



**Proposição de Aplicação da Logística Reversa 5.0 no
Descomissionamento de Plataformas de Petróleo**

Alexandre Lopes dos Santos

Universidade Federal Fluminense (UFF) / alexandrelopesdossantos@id.uff.br

Paulo Apicelo de Souza Pereira

Universidade Federal Fluminense (UFF) / pauloapicelo@id.uff.br

Paulo Mauricio Tavares Siqueira

Universidade Federal Fluminense (UFF) / paulomauricio@id.uff.br

Mateus Carvalho Amaral

Universidade Federal Fluminense (UFF) / mateus_amaral@id.uff.br

Resumo

O objetivo deste artigo é oferecer uma solução auditável de apoio à decisão para selecionar arranjos de logística reversa no descomissionamento offshore, tomando como estudo aplicado os territórios de Macaé (RJ) e Vitória (ES). A solução integra, de forma coerente, uma revisão sistemática para fundamentar critérios e evidências, uma avaliação multicritério, na qual a técnica PROMETHEE II é empregada como instrumento de ordenação e para comparar alternativas sob diferentes ênfases, a quantificação de emissões logísticas conforme a ISO 14083 e um checklist regulatório não compensatório que opera como ‘gate’ de conformidade. Referenciais do Hemisfério Norte (Mar do Norte, Europa e América do Norte) são incorporados para calibrar critérios e procedimentos, ampliando a comparabilidade internacional e a robustez dos testes de



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

sensibilidade. O estudo cobre o aço estrutural e óleo lubrificante usado e os resultados indicam que arranjos que integram porto e unidade de processamento, com rastreabilidade ponta a ponta e aderência documental integral, tendem a conciliar custos totais competitivos, menor intensidade de emissões e maior recuperação de materiais. A contribuição reside em entregar um método replicável, com trilha documental verificável, capaz de orientar contratos e políticas públicas e reduzir riscos operacionais e regulatórios no descomissionamento offshore.

Palavras-chave: Logística reversa, descomissionamento offshore, avaliação multicritério, economia circular, Mar do Norte.

Abstract

The objective of this article is to offer an auditable decision support solution for selecting reverse logistics arrangements in offshore decommissioning, taking the territories of Macaé (RJ) and Vitória (ES) as an applied study. The solution coherently integrates a systematic review to substantiate criteria and evidence, a multi-criteria assessment, in which the PROMETHEE II technique is used as a ranking tool and to compare alternatives under different emphases, the quantification of logistics emissions according to ISO 14083, and a non-compensatory regulatory checklist that operates as a compliance gate. Benchmarks from the Northern Hemisphere (North Sea, Europe, and North America) are incorporated to calibrate criteria and procedures, increasing international comparability and the robustness of sensitivity tests. The study covers structural steel and used lubricating oil, and the results indicate that arrangements that integrate port and processing units, with end-to-end traceability and full documentary compliance, tend to reconcile competitive total costs, lower emissions intensity, and greater material recovery. The contribution lies in delivering a replicable method, with a verifiable documentary trail, capable of guiding contracts and public policies and reducing operational and regulatory risks in offshore decommissioning.



Keywords: Reverse logistics, offshore decommissioning, multicriteria decision analysis, circular economy, North Sea.

Resumen

El objetivo de este artículo es ofrecer una solución auditable de apoyo a la toma de decisiones para seleccionar soluciones de logística inversa en el desmantelamiento offshore, tomando como estudio aplicado los territorios de Macaé (RJ) y Vitória (ES). La solución integra, de manera coherente, una revisión sistemática para fundamentar criterios y evidencias, una evaluación multicriterio, en la que se emplea la técnica PROMETHEE II como instrumento de ordenación y para comparar alternativas bajo diferentes énfasis, la cuantificación de emisiones logísticas según la norma ISO 14083 y una lista de verificación regulatoria no compensatoria que funciona como puerta de conformidad. Se incorporan referencias del hemisferio norte (Mar del Norte, Europa y América del Norte) para calibrar criterios y procedimientos, ampliando la comparabilidad internacional y la solidez de las pruebas de sensibilidad. El estudio abarca el acero estructural y el aceite lubricante usado, y los resultados indican que los acuerdos que integran el puerto y la unidad de procesamiento, con trazabilidad de extremo a extremo y cumplimiento documental integral, tienden a conciliar costos totales competitivos, menor intensidad de emisiones y mayor recuperación de materiales. La contribución radica en ofrecer un método replicable, con un rastro documental verificable, capaz de orientar los contratos y las políticas públicas y reducir los riesgos operativos y normativos en el desmantelamiento offshore.

Palabras clave: Logística inversa, desmantelamiento offshore, evaluación multicriterio, economía circular, Mar del Norte.

1. INTRODUÇÃO

O descomissionamento offshore consolidou-se como um vetor estratégico para a transição da indústria de óleo e gás rumo a cadeias mais seguras, eficientes e circulares. Em bacias maduras, a experiência do Hemisfério Norte mostra que resultados superiores



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

combinam governança clara, infraestrutura portuária e industrial adequada e soluções logísticas com rastreabilidade integral. Relatórios setoriais do Mar do Norte evidenciam a centralidade desses pilares e a necessidade de planejamento integrado entre porto, indústria e cadeias de reciclagem.

O objetivo deste artigo é oferecer uma solução auditável de apoio à decisão para selecionar arranjos de logística reversa no descomissionamento offshore, orientando a implantação progressiva de um Circular Offshore Hub em Macaé (RJ) e Vitória (ES).

No Brasil, a dinâmica recente reforça essa agenda. A produção nacional passou a depender majoritariamente do pré-sal, com forte peso da Bacia de Santos, enquanto novas fronteiras exploratórias — como a Margem Equatorial — mobilizam investimentos e atenção regulatória. Esse reposicionamento espacial da atividade altera vetores logísticos e pressiona antigas bases de apoio a buscarem novas fontes de receita e especialização, com o descomissionamento despontando como oportunidade concreta de diversificação e de geração de valor local.

Nesse quadro, a escolha territorial deste estudo — Macaé (RJ) e Vitória (ES) — atende a critérios técnicos e econômicos. Para o fluxo de aço, Vitória apresenta vantagem competitiva pela proximidade com o complexo siderúrgico instalado na Região Metropolitana da Grande Vitória, com destaque para a ArcelorMittal Tubarão e a infraestrutura marítima associada ao Terminal de Produtos Siderúrgicos de Praia Mole, favorecendo a logística de recebimento, processamento e escoamento de coprodutos metálicos.

A aptidão portuária também é decisiva: O canal de acesso ao Porto de Vitória foi dragado para 14 m, ampliando a recepção de embarcações de maior porte. Em contraste, o Terminal de Imbetiba, em Macaé, opera com calado máximo de cerca de 6 m, condizente com seu perfil histórico de base de apoio offshore. Em operações de descomissionamento que envolvem módulos e cascos de grande porte e o emprego de embarcações heavy-lift, profundidades maiores reduzem transbordos, facilitam manobras e aumentam a



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

segurança operacional, como ilustra a evolução recente de instalações de águas profundas utilizadas para descomissionamento no Mar do Norte.

Para o fluxo de óleo lubrificante usado ou contaminado (OLUC), Macaé reúne vantagens práticas: é base histórica da Bacia de Campos, reduz o trecho marítimo até o ponto de recepção em terra e facilita a triagem e a documentação antes do envio a rerrefinarias autorizadas. Em termos normativos, a destinação por rerrefino é exigida pela resolução do CONAMA vigente (redação atualizada pela Res. nº 450/2012), em harmonia com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010 e Decreto nº 10.936/2022) e com o Manifesto de Transporte de Resíduos do SINIR (MTR nacional), obrigatório para empresas desde 14/04/2025.

A contribuição deste artigo é oferecer uma solução auditável de apoio à decisão para selecionar arranjos de logística reversa aplicáveis ao descomissionamento offshore nesses territórios, articulando revisão sistemática de evidências, avaliação multicritério e contabilização de emissões logísticas em conformidade com norma internacional. O enfoque privilegia entregas úteis para políticas e contratos: critérios transparentes, regras documentais de conformidade e memórias de cálculo que permitam replicação por gestores públicos e privados. Ao incorporar referências do Mar do Norte, da Europa e da América do Norte, a proposta eleva a comparabilidade internacional e orienta a construção de capacidades locais em Macaé e Vitória.

Esse arranjo serve de base para um modelo de gestão territorial — o Circular Offshore Hub — capaz de combinar eficiência econômica, menor emissão logística e conformidade documental.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Logística 5.0 consolida uma visão humanocêntrica, sustentável e resiliente, orientando cadeias que entreguem valor econômico e social com segurança e menor impacto ambiental. No descomissionamento offshore, essa abordagem demanda decisões transparentes, documentação consistente e integração entre porto, bases, operadores e



destinos ambientais adequados (EUROPEAN COMMISSION, 2021; NAHAVANDI, 2019).

A transição do enfoque 4.0 para 5.0 não é apenas tecnológica: redefine o propósito da cadeia ao colocar pessoas, sustentabilidade e resiliência como objetivos explícitos e mensuráveis, mantendo automação e dados como meios de execução (FREDERICO, 2021). Esse enquadramento é especialmente relevante quando as alternativas logísticas precisam ser comparadas de forma auditável, sob critérios múltiplos e regras claras de conformidade.

Para mensuração e comparabilidade, o estudo adota rastreabilidade por lote e contabilidade padronizada das emissões de transporte, alinhadas à ISO 14083 e ao GLEC Framework, garantindo fronteiras, fatores e escopos de cálculo consistentes entre rotas (ISO, 2023; SMART FREIGHT CENTRE, 2024). Esses elementos permitem que a leitura 5.0 avance além do acompanhamento operacional, estruturando prestação de contas e aprendizado organizacional.

Como baliza internacional, o trabalho utiliza referências consolidadas do Hemisfério Norte. No Mar do Norte, relatórios e sínteses técnicas da *North Sea Transition Authority* (NSTA) e da *Offshore Energies UK* (OEUK) organizam métricas, custos e lições de projetos de descomissionamento; nos Estados Unidos, documentos do *Bureau of Safety and Environmental Enforcement* (BSEE) apoiam a calibração de práticas e estimativas de custo (NSTA, 2023; OEUK, 2023; BSEE, 2015).

No Brasil, as âncoras regulatórias do descomissionamento — com destaque para a Resolução ANP nº 817/2020 e seus complementos — condicionam procedimentos, evidências documentais e comparações entre alternativas, em linha com a exigência da Logística 5.0 por rastreabilidade e transparência (ANP, 2020). Essa camada normativa é integrada ao protocolo analítico do artigo, preservando simplicidade de forma e rigor de conteúdo.

Essa perspectiva fundamenta a entrega do estudo: um mecanismo auditável de apoio à decisão que organiza dados, critérios e evidências para selecionar rotas de logística

reversa no descomissionamento offshore, preparando a implantação territorial de um Circular Offshore Hub capaz de combinar eficiência econômica, menor emissão logística e conformidade documental.

2.1. Práticas internacionais e evidências setoriais

A experiência do Mar do Norte consolidou um padrão de transparência e mensuração que combina painéis públicos de desempenho e atualizações anuais de custos, criando um repertório de lições para planejamento e execução do descomissionamento (NSTA, 2023; OEUK, 2023). Esses instrumentos tornam comparáveis cronogramas, janelas operacionais, produtividade e destinos de materiais, favorecendo aprendizado contínuo e governança baseada em evidências.

Nos Estados Unidos, sínteses técnicas do *Bureau of Safety and Environmental Enforcement* (BSEE) estruturam metodologias de estimativa e custeio para etapas de desconexão, içamento, transporte e descaracterização, além de diretrizes para reaproveitamento ambientalmente responsável quando aplicável (BSEE, 2015). Essa combinação de guia metodológico e política setorial sustenta padronização, reporte e auditoria pública de resultados.

Relatos técnicos presentes no acervo consultado indicam altas taxas de recuperação de materiais em projetos europeus quando há coordenação interorganizacional, requisitos explícitos de rastreabilidade e contratos orientados a desempenho (NSTA, 2023; OEUK, 2023). Esses exemplos reforçam a importância de métricas claras, padronização de qualidade do material e acompanhamento público para sustentar decisões defensáveis.

No campo climático, a quantificação de emissões ao longo das cadeias de transporte requer metodologias comparáveis e delimitação consistente de fronteiras. ISO 14083:2023 estabelece diretrizes para quantificação e reporte de emissões em operações logísticas (ISO, 2023).

2.2. Implicações para o caso brasileiro e para o Circular Offshore Hub

Da síntese internacional emergem três direções de governança com aderência ao marco regulatório nacional: contratos com rastreabilidade compatível com licenciamento; coordenação entre operadores, portos/estaleiros, recicladoras e órgãos públicos para padronizar qualidade e destinação; e transparência de indicadores econômico-ambientais para comparação entre alternativas (NSTA, 2023; OEUK, 2023; BSEE, 2015). Essas diretrizes dialogam com a Resolução ANP nº 817/2020 ao exigir documentação comprobatória e controle de destino no PDI/RDI (ANP, 2020).

Nesse enquadramento, o Circular Offshore Hub se apresenta como plataforma territorial capaz de integrar infraestrutura portuária, operadores licenciados, rotas tecnológicas auditáveis e destinos ambientalmente adequados, combinando governança documental, eficiência logística e desempenho ambiental. Ao consolidar dados, normas e decisões em um modelo replicável, o Hub organiza a cooperação público-privada e oferece escala para rotas de reuso e reciclagem.

2.3. Ponte para o método do estudo

As implicações operacionais desta revisão informam diretamente os critérios do método: conformidade regulatória, rastreabilidade por lote, emissões logísticas comparáveis e desempenho econômico-operacional. No artigo, esses eixos são operacionalizados com indicadores alinhados à abordagem 5.0 e documentados em quadro próprio; detalhes numéricos e fórmulas permanecem no capítulo de método e nos quadros e na figura deste artigo (ISO, 2023; matriz de critérios e apêndices).

Para fluxos específicos — como óleo lubrificante usado/contaminado (OLUC) e aço — a revisão respalda a exigência de destinação adequada com comprovação documental e a priorização de rotas com maior recuperação de valor, desde que compatíveis com o licenciamento e a segurança operacional (ANP, 2020). Essas condições integram a parametrização que será aplicada aos estudos de caso em Macaé e Vitória.

3. MÉTODO

3.1. Desenho do estudo e lógica geral

O método foi concebido para entregar um artefato auditável de apoio à decisão no contexto do descomissionamento offshore, alinhado à Logística 5.0. Integra três camadas complementares: análise multicritério com a técnica PROMETHEE II, quantificação de emissões logísticas conforme a ISO 14083 e verificação documental de conformidade e rastreabilidade em linha com as obrigações regulatórias aplicáveis. Essa combinação assegura decisões comparáveis, transparentes e reproduzíveis (BRANS; VINCKE, 1985; ISO, 2023; ANP, 2020).

A PROMETHEE II estrutura preferências entre alternativas sob múltiplos critérios e permite testar robustez do ordenamento por meio de análises de sensibilidade. A ISO 14083 fornece requisitos para contabilização e reporte de emissões de GEE em cadeias de transporte, garantindo coerência entre fronteiras, fatores de emissão e dados. A camada regulatória orienta a admissibilidade das rotas, com exigências de documentação e rastreabilidade compatíveis com o licenciamento (BRANS; VINCKE, 1985; ISO, 2023; ANP, 2020).

3.2. Escopo, unidade funcional e fronteiras

O escopo abrange o transporte dos materiais desde a transferência offshore–onshore até a chegada aos destinos licenciados em terra, incluindo, quando houver, movimentações intermediárias. A unidade funcional é o material movimentado por rota, o que assegura comparabilidade entre alternativas. As emissões são quantificadas e reportadas conforme a ISO 14083:2023 (ISO, 2023), com uso de fatores oficiais e memória de cálculo auditável. A rastreabilidade por lote e a formalização documental — Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) e Certificado de Destinação Final (CDF), quando couber — são tratadas como evidências de conformidade regulatória e de integridade operacional (MMA, 2020).

Para fins de territorialização, as rotas adotadas consideram a vocação logística-industrial existente. No caso do aço, o desembarque em Vitória/ES permite conexão direta porto-planta no Terminal de Praia Mole, associado ao Complexo de Tubarão, reduzindo

trechos terrestres e otimizando a operação. Para o OLUC, a interface ocorre em Macaé/RJ, com encaminhamento a rerrefinadoras autorizadas, respeitando as obrigações ambientais do setor (ISO, 2023; ANP, 2020).

3.3. Alternativas e fluxos analisados

O estudo examina dois fluxos prioritários, aderentes à realidade logística brasileira: aço proveniente do descomissionamento, com interface em Vitória/ES e integração porto–siderurgia; e óleo lubrificante usado ou contaminado (OLUC), com interface em Macaé/RJ e destinação por rerrefino, com rastreabilidade por lote. As especificações técnicas e documentais de cada alternativa encontram-se descritas no corpo do texto e sintetizadas nos Quadros 1 e 2 e na Figura 1 deste artigo (NSTA, 2023; OEUK, 2023; BSEE, 2015; ANP, 2020; CONAMA, 2012).

3.4. Fontes de dados e procedimento de triagem

As evidências mobilizadas priorizam três classes de fontes: marcos regulatórios brasileiros aplicáveis ao descomissionamento e à logística de resíduos, com foco na Resolução ANP nº 817/2020 e na redação vigente para OLUC (CONAMA nº 450/2012); a norma técnica para mensuração de emissões em transporte (ISO 14083:2023); e relatórios públicos de desempenho e lições de descomissionamento do Mar do Norte (NSTA, 2023; OEUK, 2023). A triagem considerou pertinência ao escopo, caráter público e clareza metodológica, utilizando os relatórios setoriais como baliza comparativa sem substituir o marco jurídico nacional (ANP, 2020; CONAMA, 2012; ISO, 2023; NSTA, 2023; OEUK, 2023).

3.5. Critérios e indicadores

Os critérios foram agrupados em quatro famílias coerentes com a abordagem 5.0 e com as exigências de conformidade: conformidade regulatória e documental; rastreabilidade por lote; emissões logísticas em transporte; e desempenho econômico-operacional. Cada família é representada por indicadores observáveis e verificáveis, definidos a partir das obrigações regulatórias e da ISO 14083. Os descritores e pontos de corte são apresentados

ao longo do capítulo de forma concisa, preservando fluidez e legibilidade (ANP, 2020; ISO, 2023).

3.6. Procedimento para emissões logísticas (ISO 14083)

A quantificação e o reporte de emissões de GEE no transporte seguem a ISO 14083:2023, que define a delimitação de fronteiras, a identificação de modos e segmentos e o uso de dados de atividade. O cálculo emprega fatores de emissão reconhecidos e registra, de forma transparente, as escolhas de fatores, as fontes e as hipóteses adotadas. Essa padronização permite comparar alternativas de rota com consistência de fronteiras e fatores, reduz a incerteza e fortalece a prestação de contas (ISO, 2023).

3.7. Verificações regulatórias e documentais

A admissibilidade de cada rota é verificada com base nas obrigações do descomissionamento e da logística de resíduos. No âmbito do descomissionamento, a Resolução ANP nº 817/2020 orienta requerimentos de planejamento e comprovação no PDI/RDI. Para o fluxo de óleo lubrificante usado ou contaminado, a redação vigente do marco setorial estabelece a destinação por rerrefino com rastreabilidade por lote, com instrumentos como MTR e CDF quando aplicáveis (ANP, 2020; CONAMA, 2012).

3.8. Robustez e análise de sensibilidade

A técnica PROMETHEE II permite examinar a estabilidade do ordenamento mediante variações controladas nas ponderações e nos pontos de corte dos indicadores. A análise de sensibilidade identifica regiões de estabilidade e faixas de indiferença prática, destacando alternativas que mantêm desempenho superior em diferentes cenários. Os resultados são apresentados na seção de resultados do artigo (BRANS; VINCKE, 1985).

3.9. Operacionalização dos critérios e indicadores

A operacionalização dos critérios segue o princípio de decisões transparentes e verificáveis, com foco em quatro dimensões: conformidade regulatória e documental; rastreabilidade por lote; emissões logísticas em transporte; e desempenho econômico-operacional. Cada dimensão é representada por indicadores observáveis e

ligados a evidências concretas, de modo a compatibilizar comparabilidade e aderência ao licenciamento (ANP, 2020; CONAMA, 2012; ISO, 2023).

Na conformidade regulatória, a admissibilidade das alternativas depende do atendimento às obrigações do descomissionamento no PDI/RDI e do cumprimento da destinação adequada nos fluxos pertinentes. Para o OLUC, aplica-se a redação vigente do marco setorial que estabelece destinação por rerrefino, com verificação por documentos e registros exigíveis. O indicador associa a situação “atende/não atende” à presença e consistência da documentação cabível. Alternativas que não atendem são descartadas, preservando alinhamento com as exigências do marco regulatório (ANP, 2020; CONAMA, 2012).

Na rastreabilidade por lote, a checagem contempla a existência de trilha documental de transporte e destinação, compatível com os instrumentos aplicáveis, além de registros operacionais que assegurem a identificação do lote ao longo da cadeia. O indicador sintetiza a completude e a consistência desses registros em escala ordinal, privilegiando configurações que ofereçam prova documental inequívoca da rota (ANP, 2020).

Para emissões logísticas, a quantificação e o reporte seguem a ISO 14083:2023 (ISO, 2023), com delimitação explícita de fronteiras e modos de transporte, uso de dados de atividade e fatores de emissão reconhecidos. O indicador expressa as emissões de GEE associadas ao transporte na unidade funcional do estudo, permitindo comparação direta entre rotas dentro do escopo da norma.

No desempenho econômico-operacional, os indicadores capturam custos e parâmetros operacionais relevantes à execução, como esforço logístico e janelas operacionais. O objetivo é refletir a viabilidade prática das alternativas e apoiar a decisão pública e empresarial com medidas legíveis e replicáveis. Elementos de referência do Hemisfério Norte são usados apenas como baliza comparativa para leitura de desempenho, sem substituir o marco jurídico nacional (NSTA, 2023; OEUK, 2023).

A agregação multicritério utiliza a técnica PROMETHEE II para ordenar alternativas com base nas preferências por critério, respeitando pesos definidos a partir da relevância

regulatória e operacional destacada pelas referências. As funções de preferência são escolhidas de modo a preservar a interpretação dos indicadores e a sensibilidade a diferenças materiais, evitando tecnicismos que prejudiquem a legibilidade do artigo. A robustez do ordenamento é examinada com variações controladas de pesos e pontos de corte, observando regiões de estabilidade (BRANS; VINCKE, 1985).

A apresentação dos resultados no artigo privilegia figuras e tabelas de leitura direta, com textos de apoio que explicam o significado dos achados e suas implicações para a escolha de rotas e para a preparação do Circular Offshore Hub. As referências normativas e setoriais são citadas para permitir verificação por terceiros, mantendo clareza e rigor acadêmico (ANP, 2020; CONAMA, 2012; ISO, 2023; NSTA, 2023; OEUK, 2023; BSEE, 2015).

3.11. Síntese do método e preparação dos resultados

O método integra preferências multicritério (PROMETHEE II), mensuração de emissões logísticas em transporte (ISO 14083) e verificação regulatória e documental, de modo a sustentar decisões transparentes, comparáveis e reprodutíveis no descomissionamento offshore (BRANS; VINCKE, 1985; ISO, 2023; ANP, 2020). As alternativas são avaliadas em quatro dimensões: conformidade e documentação; rastreabilidade por lote; emissões de transporte; e desempenho econômico-operacional, com indicadores definidos no corpo do artigo e leitura direta em tabelas e figuras.

A interpretação dos resultados considera robustez do ordenamento, coerência com o marco regulatório brasileiro e balizas internacionais de desempenho, utilizadas apenas como referência comparativa (NSTA, 2023; OEUK, 2023). Essa leitura pavimenta a transição da análise para a aplicação prática no território, orientando a preparação de arranjos que contribuam para a implantação de um Circular Offshore Hub coerente com a realidade logística brasileira.

4. RESULTADOS

Os resultados estão organizados para leitura direta e comparável, com o ordenamento das alternativas obtido pela técnica PROMETHEE II e os indicadores estruturados nas quatro dimensões definidas na metodologia: conformidade e documentação; rastreabilidade por lote; emissões de transporte; e desempenho econômico-operacional. A apresentação privilegia texto explicativo e quadros enxutos, evitando tecnicismos desnecessários à compreensão do leitor (BRANS; VINCKE, 1985; ISO, 2023).

A dimensão regulatória se mostrou determinante para a admissibilidade, refletindo as exigências de planejamento e comprovação no PDI/RDI e o controle do destino dos materiais previstas no marco brasileiro. Alternativas que não atendem aos requisitos de documentação e rastreabilidade aplicáveis são descartadas, preservando a aderência às obrigações vigentes, inclusive no fluxo de óleo lubrificante usado ou contaminado, cujo regramento impõe destinação por rerrefino com rastreabilidade por lote (ANP, 2020; CONAMA, 2012).

Na dimensão ambiental, a quantificação de emissões no transporte, conforme a ISO 14083:2023 (ISO, 2023), evidencia que diferenças de distância percorrida, combinação modal e transbordos têm efeito material na comparação entre rotas. A memória de cálculo documenta a delimitação de fronteiras, os dados de atividade e os fatores de emissão utilizados, assegurando consistência interna dos resultados e rastreabilidade para verificação independente.

No desempenho econômico-operacional, os resultados refletem parâmetros de execução e esforço logístico observáveis no contexto estudado, com leitura orientada por métricas de custo e de viabilidade prática. Referências setoriais do Hemisfério Norte são utilizadas apenas como baliza comparativa de desempenho e governança, sem substituir as condições legais e operacionais brasileiras (NSTA, 2023; OEUK, 2023).

A análise de sensibilidade, aplicada para verificar a estabilidade do ordenamento, considerou variações controladas nas ponderações e nos pontos de corte dos indicadores. A leitura dos resultados dá destaque a regiões de estabilidade e a eventuais inversões

relevantes, de modo a informar decisões com base em evidências e a explicitar *trade-offs* entre critérios (BRANS; VINCKE, 1985).

Quadro 1 — Ordenamento das alternativas pelo método PROMETHEE II no cenário de pesos de referência (W0), com apresentação de Φ^+ , Φ^- , Φ (líquido) e posição final.

Fluxo	Alternativa	Φ^+	Φ^-	Φ (líquido)	Posição
Aço	A4	0,488095	0,000000	0,488095	1º
Aço	A2	0,252646	0,089947	0,162698	2º
Aço	A1	0,250000	0,150794	0,099206	3º
Aço	A3	0,000000	0,750000	-0,750000	4º
OLUC	A4	0,499066	0,033342	0,465724	1º
OLUC	A2	0,338897	0,134259	0,204638	2º
OLUC	A1	0,296296	0,147214	0,149083	3º
OLUC	A3	0,000000	0,819444	-0,819444	4º

Fonte: Cálculo do autor com PROMETHEE II (BRANS; VINCKE, 1985)

A leitura integrada evidencia que a dimensão regulatória funciona como filtro primário: alternativas que não atendem aos requisitos de planejamento, comprovação e rastreabilidade são desclassificadas, preservando a aderência ao marco brasileiro e, no caso de óleo lubrificante usado ou contaminado, à obrigatoriedade de destinação por rerrefino (ANP, 2020; CONAMA, 2012).

O quadro 2 apresenta o cenário de pesos de referência (W0), indicando unidade/escala, sentido (maximizar/minimizar), função de preferência e pontos de corte q/p (q = ponto de corte de indiferença; p = ponto de corte de preferência), além do peso (%) atribuído a cada critério.

Quadro 2 — Critérios avaliados e sua operacionalização

Código	Critério	Unidade/Escala	Sentido	Função	q/p	Peso (%) W0
C1	Impacto ambiental	kg CO ₂ e/t	Maximizar	V-shape	5/20	15
C2	Recuperação de materiais	%	Maximizar	Usual	0/1	10
C3	Risco HSE	Índice 0–100	Minimizar	U-shape	5/20	10
C4	Viabilidade técnica	Índice 0–100	Maximizar	Level	5/20	10
C5	Condições meteo-oceânicas	Índice 0–100	Minimizar	V-shape	5/20	7
C6	Custo logístico	R\$/t	Minimizar	V-shape	5/20	15
C7– C12	Demais critérios (agregado)	Escala 0–100	Max/Min	Usual	0/1	33

Entre as alternativas admissíveis, a dimensão ambiental distinguiu as rotas pela distância efetiva, pela composição modal e pela ocorrência de transbordos. À luz da ISO 14083:2023 (ISO, 2023), esses elementos condicionam os dados de atividade e os fatores de emissão, gerando variações mensuráveis no inventário e permitindo a comparação entre rotas em base metodológica comum.

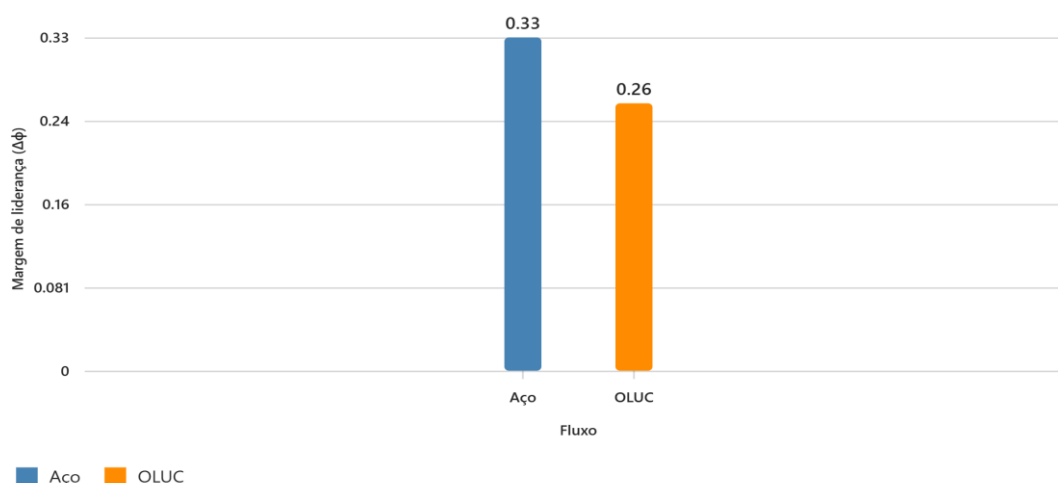
Na dimensão econômico-operacional, os resultados indicam vantagem para arranjos que reduzem esforços logísticos e janelas críticas de operação, refletindo maior viabilidade de execução. A comparação com balizas setoriais do Hemisfério Norte serve apenas como

referência de leitura — custos, produtividade e governança — sem substituir as condições regulatórias e operacionais brasileiras (NSTA, 2023; OEUK, 2023; BSEE, 2015).

A agregação multicritério pela técnica PROMETHEE II gerou um ordenamento estável nas faixas de variação testadas, o que confere confiança prática para priorizar as alternativas melhor posicionadas. A análise de sensibilidade reforça essa estabilidade ao mostrar que pequenas alterações nos pesos não produzem inversões sistemáticas no topo do ranking, mantendo a coerência da decisão (BRANS; VINCKE, 1985).

Em síntese, o conjunto de resultados sustenta escolhas compatíveis com o licenciamento, com menor emissão logística em transporte e com maior viabilidade operacional, criando condições para arranjos territoriais mais eficientes. Essa base empírica é imediatamente útil para orientar contratos e preparar a implantação de um Circular Offshore Hub com governança documental, metas verificáveis e aprendizado contínuo (ANP, 2020; ISO, 2023).

Figura 1 — Margem de liderança do 1º colocado ($\Delta\phi$) — proxy de robustez



Cabe observar que o $\Delta\phi$ é calculado diretamente do Quadro 1 (Aço: 0.325397; OLUC: 0.261086). Maior $\Delta\phi$ sugere maior robustez a variações moderadas de pesos, conforme interpretação usual em PROMETHEE II (BRANS; VINCKE, 1985).

Os achados convidam a discutir dois temas centrais: a) como traduzir o ordenamento em diretrizes contratuais e arranjos institucionais que fortaleçam a rastreabilidade e a mensuração de emissões; e b) como acomodar especificidades territoriais de Macaé e Vitória na organização das cadeias de retorno. A próxima seção examina essas implicações, relacionando-as ao desenho do Circular Offshore Hub e às referências internacionais empregadas como baliza (ANP, 2020; NSTA, 2023; OEUK, 2023).

5. DISCUSSÃO

Os resultados indicam que a dimensão regulatória funciona como filtro primário de admissibilidade, coerente com o marco brasileiro de descomissionamento e com a governança exigida para fluxos perigosos. A Resolução ANP nº 817/2020 orienta o planejamento e a comprovação no PDI/RDI, enquanto a redação vigente para óleo lubrificante usado ou contaminado (OLUC) estabelece a destinação por rerrefino com rastreabilidade por lote. Esse enquadramento explica a desclassificação de alternativas sem documentação adequada e reforça a centralidade de trilhas documentais completas (ANP, 2020; CONAMA, 2012).

Entre as alternativas admissíveis, a quantificação de emissões em transporte, conduzida sob a ISO 14083:2023, evidenciou o efeito de distância, modos e transbordos sobre a comparação entre rotas. A leitura é consistente com a literatura internacional de descomissionamento, na qual métricas padronizadas de desempenho e transparência de dados sustentam processos decisórios auditáveis (ISO, 2023; NSTA, 2023; OEUK, 2023; BSEE, 2015).

A interpretação econômica-operacional converge para arranjos que reduzem esforço logístico e janelas críticas de operação, favorecendo soluções com menor complexidade e maior previsibilidade. A comparação com as balizas do Mar do Norte e dos Estados Unidos cumpre papel de referência e aprendizado, sem substituir as especificidades regulatórias e territoriais brasileiras (NSTA, 2023; OEUK, 2023; BSEE, 2015).



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Sob a perspectiva da Logística 5.0, a decisão não se limita ao binômio custo-emissão: incorpora transparência, segurança e criação de valor territorial como objetivos explícitos. Essa leitura humanocêntrica, sustentável e resiliente é coerente com os referenciais recentes de cadeias 5.0, em que automação e dados permanecem meios, mas os fins incluem resultados sociais e ambientais verificáveis (EUROPEAN COMMISSION, 2021; NAHAVANDI, 2019).

No recorte territorial, a escolha do fluxo de aço com interface em Vitória/ES se alinha à proximidade logística-industrial com o complexo siderúrgico e ao acesso portuário profundo, reduzindo transbordos e trechos intermediários. Para o OLUC, a interface em Macaé/RJ é compatível com a base operacional da Bacia de Campos e com a exigência de rerrefino e rastreabilidade, o que facilita a organização documental e a integração com operadores licenciados (ANP, 2020; CONAMA, 2012; NSTA, 2023; OEUK, 2023).

Essas evidências convergem para um desenho institucional capaz de transformar critérios e métricas em operação, o que justifica a adoção de um arranjo territorial integrador. Na sequência deste capítulo, discutimos como os achados se traduzem em diretrizes contratuais, requisitos de rastreabilidade e práticas de mensuração em linha com o modelo de Circular Offshore Hub (ANP, 2020; ISO, 2023).

Os achados sustentam a inclusão explícita de requisitos regulatórios e de rastreabilidade nos instrumentos contratuais, alinhando admissibilidade e execução. Para o descomissionamento, a conformidade ao PDI/RDI e a documentação comprobatória devem ser condições de contratação e de pagamento. Para o OLUC, a redação vigente do marco setorial impõe destinação por rerrefino com rastreabilidade por lote; a verificação por documentos como MTR e CDF deve ser incorporada como evidência operacional de desempenho (ANP, 2020; CONAMA, 2012).

A mensuração de emissões no transporte, quando prevista contratualmente, deve seguir a ISO 14083:2023 (ISO, 2023), com delimitação de fronteiras, definição de modos/segmentos e uso de dados de atividade e fatores de emissão compatíveis com a

norma. A padronização do reporte viabiliza a comparação entre alternativas e a prestação de contas auditável, além de orientar decisões nas fases subsequentes do ciclo de vida.

A coordenação interorganizacional emerge como condição para capturar ganhos de eficiência e reduzir assimetrias de informação. Experiências do Mar do Norte mostram que métricas compartilhadas, painéis públicos e lições aprendidas contribuem para estabilidade operacional e melhor aproveitamento de materiais, sem substituir o marco jurídico nacional (NSTA, 2023; OEUK, 2023; BSEE, 2015). No contexto brasileiro, essa coordenação deve ser traduzida em rotinas claras de interface porto-planta, janelas operacionais e padrões mínimos de qualidade de material, mantendo as obrigações regulatórias como baliza.

Para orientar a implantação territorial, recomenda-se tratar o Circular Offshore Hub como arranjo de governança que integra infraestrutura portuária, operadores licenciados e destinos ambientalmente adequados, com trilhas documentais verificáveis e mensuração padronizada de emissões logísticas. O Hub serve como plataforma para consolidar dados, organizar o fluxo de evidências e reduzir custos de transação, preservando a compatibilidade com as exigências regulatórias brasileiras (ANP, 2020; ISO, 2023).

Em termos de priorização, rotas que minimizam esforço logístico e transbordos tendem a apresentar menor emissão em transporte e maior previsibilidade de execução, o que é coerente com os resultados e com as referências setoriais. Essa leitura deve orientar editais e contratos para privilegiar arranjos operacionais mais simples e transparentes, mantidas as condições de segurança e de conformidade (NSTA, 2023; OEUK, 2023).

Essas diretrizes sintetizam a contribuição prática do estudo e servem de base para a seção de Conclusão, em que são destacadas as entregas do trabalho, suas limitações e os desdobramentos esperados para a consolidação do Circular Offshore Hub no contexto brasileiro.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou um artefato auditável de apoio à decisão para selecionar rotas de logística reversa no descomissionamento offshore, alinhado à abordagem de Logística 5.0. A proposta integra análise multicritério pela técnica PROMETHEE II, mensuração padronizada de emissões de transporte conforme a ISO 14083:2023 e verificação regulatória-documental compatível com o marco brasileiro, de modo a produzir escolhas transparentes, comparáveis e reprodutíveis (BRANS; VINCKE, 1985; ISO, 2023; ANP, 2020).

A aplicação ao recorte territorial definido mostrou que o fluxo de aço com interface em Vitória/ES apresenta aderência logística-industrial dada a proximidade porto-planta e o acesso portuário profundo, enquanto o fluxo de óleo lubrificante usado ou contaminado, com interface em Macaé/RJ, se coaduna com a base operacional da Bacia de Campos e com a exigência de destinação por rerrefino com rastreabilidade por lote. O ordenamento resultante, a leitura por dimensões e a verificação de robustez conferem confiabilidade prática à priorização observada, mantendo coerência com referências setoriais do Hemisfério Norte tomadas como baliza e sem substituir o marco nacional (NSTA, 2023; OEUK, 2023).

A contribuição do estudo é dupla: oferece um mecanismo de decisão enxuto, replicável e aderente às exigências regulatórias e, ao mesmo tempo, organiza um caminho de implantação territorial por meio do modelo Circular Offshore Hub. O Hub opera como arranjo de governança que integra infraestrutura portuária, operadores licenciados e destinos ambientalmente adequados, com trilhas documentais verificáveis e mensuração padronizada de emissões logísticas, favorecendo eficiência, transparência e redução de assimetrias (ANP, 2020; ISO, 2023).

Como limitações, reconhece-se a dependência da disponibilidade e da qualidade dos dados operacionais; o escopo da ISO 14083:2023 restrito às emissões do transporte — não contemplando etapas de processamento; e a necessidade de maior detalhamento dos descritores atualmente agrupados em critérios agregados. Esses pontos recomendam cautela na extrapolação para contextos com condições muito distintas e indicam



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

oportunidades de aperfeiçoar a representação de risco, a qualidade do material e os efeitos territoriais (ISO, 2023).

Do ponto de vista prático, os achados sustentam diretrizes contratuais e operacionais: admissibilidade regulatória e rastreabilidade por lote como condições de execução; reporte de emissões em transporte padronizado pela ISO 14083; e coordenação interorganizacional para reduzir esforço logístico e organizar janelas operacionais. Essas medidas são consistentes com experiências do Mar do Norte, desde que calibradas à realidade brasileira (NSTA, 2023; OEUK, 2023; BSEE, 2015).

Como próximos passos, recomenda-se consolidar rotinas de dados e governança documental, promover pilotos com contratos que exijam rastreabilidade e mensuração padronizada de emissões, e amadurecer o arranjo institucional do Circular Offshore Hub como plataforma de cooperação público-privada. Tais ações tendem a acelerar a recuperação de valor material, a reduzir emissões de transporte e a fortalecer a prestação de contas no descomissionamento offshore no Brasil (ANP, 2020; ISO, 2023).

REFERÊNCIAS

BRANS, Jean-Pierre; MARESCHAL, Bertrand; VINCKE, Philippe. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, v. 24, n. 2, p. 228-238, 1986. DOI: 10.1016/0377-2217(86)90044-5.

BRANS, Jean-Pierre; VINCKE, Philippe. Note—A Preference Ranking Organisation Method (The PROMETHEE Method) for MCDM. *Management Science*, v. 31, n. 6, p. 647-656, 1985. DOI: 10.1287/mnsc.31.6.647.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Resolução ANP nº 817, de 24 de abril de 2020. Dispõe sobre o descomissionamento de instalações de exploração e produção de petróleo e gás natural, a devolução de áreas, a alienação e reversão de bens e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, 27 abr.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-817-de-24-de-abril-de-2020-254001378>. Acesso em: 17 out. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 450, de 6 de março de 2012. Altera a Resolução nº 362, de 23 de junho de 2005, que dispõe sobre recolhimento, coleta e destinação final de óleo lubrificante usado ou contaminado. Diário Oficial da União, 7mar.2012. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?id=654&option=com_sisconama&task=arquivo.download. Acesso em: 17 out. 2025.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d10936.htm. Acesso em: 17 out. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 17 out. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. Directorate-General for Research and Innovation. Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. DOI: 10.2777/308407. Disponível em: <https://op.europa.eu/s/o5eO>. Acesso em: 17 out. 2025.

FREDERICO, Guilherme F. From Supply Chain 4.0 to Supply Chain 5.0: Findings from a Systematic Literature Review and Research Directions. Logistics, v. 5, n. 3, p. 49, 2021. DOI: 10.3390/logistics5030049. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2305-6290/5/3/49>. Acesso em: 17 out. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 14083:2023 — Greenhouse gases — Quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations. Geneva: ISO, 2023. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/78864.html>. Acesso em: 17 out. 2025.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

NAHAVANDI, Saeid. Industry 5.0: A human-centric solution. Sustainability, v. 11, n. 16, p. 4371, 2019. DOI: 10.3390/su11164371. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/16/4371>. Acesso em: 17 out. 2025.

NORTH SEA TRANSITION AUTHORITY (NSTA). UKCS Decommissioning Cost and Performance Report 2023. London: NSTA, 2023. Disponível em: <https://www.nstauthority.co.uk/media/lnmhq21/decom-cost-report-2023-final-accessible-1.pdf>. Acesso em: 17 out. 2025.

OFFSHORE ENERGIES UK (OEUK). Decommissioning Insight 2023. London: OEUK, 2023. Disponível em: https://oeuk.org.uk/wp-content/uploads/woocommerce_uploads/2023/11/Decommissioning-Insight-2023-OEUK-sac2nq.pdf. Acesso em: 17 out. 2025.

SMART FREIGHT CENTRE (SFC). GLEC Framework v3.1 — Global Logistics Emissions Council Framework. Amsterdam: SFC, out. 2024. Disponível em: https://www.smartfreightcentre.org/documents/460/GLEC_FRAMEWORK_v3_23_10_24_B.pdf. Acesso em: 17 out. 2025.

UNITED STATES. Bureau of Safety and Environmental Enforcement (BSEE). Decommissioning Methodology and Cost Evaluation. Sterling, VA: BSEE/ICF International, 2015. Disponível em: <https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/tap-technical-assessment-program/738aa.pdf>. Acesso em: 17 out. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA). Portaria nº 280, de 29 de junho de 2020. Institui o Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) nacional, dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos e complementa a Portaria nº 412, de 25 de junho de 2019. Diário Oficial da União, 30 jun. 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-280-de-29-de-junho-de-2020-264244199>. Acesso em: 17 out. 2025.