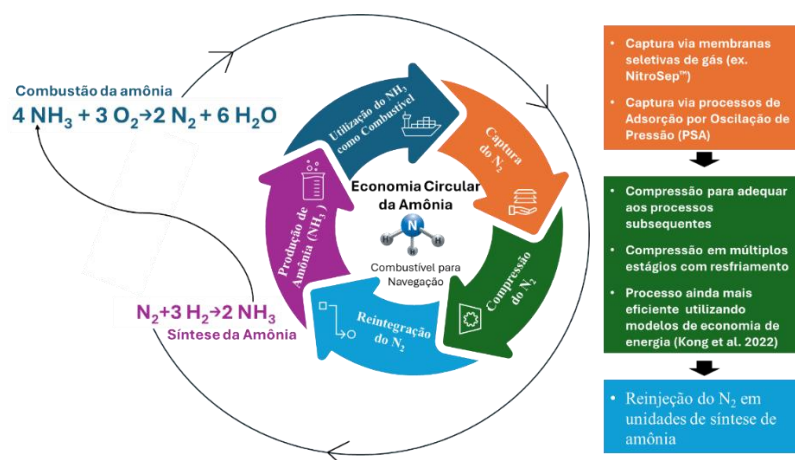


Fonte: Kong et al. (2022)

Por fim, o N₂ purificado é reintegrado em cadeias produtivas como insumo estratégico para a ressíntese de amônia (NH₃), repetindo o ciclo de produção e distribuição. Portanto, se propõe um ciclo fechado de valorização do N₂, em que o resíduo gasoso da combustão da amônia passa a ser reconectado a cadeia produtiva de NH₃ como combustível de navegação, criando sinergias entre setores e aumentando a eficiência do sistema energético. A figura 7 ilustra o reaproveitamento

do N₂ da combustão da amônia e reutilização como combustível na navegação.

Figura 7 –Reaproveitamento do N₂ da combustão da NH₃ e reutilização na navegação



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

4.2.3 Camada Institucional e de Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I)

A implementação em larga escala de modelos circulares no setor marítimo depende de um ecossistema institucional robusto, capaz de criar as condições habilitadoras para a inovação. Nesse contexto, destacam-se os instrumentos regulatórios internacionais, como os índices da IMO, *Carbon Intensity Indicator* (CII) e *Energy Efficiency Existing Ship Index* (EEXI), que impõem limites progressivos às emissões dos navios, estimulando o desenvolvimento de soluções tecnológicas limpas (Kirchherr et al., 2017; Genovese et al., 2017). Políticas públicas de fomento à transição energética e à circularidade como incentivos fiscais, linhas de crédito verdes e fundos para inovação são igualmente relevantes para reduzir o risco tecnológico e viabilizar o investimento privado em novas soluções (Lacy & Rutqvist, 2015). Tais políticas devem ser coordenadas em nível nacional e internacional, promovendo sinergia entre regulação ambiental, desenvolvimento econômico e inovação industrial (Carter & Rogers, 2008).

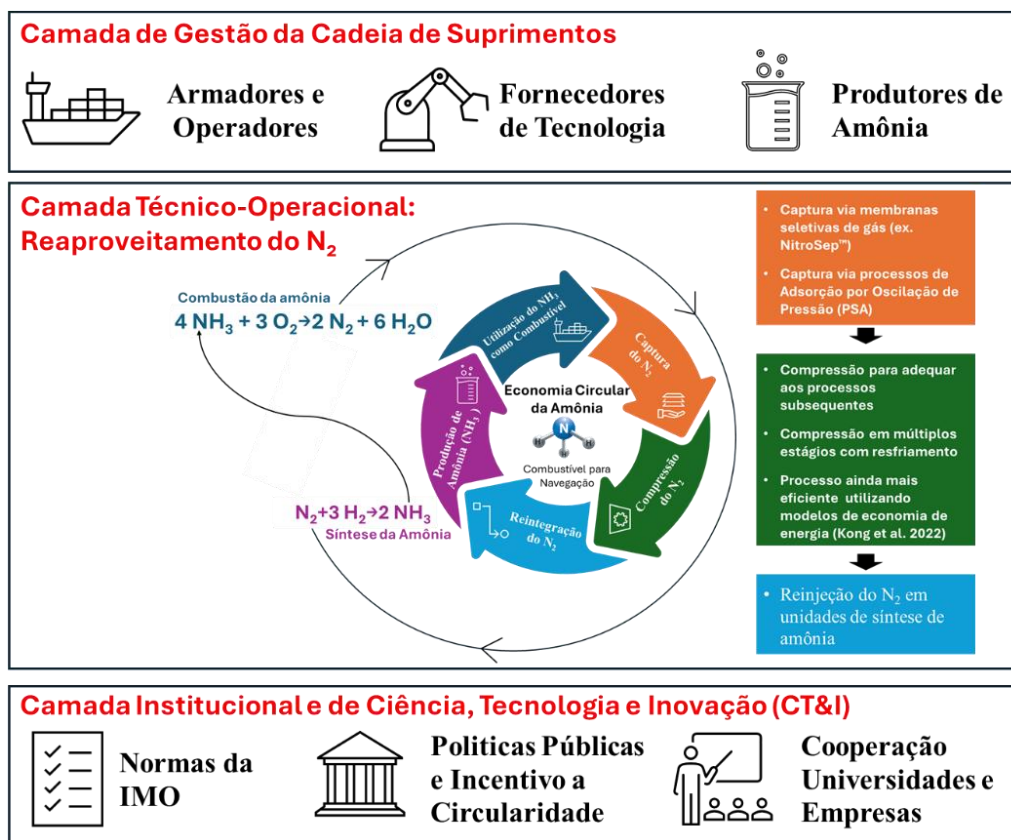
Além do arcabouço regulatório e financeiro, o fortalecimento da cooperação universidade empresa é essencial para transformar conhecimento científico em soluções aplicadas. A perspectiva da hélice quádrupla reforça a importância da articulação entre governo, academia, setor produtivo e sociedade civil no processo de inovação (Carayannis & Campbell, 2009). A estruturação de redes colaborativas, centros de demonstração tecnológica e programas de transferência de conhecimento são estratégias eficazes para acelerar a adoção de modelos circulares (Malerba, 2002). Assim, esta camada institucional e de CT&I constitui não apenas o pano de fundo normativo da proposta, mas também o motor de sua viabilidade futura, uma vez que alinha os interesses estratégicos da indústria à agenda global de descarbonização e sustentabilidade (Bocken et al., 2014).

4.3 Representação Gráfica do Modelo

A Figura 8 representa o modelo conceitual de forma sintética e visual, conectando os três domínios discutidos, gestão colaborativa da cadeia de

suprimentos, camada técnico operacional e o ecossistema institucional de suporte.

Figura 8 – Modelo Conceitual de Circularidade do N₂ na Cadeia Logística Marítima



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

5 CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

A transição energética no setor marítimo impõe desafios complexos e interdependentes, demandando soluções que integrem inovação tecnológica, sustentabilidade ambiental e governança colaborativa. Neste contexto, o presente estudo propôs um modelo conceitual de reaproveitamento do N₂ gerado na combustão da amônia, estruturado com base na lógica da economia circular e voltado à cadeia de suprimentos do transporte marítimo.

A proposta resulta de uma abordagem metodológica dedutiva, ancorada em fundamentos da administração em especial, nos campos da logística sustentável, gestão de cadeias complexas e sistemas de inovação. O modelo articula três camadas interdependentes: (i) gestão da cadeia de suprimentos, com foco nos atores organizacionais e nas interfaces de governança necessárias para viabilizar a circularidade; (ii) técnico-operacional, representando o fluxo de captura, compressão e reintegração do N₂; (iii) camada institucional e de ciência, tecnologia e inovação (CT&I), que oferece o suporte regulatório, técnico e financeiro à implementação do modelo.

Do ponto de vista acadêmico, o artigo contribui ao campo da administração ao oferecer uma estrutura analítica aplicável à discussão sobre sustentabilidade na

cadeia logística marítima, conectando os conceitos de economia circular, inovação setorial e estratégia organizacional. A proposta amplia os debates teóricos ao incorporar gases inertes como o nitrogênio, frequentemente negligenciados nas análises tradicionais de emissões, como elementos estratégicos para a eficiência sistêmica.

No plano prático, o modelo oferece aos formuladores de políticas, armadores, produtores de amônia e desenvolvedores de tecnologia um modelo conceitual para a operacionalização da circularidade no reaproveitamento de subprodutos gasosos. A criação de valor ambiental e econômico depende da colaboração entre os elos da cadeia, da adaptação de tecnologias já disponíveis e da existência de mecanismos institucionais de fomento à inovação.

Apesar de seu potencial transformador, o modelo proposto enfrenta desafios relevantes para sua concretização. Entre eles, destacam-se a complexidade técnica da purificação e compressão do N₂ em ambientes embarcados, a necessidade de padronização regulatória internacional e os custos associados à implementação inicial das tecnologias requeridas. Além disso, aspectos relacionados à coordenação interorganizacional e à assimetria de capacidades tecnológicas entre os elos da cadeia podem limitar a adoção em larga escala. Neste sentido, pesquisas futuras devem explorar estratégias de mitigação desses entraves, com ênfase em análises de viabilidade técnica e econômica, estudos de caso em diferentes contextos logísticos, e investigações sobre modelos de negócios sustentáveis que viabilizem a circularidade do N₂.

Por fim, reconhece-se que este é um modelo teórico conceitual e que futuras pesquisas devem se debruçar sobre sua validação empírica, estimativas de viabilidade econômica e impacto ambiental. A quantificação dos fluxos de N₂ e a simulação de cenários logísticos possuem potencial promissor para transformar a proposta em soluções concretas, ampliando sua aplicabilidade em contextos reais do transporte marítimo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adebayo, Y. A., Ikevuje, A. H., Kwakye, J. M., & Esiri, A. E. (2024). Circular economy practices in the oil and gas industry: A business perspective on sustainable resource management. *GSC Advanced Research and Reviews*, 20(3), 267–285. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2024.20.3.0353>
- Batista, L., Bourlakis, M., Smart, P., & Maull, R. (2019). In search of a circular supply chain archetype—a content-analysis-based literature review. *Production Planning & Control*, 30(10–12), 353–369. <https://doi.org/10.1080/09537287.2017.1343502>
- Bertagni, M. B., Socolow, R. H., Martirez, J. M. P., Carter, E. A., Greig, C., Ju, Y., Lieuwen, T., Mueller, M. E., Sundaresan, S., Wang, R., Zondlo, M. A., & Porporato, A. (2023). Minimizing the impacts of the ammonia economy on the nitrogen cycle and climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(46), e2311728120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2311728120>

- Bocken, N. M. P., Short, S. W., Rana, P., & Evans, S. (2014). A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of Cleaner Production*, 65, 42–56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.039>
- Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308–320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- Carayannis, E. G., & Campbell, D. F. J. (2009). 'Mode 3' and 'Quadruple Helix': Toward a 21st century fractal innovation ecosystem. *International Journal of Technology Management*, 46(3/4), 201–234. <https://doi.org/10.1504/IJTM.2009.023374>
- Carter, C. R., & Rogers, D. S. (2008). **A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory.** *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(5), 360–387. <https://doi.org/10.1108/09600030810882816>
- Fahimnia, B., Sarkis, J., & Davarzani, H. (2015). Green supply chain management: A review and bibliometric analysis. *International Journal of Production Economics*, 162, 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.01.003>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Genovese, A., Acquaye, A. A., Figueroa, A., & Koh, S. C. L. (2017). Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications. *Omega*, 66, 344–357. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.05.015>
- IEA - International Energy Agency. (2021). Ammonia Technology Roadmap. IEA. <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>
- International Council on Clean Transportation (ICCT). (2020). *A 2019 assessment of CO₂ emissions from ships*. The ICCT. <https://theicct.org/sector/maritime-shipping/>
- Jabareen, Y. (2009). Building a conceptual framework: Philosophy, definitions, and procedure. *International Journal of Qualitative Methods*, 8(4), 49–62. <https://doi.org/10.1177/160940690900800406>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kong, F., Liu, Y., Tong, L., He, X., Guo, W., Qiu, Y., & Wang, L. (2022). A novel nitrogen pipeline system for recycling pressure energy: System model and energy efficiency economic analysis. *Applied Thermal Engineering*, 216, 119475. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119475>

Lacy, P., & Rutqvist, J. (2015). *Waste to Wealth: The Circular Economy Advantage*. Palgrave Macmillan.

Malerba, F. (2002). Sectoral systems of innovation and production. *Research Policy*, 31(2), 247–264. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)00139-1](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00139-1)

MTR (Membrane Technology & Research). (2023). Nitrogen removal in natural gas processing. <https://www.mtrinc.com/natural-gas/nitrogen-removal>

Olmer, N., Comer, B., Roy, B., Mao, X., & Rutherford, D. (2017). *Greenhouse Gas Emissions from Global Shipping, 2013–2015*. The International Council on Clean Transportation (ICCT). <https://theicct.org/publication/greenhouse-gas-emissions-from-global-shipping-2013-2015/>

Pagell, Mark & Wu, Zhaohui. (2009). Building a More Complete Theory of Sustainable Supply Chain Management Using Case Studies of Ten Exemplars. *Journal of Supply Chain Management*. 45. 37 - 56. 10.1111/j.1745-493X.2009.03162.x.

Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). *Circular economy: Measuring innovation in the product chain*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. <https://www.pbl.nl/en/publications/circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains>

Seuring, S., & Gold, S. (2012). Conducting content-analysis based literature reviews in supply chain management. *Supply Chain Management: An International Journal*, 17(5), 544–555. <https://doi.org/10.1108/13598541211258609>