



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Escola Politécnica e Escola de Química  
Programa de Engenharia Ambiental

André Bueno Portes

APLICAÇÃO DE INDICADORES DE CIRCULARIDADE NO  
DESCOMISSIONAMENTO DE PLATAFORMAS *OFFSHORE*: UM ENFOQUE  
NA REUTILIZAÇÃO DE MATERIAIS E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS

Rio de Janeiro  
2025



**UFRJ**

André Bueno Portes

APLICAÇÃO DE INDICADORES DE CIRCULARIDADE NO  
DESCOMISSIONAMENTO DE PLATAFORMAS *OFFSHORE*: UM ENFOQUE  
NA REUTILIZAÇÃO DE MATERIAIS E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora:

Prof<sup>a</sup> Monica Pertel, DSc

Rio de Janeiro

2025





**UFRJ**

**APLICAÇÃO DE INDICADORES DE CIRCULARIDADE NO  
DESCOMISSIONAMENTO DE PLATAFORMAS *OFFSHORE*: UM ENFOQUE  
NA REUTILIZAÇÃO DE MATERIAIS E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS**

André Bueno Portes

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Monica Pertel, DSc

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa de Engenharia Ambiental, Escola  
Politécnica & Escola de Química da  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como  
parte dos requisitos necessários à obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca:

---

Monica Pertel, DSc (Orientadora)  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

Ana Lúcia Nazareth da Silva, DSc  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

Leonardo Mangia Rodrigues, DSc  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

Marco Antonio Batista da Silva, DSc  
Petróleo Brasileiro S.A.

Rio de Janeiro  
2025

*Uma vida não basta ser vivida; também precisa ser sonhada.*

**Mário Quintana**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu filho, com todo o meu amor, pela compreensão nos momentos que não pude estar 100% presente.

Aos meus pais e irmãos que me deram a base para que eu pudesse chegar até aqui.

A minha companheira de vida, Mariana, por ter sido tão especial nesse processo.

A minha orientadora, Monica Pertel, por toda atenção e suporte, que foram essenciais.

Aos meus familiares e amigos, pelo apoio para que essa conquista se concretizasse.

## RESUMO

PORTES, André Bueno. **Aplicação de indicadores de circularidade no descomissionamento de plataformas offshore: um enfoque na reutilização de materiais e valorização de resíduos**. Rio de Janeiro, 2025. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

O descomissionamento de plataformas *offshore* representa um desafio crescente para a indústria de óleo e gás, com potencial para gerar passivos ambientais e financeiros relevantes. Embora o marco regulatório brasileiro exija Programas de Descomissionamento de Instalações (PDI) com alternativas técnicas, ambientais e socioeconômicas, faltam ferramentas que quantifiquem benefícios da economia circular nessa etapa. Este estudo propõe um modelo de aplicação de indicadores de economia circular para revelar barreiras e oportunidades de práticas sustentáveis no descomissionamento *offshore*. Foram selecionados quatro indicadores (taxa de reúso, taxa de reciclagem, taxa de valorização energética e taxa de perda/disposição) para comparar três diferentes cenários: (i) desmonte completo; (ii) extensão de vida útil e (iii) cenário intermediário de reaproveitamento parcial. A pesquisa adota um estudo de caso aplicado, de caráter exploratório e descritivo, com análise quali-quantitativa, com base no processo de descomissionamento da plataforma *offshore* FPSO P-35 da Petrobras, localizada na Bacia de Campos, campo de Marlim. Dados primários do PDI da P-35, normas setoriais e literatura especializada foram organizados em categorias e utilizados no cálculo dos indicadores em cada cenário. Os resultados indicam que o cenário base de desmonte completo apresenta a maior taxa de reciclagem (95%), enquanto na extensão de vida útil o reúso é priorizado (85%). O cenário intermediário de reaproveitamento parcial equilibra o reúso (20%) e a reciclagem (75%), demonstrando uma abordagem pragmática. Em todos os cenários uma fração do material é destinada para recuperação energética ou disposição final. A comparação demonstra que combinar reúso seletivo e reciclagem eficiente retém valor material, reduz fluxos de descarte e equilibra desempenho ambiental e econômico. Conclui-se que indicadores de circularidade são ferramentas estratégicas para apoiar decisões regulatórias e empresariais no fim da vida de plataformas. O modelo destaca a viabilidade da criação de cadastros de componentes reaproveitáveis, a oportunidade de fomentar cadeia nacional de desmontagem e o alinhamento dos processos a requisitos normativos, de reporte e políticas públicas, demonstrando como o setor de óleo e gás pode avançar para a economia circular com benefícios ambientais, econômicos e sociais.

**Palavras-chave:** economia circular; descomissionamento *offshore*; indicadores de circularidade; gestão de resíduos; FPSO P-35.

## ABSTRACT

PORTES, André Bueno. **Application of circularity indicators in the decommissioning of offshore platforms: a focus on material reuse and waste valorization.** Rio de Janeiro, 2025. Dissertation (Master's) – Environmental Engineering Program, Polytechnic School & School of Chemistry, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

The decommissioning of *offshore* platforms is a growing challenge for the oil and gas industry, with the potential to generate significant environmental and financial liabilities. Although the Brazilian regulatory *framework* requires Facilities Decommissioning Programs (PDI) that consider technical, environmental, and socioeconomic alternatives, tools to quantify circular economy benefits at this stage are still lacking. This study proposes a model for applying circular-economy indicators to reveal barriers and opportunities for sustainable practices in *offshore* decommissioning. Four indicators were selected (the reuse rate, recycling rate, energy-recovery rate, and loss/disposal rate) to compare three scenarios: (i) full dismantling; (ii) life extension; and (iii) an intermediate scenario of partial reuse. The research adopts an applied case study with an exploratory and descriptive scope, using a mixed qualitative–quantitative analysis, based on the decommissioning process of Petrobras' FPSO P-35, located in the Campos Basin, Marlim Field. Primary data from the P-35 PDI, industry standards, and specialized literature were organized into categories and used to calculate the indicators in each scenario. The results indicate that the baseline full-dismantling scenario shows the highest recycling rate (95%), whereas the life-extension scenario prioritizes reuse (85%). The intermediate scenario of partial reuse balances reuse (20%) and recycling (75%), demonstrating a pragmatic approach. In all scenarios, a share of materials is directed to energy recovery or final disposal. The comparison shows that combining selective reuse with efficient recycling retains material value, reduces discharge flows, and balances environmental and economic performance. We conclude that circularity indicators are strategic tools to support regulatory and corporate decision-making at the end of platform life. The model highlights the feasibility of establishing registries of reusable components, the opportunity to foster a national dismantling supply chain, and the alignment of processes with regulatory, reporting, and public-policy requirements, illustrating how the oil and gas sector can advance toward a circular economy with environmental, economic, and social benefits.

**Keywords** circular economy; *offshore* decommissioning; circularity indicators; waste management; FPSO P-35.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases do modelo de economia circular.....	25
Figura 2 - Fluxograma das técnicas de coleta de dados e seleção de indicadores de circularidade.....	74
Figura 3 - Mapa de Localização da P-35 na Bacia de Campos.....	81
Figura 4 - Etapas de desenvolvimento do estudo de caso sobre o descomissionamento da FPSO P-35.....	83
Figura 5 – Imagem do FPSO P-35 em sua locação (Campo de Marlim) .....	84
Figura 6 – Gráfico dos Indicadores de Circularidade – FPSO P-35 .....	107

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Indicadores de Circularidade – FPSO P-35.....	106
--	-----

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Diretrizes da ENEC 2024 e do PNEC 2025 aplicadas ao descomissionamento offshore e sua vinculação às metas e indicadores dos ODS.....	49
Quadro 2 – Indicadores de Reúso, reciclabilidade, valorização energética e disposição final no setor de O&G.....	62
Quadro 3 – Resumo do inventário de materiais da FPSO P-35.....	91

## LISTA DE SIGLAS

<b>ACV</b>	Análise do Ciclo de Vida
<b>ANP</b>	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
<b>ASG</b>	Ambiental, Social e Governança
<b>BOF</b>	Basic Oxygen Furnace
<b>BSEE</b>	Bureau of Safety and Environmental Enforcement
<b>CAPES</b>	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
<b>CCS</b>	Carbon Capture and Storage
<b>CEI</b>	Circular Economy Indicator
<b>CIDS</b>	Comissão Interministerial de Desenvolvimento Sustentável
<b>CNEN</b>	Comissão Nacional de Energia Nuclear
<b>CONAMA</b>	Conselho Nacional do Meio Ambiente
<b>CSRD</b>	Corporate Sustainability Reporting Directive
<b>CTI</b>	Circular Transition Indicators
<b>DNV</b>	Det Norske Veritas
<b>EAF</b>	Electric Arc Furnace
<b>EASAC</b>	European Academies Science Advisory Council
<b>EC</b>	Economia Circular
<b>EIA/RIMA</b>	Estudo de Impacto Ambiental / Relatório de Impacto Ambiental
<b>EMF</b>	Ellen MacArthur Foundation
<b>EN</b>	European Norm (padrão europeu)
<b>ESG</b>	Environmental Social and Governance
<b>ESRS</b>	European Sustainability Reporting Standards
<b>FGV</b>	Fundação Getúlio Vargas
<b>FPSO</b>	Floating Production Storage and Offloading
<b>GEE</b>	Gases de Efeito Estufa
<b>GRI</b>	Global Reporting Initiative
<b>IBAMA</b>	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
<b>IBP</b>	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
<b>IHM</b>	Inventory of Hazardous Materials

**IMO** International Maritime Organization

**IOGP** International Association of Oil & Gas Producers

**IPIECA** International Petroleum Industry Environmental Conservation Association

**ISO** International Organization for Standardization

**JPT** Journal of Petroleum Technology

**JRC** Joint Research Centre

**LCA** Life Cycle Assessment

**MCI** Material Circularity Indicator

**MEG** Monoetilenoglicol

**NORM** Naturally Occurring Radioactive Material

**NOROG** Norwegian Oil and Gas Association

**NSTA** North Sea Transition Authority

**O&G** Óleo e Gás

**OECD** Organisation for Economic Co-operation and Development

**OEUK** *Offshore* Energies UK

**OGUK** Oil & Gas UK

**ONU** Organização das Nações Unidas

**OSPAR** Convenção Oslo Paris para Proteção do Ambiente Marinho do Atlântico Nordeste

**P&A** Plug and Abandon

**PDI** Programa de Descomissionamento de Instalações

**PNEC** Plano Nacional de Economia Circular

**PLSV** Pipe Lay Support Vessel

**PNRS** Política Nacional de Resíduos Sólidos

**PPI** Programa de Parcerias de Investimentos

**ROV** Remotely Operated Vehicle

**SASB** Sustainability Accounting Standards Board

**SEPA** Scottish Environment Protection Agency

**SLB** Schlumberger

**TCU** Tribunal de Contas da União

**TR** Taxa de Reúso

**TRec** Taxa de Reciclagem

**TP** Taxa de Perda / Disposição Final

**TVE** Taxa de Valorização Energética

**USP** Universidade de São Paulo

**VLCC** Very Large Crude Carrier

**WBCSD** World Business Council for Sustainable Development

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	17
1.1 JUSTIFICATIVA.....	19
1.2 OBJETIVOS.....	21
1.2.1 Objetivo geral .....	21
1.2.2 Objetivos específicos .....	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	23
2.1 ECONOMIA CIRCULAR .....	23
2.2 DESCOMISSIONAMENTO DE PLATAFORMAS <i>OFFSHORE</i> .....	32
2.2.1 Processo técnico-operacional do descomissionamento <i>offshore</i> .....	35
2.2.2 Gestão de resíduos e materiais no descomissionamento .....	38
2.2.3 Contexto regulatório e econômico brasileiro .....	44
2.3 INDICADORES DE CIRCULARIDADE APLICÁVEIS AO SETOR DE ÓLEO E GÁS.....	50
2.3.1 Critérios de seleção de indicadores .....	50
2.3.2 Classificação dos indicadores selecionados .....	53
2.4 BARREIRAS E OPORTUNIDADES PARA ADOÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR .....	63
2.5. LACUNAS DE PESQUISA.....	66
3 METODOLOGIA.....	69
3.1 TIPO DE PESQUISA .....	69
3.2 DELIMITAÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DO ESTUDO DE CASO.....	70
3.3 TÉCNICAS DE COLETA DE DADOS.....	70
3.4 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE DE DADOS .....	74
3.5 FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS UTILIZADOS .....	76
4. ESTUDO DE CASO .....	80
4.1 INTRODUÇÃO.....	80
4.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PLATAFORMA P-35.....	83
4.3 MAPEAMENTO DE FLUXOS DE MATERIAIS E RESÍDUOS.....	87
4.4 INDICADORES DE CIRCULARIDADE APLICADOS .....	95
4.4.1 Cenário C intermediário de reaproveitamento parcial na FPSO P-35	101
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	104

4.5.1 Discussões para estudo de caso da P-35.....	108
4.5.2 Implicações para a economia circular no setor offshore brasileiro ....	112
5. CONCLUSÃO.....	116
6. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	119
REFERÊNCIAS.....	121



## 1 INTRODUÇÃO

A economia circular (EC) pode ser definida como um modelo econômico sustentável que contrasta com o paradigma linear tradicional de “extrair-produzir-descartar”, o qual leva ao consumo de recursos de forma única e não regenerativa, bem como à geração crescente de resíduos. No modelo linear, matérias-primas são transformadas em produtos e, após o uso, tornam-se descarte, um processo insustentável que acarreta poluição e exaustão de recursos naturais (Nappo, 2023).

Em oposição a esse padrão, a EC propõe um sistema regenerativo no qual o conceito de resíduo é virtualmente eliminado, mantendo produtos e materiais em circulação contínua por meio de práticas de redução, reutilização, reciclagem e recuperação (Kirchherr *et al.*, 2017). Segundo Bagur Femenías *et al.* (2024) essa abordagem busca imitar os ciclos da natureza, reinserindo os resíduos como insumos no processo produtivo, prolongando a vida útil dos materiais e reduzindo a necessidade de extrair recursos finitos.

Governos e instituições ao redor do mundo têm adotado a EC como estratégia para dissociar o crescimento econômico do uso excessivo de recursos e, simultaneamente, obter benefícios ambientais, econômicos e sociais (Kirchherr *et al.*, 2017). Essa tendência reflete a crescente pressão global em relação ao tema “sustentabilidade”, onde as organizações são estimuladas a incorporar as três dimensões do desenvolvimento sustentável (econômica, ambiental e social) em suas operações, em linha com as metas dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) para 2030 (Mangla *et al.*, 2020). Nesse contexto, a economia circular emerge como parte essencial da resposta às crises ambientais e da busca por um desenvolvimento mais equilibrado, capaz de reduzir impactos negativos e gerar valor compartilhado (D’Amato *et al.*, 2017).

Setores industriais de grande porte e infraestrutura pesada, como o de óleo e gás (O&G), destacam-se pelo elevado potencial de ganhos ao adotarem os princípios da EC. Historicamente, porém, a indústria de O&G vem priorizando

as questões relacionadas à produtividade e segurança operacional, conferindo menor ênfase à dimensão da sustentabilidade em longo prazo (Shqairat; Sundarakani, 2018). Esse cenário, no entanto, vem mudando ao longo dos anos, em resposta às crescentes exigências regulatórias e demandas sociais pela redução dos impactos ambientais associados a essa indústria.

Nos próximos anos, o descomissionamento de plataformas *offshore* de petróleo e gás (isto é, o processo de desativação e destinação final dessas estruturas ao término de sua vida útil) configura-se como um dos grandes desafios nas esferas industrial, ambiental, econômica e social (Capobianco *et al.*, 2021). Em escala global, existe um número considerável de instalações *offshore* que estão se aproximando do fim de sua vida operacional, o que intensifica as discussões sobre como conduzir seu desmonte de forma sustentável.

Tradicionalmente, a remoção completa e o descarte dos equipamentos tem sido a prática adotada, mas fatores como custos elevados, riscos ambientais e demandas por responsabilidade socioambiental estão impulsionando a busca por alternativas mais circulares no descomissionamento (Capobianco *et al.*, 2021). Em outras palavras, ganha força a ideia de “descomissionamento sustentável”, que consiste em desenvolver soluções mais eficientes e sustentáveis para a desativação de instalações *offshore*, considerando não apenas aspectos técnicos e de segurança, mas também a maximização do reúso de componentes, a reciclagem de materiais e a redução dos resíduos destinados à disposição final.

Essa mudança de paradigma está alinhada à tendência de flexibilização regulatória que vem ocorrendo em alguns países, que têm permitido opções como remoção parcial, *repurpose* (reutilização com novas funções) ou *rigs-to-reefs* (conversão de estruturas em recifes artificiais), quando comprovados os benefícios ambientais e de segurança. Assim, integrar os princípios da economia circular ao processo de descomissionamento *offshore* significa transformar um passivo potencial (milhares de toneladas de aço, equipamentos e outros materiais oriundos de plataformas obsoletas) em recursos que possam ser reaproveitados ou reinseridos em cadeias produtivas, minimizando impactos e gerando valor. Entretanto, para implementar essa visão de forma eficaz, é

fundamental dispor de métricas e indicadores que permitam avaliar objetivamente o quão “circular” é um determinado projeto de descomissionamento, orientando as tomadas de decisão e permitindo comparar diferentes cenários de destinação de materiais (Montenegro, 2022).

Do ponto de vista acadêmico, nota-se que a interface entre economia circular e descomissionamento *offshore* ainda é pouco explorada. Capobianco *et al.* (2021) destacam que a literatura carece de estudos sobre as oportunidades emergentes no descomissionamento de plataformas petrolíferas, em especial àquelas voltadas a estratégias inovadoras de reúso e aproveitamento de materiais. Além disso, Senavirathna *et al.* (2022) ressaltam que ainda existem lacunas na abordagem dos desafios associados ao gerenciamento de resíduos e à mensuração da sustentabilidade nesses projetos.

Em outras palavras, ainda há pouca evidência científica de como aplicar concretamente os princípios da EC no fim do ciclo de vida de plataformas *offshore*; um momento crítico em que grandes volumes de resíduos perigosos e não perigosos são gerados e demandam destinação adequada. Este trabalho busca contribuir para suprir essa lacuna, investigando a aplicação de indicadores de economia circular no contexto do descomissionamento de plataformas *offshore*, com ênfase no reúso de materiais e na valorização de resíduos.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A crescente pressão por operações mais sustentáveis tem levado organizações de diferentes setores a incorporarem os princípios da economia circular (EC) em suas estratégias. No setor de O&G, o avanço da transição para uma economia de baixo carbono e o reconhecimento da limitação dos recursos naturais têm impulsionado a busca por soluções que otimizem o uso de insumos e viabilizem o reaproveitamento de materiais. Trata-se de uma indústria com elevado potencial de geração de impactos ambientais ao longo de toda sua cadeia de valor, o que reforça a necessidade da adoção de práticas mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

A EC se apresenta como uma ferramenta que pode ser aplicada para apoiar os objetivos de sustentabilidade empresarial, podendo contribuir inclusive para o atendimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), em especial o ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis, com destaque para a Meta 12.5, que propõe reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso (ONU, 2025). Embora já existam iniciativas circulares na indústria de O&G, elas se concentram majoritariamente em modelos de negócio e em fases produtivas, sendo ainda incipientes as aplicações voltadas ao fim da vida útil dos ativos, especialmente no descomissionamento de plataformas *offshore*.

Diante disso, a justificativa deste trabalho se sustenta em três dimensões complementares: acadêmica, técnico-econômica e socioambiental. Na dimensão acadêmica, a pesquisa inova ao integrar conceitos de economia circular a um problema de engenharia e gestão ambiental complexo, preenchendo uma lacuna identificada na literatura sobre descomissionamento sustentável de plataformas *offshore*. A aplicação de um conjunto de indicadores em um caso real contribui para o avanço do conhecimento, fornecendo um método de avaliação da circularidade que pode embasar investigações futuras e servir de referência para outros estudos de fim de vida de ativos industriais.

Na dimensão técnico, o estudo propõe instrumentos que auxiliam na tomada de decisão sobre reuso, reciclagem e outras formas de destinação, contribuindo para a eficiência na gestão de recursos. Além disso, dialoga com políticas públicas atuais voltadas ao desenvolvimento sustentável, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos e o recém-aprovado Plano Nacional de Economia Circular (Brasil, 2025). Também dialoga com iniciativas internacionais ligadas à transição energética, demonstrando como o setor de petróleo pode contribuir para essa transição ao incorporar práticas de economia circular que agregam valor e reduzem impactos no momento do descomissionamento de suas instalações.

Do ponto de vista econômico, estratégias de reuso e reciclagem podem resultar em economia de custos para as empresas, seja pela redução de custos com destinação final, seja pela possibilidade de reaproveitamento ou

comercialização de equipamentos. Essas práticas podem ainda fomentar novas oportunidades de negócio em cadeias produtivas voltadas ao desmonte, à reciclagem e à remanufatura. Dessa forma, o estudo oferece subsídios para uma gestão mais eficiente e inteligente dos recursos envolvidos no descomissionamento, alinhadas às diretrizes de sustentabilidade.

Na dimensão socioambiental, o trabalho mostra-se oportuno frente à necessidade de reduzir os passivos ambientais do setor de petróleo, especialmente aqueles associados à destinação convencional de plataformas *offshore*, em relação ao sucateamento ou à disposição em aterros. Essa prática implica não apenas em perdas de materiais valiosos, mas também em potenciais impactos negativos ao meio ambiente. A aplicação dos princípios da EC nesse contexto pode mitigar tais impactos, evitando a sobrecarga de aterros, reduzindo emissões e prevenindo a poluição marinha e terrestre associada a desmontes inadequados. Adicionalmente, contribui para o desenvolvimento das estratégias de sustentabilidade empresarial e para o atendimento dos ODS da ONU.

Por fim, além de contribuir para o seu crescimento profissional, a participação discente nesse Mestrado Profissional e o desenvolvimento do presente estudo têm o intuito de contribuir para a sustentabilidade do setor de óleo e gás e disponibilizar um referencial para a implementação de práticas sustentáveis na fase de descomissionamento das plataformas *offshore*, reforçando a importância de uma abordagem circular como elemento central para uma transição mais eficiente e responsável na gestão de ativos industriais, considerando todo o ciclo de vida dessas instalações.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é propor um modelo de aplicação de indicadores de economia circular na fase de descomissionamento de plataformas *offshore* na indústria de óleo e gás, visando identificar barreiras e oportunidades que possam facilitar a adoção de práticas sustentáveis nessa etapa do ciclo de vida das instalações.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- (i) Identificar e mapear os indicadores de circularidade disponíveis na literatura, avaliando sua relevância e aplicabilidade no contexto da sustentabilidade do setor de óleo e gás;
- (ii) Selecionar os indicadores de circularidade mais adequados para a fase de descomissionamento de plataformas *offshore*, com enfoque na gestão e valorização de resíduos, considerando critérios de desempenho ambiental, social e econômico;
- (iii) Desenvolver um modelo de aplicação dos indicadores selecionados capaz de simular diferentes cenários de descomissionamento de plataformas *offshore*;
- (iv) Realizar um estudo de caso para o modelo de aplicação proposto, utilizando dados reais de uma plataforma *offshore* em fase de descomissionamento;
- (v) Identificar barreiras e oportunidades para a ampliação da adoção de práticas de economia circular durante o descomissionamento, propondo recomendações para facilitar a integração dessas práticas na indústria.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular (EC) representa um modelo econômico sustentável que contrasta com o paradigma linear convencional, caracterizado pela extração, produção, consumo e descarte de recursos naturais. No modelo linear, matérias-primas são transformadas em produtos que, após o uso, tornam-se resíduos descartados, podendo gerar impactos ambientais, como poluição e exaustão de recursos (Nappo, 2023).

Como alternativa a esse padrão, a EC propõe um sistema regenerativo, projetado para eliminar o conceito de descarte definitivo e manter continuamente produtos e materiais em circulação, por meio de estratégias como a redução, reutilização, reciclagem e recuperação ao longo de toda a cadeia produtiva e de consumo (Kirchherr *et al.*, 2017). Segundo Geissdoerfer *et al.* (2017), a gestão ambiental contemporânea vem gradualmente substituindo intervenções corretivas ao término dos processos produtivos por uma abordagem preventiva e integrada, que incorpora as fase de projeto, a construção e montagem, a produção, a manutenção e a destinação final dos bens, adotando uma perspectiva de ciclo de vida completo.

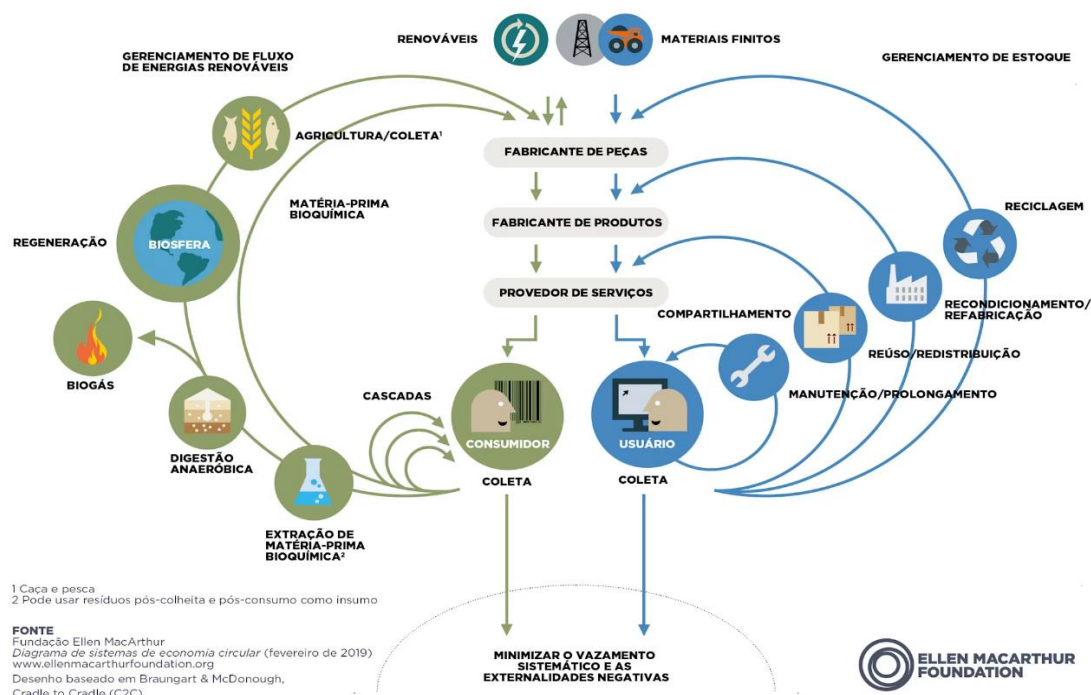
Tal lógica converge com o conceito de economia circular descrito por Bagur Femenías *et al.* (2024), o qual busca reproduzir os ciclos naturais ao reinserir resíduos como insumos, prolongando a circulação de materiais e produtos e reduzindo a extração de recursos finitos. Ao integrar essas concepções, evidencia-se que a prevenção desde o projeto, somada à recirculação contínua de recursos, forma um sistema econômico que tende a desassociar o crescimento econômico da pressão sobre matérias-primas, replicando os fluxos de energia e nutrientes observados nos ecossistemas naturais.

Uma referência essencial nesse campo é o conceito *cradle-to-cradle* (do berço ao berço), estabelecido por McDonough e Braungart (2010). Ao contrário do conceito tradicional *cradle-to-grave* (do berço ao túmulo), o princípio *cradle-*

*to-cradle* defende que todos os resíduos podem (e devem) retornar aos processos de produção como recursos, inserindo-se novamente no ciclo produtivo.

Com o objetivo de operacionalizar essa lógica em termos práticos, a Fundação Ellen MacArthur (EMF) propôs dois ciclos fundamentais: o ciclo biológico e o ciclo técnico. No ciclo biológico, materiais biodegradáveis retornam à biosfera via compostagem ou digestão anaeróbia, enriquecendo ecossistemas naturais. Por outro lado, o ciclo técnico abrange materiais não biodegradáveis, como metais e polímeros, que circulam em ciclos industriais fechados, através de reutilização, recondicionamento e reciclagem, mantendo seu valor pelo maior tempo possível. Essa dinâmica sistêmica da economia circular pode ser visualizada no famoso “diagrama da borboleta”, proposto pela EMF, apresentado na Figura 1, que destaca os fluxos internos (reutilização e remanufatura) e externos (reciclagem) dos ciclos técnico e biológico, consolidando o princípio de que “resíduo é alimento”, isto é, todo material considerado resíduo em um ciclo pode ser reaproveitado como insumo em outro, garantindo a continuidade do fluxo (McDonough; Braungart, 2010).

Figura 1 – Fases do modelo de economia circular



Ellen MacArthur Foundation (2024).



A partir da década de 2010, a economia circular passou a ganhar mais reconhecimento, impulsionada pelos esforços da Fundação Ellen MacArthur, cujo relatório “*Towards the Circular Economy*” (EMF, 2013) demonstrou a viabilidade econômica e empresarial da transição para modelos circulares, estimando benefícios financeiros relevantes e difundindo internacionalmente os conceitos dos ciclos biológico e técnico.

Esse movimento se fortaleceu diante do cenário global atual, que é marcado por crescentes preocupações quanto ao esgotamento acelerado de recursos naturais e à intensificação da degradação ambiental. Diversos estudos alertam que a extração contínua de matérias-primas, característica do modelo de economia linear atual, tende a se tornar insustentável, devido à finitude dos recursos e à limitada capacidade planetária de absorver resíduos (Ghisellini *et al.*, 2016).

Nesse contexto, a economia circular vem sendo compreendida como uma alternativa estratégica às crises ambientais e à instabilidade dos preços das commodities. Ao manter materiais em circulação e estimular a regeneração de recursos renováveis, a EC contribui para reduzir a dependência de novas extrações e mitigar riscos associados à escassez futura (Geissdoerfer *et al.*, 2017). Além disso, práticas circulares têm papel decisivo na redução de emissões de gases de efeito estufa e de outros impactos ambientais negativos, alinhando-se aos ODS estabelecidos pela ONU (D’Amato *et al.*, 2017).

Diante desse avanço conceitual e de sua crescente relevância prática, governos e organizações internacionais, como a Comissão Europeia, passaram a adotar a EC como política estratégica, com o intuito de dissociar o crescimento econômico do uso excessivo de recursos naturais e reduzir pressões ambientais (European Commission, 2020).

Setores industriais intensivos em ativos físicos e infraestrutura pesada, como é o caso da indústria de óleo e gás (O&G), apresentam elevado potencial de benefícios ao adotarem a economia circular. Historicamente, segundo Shqairat; Sundarakani (2018), a indústria de O&G vem priorizando a produtividade e a segurança operacional, conferindo menor ênfase à dimensão da sustentabilidade em longo prazo. Contudo, frente às exigências crescentes

de redução dos impactos ambientais, torna-se cada vez mais relevante a adoção de soluções tecnológicas, práticas de gestão e indicadores que orientem a integração efetiva dos princípios da EC no setor, sobretudo no que diz respeito à gestão eficiente de materiais e equipamentos ao longo de todo o seu ciclo de vida.

A transição para a EC tem sido guiada por uma variedade de normas e *frameworks*<sup>1</sup> desenvolvidos em meio acadêmico, institucional e setorial. Entre os referenciais normativos mais consolidados estão a série da Organização Internacional de Normalização (ISO) ISO 14040 e ISO 14044, dedicadas à Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Publicadas em 2006, essas normas definem princípios, estrutura e requisitos metodológicos que conferem rigor científico e transparência aos estudos de ACV, evitando comparações injustas e uso indevido de resultados (ISO, 2006a; ISO, 2006b). Elas estabelecem quatro fases clássicas (definição de objetivo e escopo, inventário de entradas e saídas, avaliação de impactos e interpretação) e permitem quantificar benefícios ou cargas deslocadas quando se comparam estratégias lineares e circulares como, por exemplo, “reciclar” *versus* “aterrar” os materiais provenientes do descomissionamento de plataformas *offshore*.

A ACV é particularmente relevante na EC porque previne a transferência de impactos entre os diferentes estágios da cadeia produtiva. Quando a reciclagem do aço de uma plataforma evita a extração de minério e as emissões siderúrgicas, a ISO 14040 e 14044 fornecem o método para evidenciar esses ganhos ou perdas.

Adicionalmente, para abarcar impactos sociais associados, foi recentemente proposta uma norma complementar, a ISO 14075 (Avaliação Social do Ciclo de Vida, LCA Social), que amplia o escopo da ACV clássica ao incorporar aspectos sociais e de bem-estar das comunidades envolvidas (ISO, 2024c). Ao adotar esse recorte ampliado, projetos de economia circular podem

---

<sup>1</sup> *Framework* pode ser compreendido como uma malha de conceitos relacionados que, organizados de modo lógico, oferece estrutura para analisar um fenômeno, delimitar variáveis e explicitar relações entre elas. Na esfera da sustentabilidade, funcionam como mapas conceituais que conectam pressupostos teóricos, metas ambientais e indicadores operacionais, auxiliando pesquisadores e profissionais a traduzirem princípios abstratos em práticas mensuráveis (Nickerson; Zenger, 2013).

avaliar não apenas os impactos ambientais, mas também efeitos sobre emprego, saúde, condições de trabalho e equidade social em cada etapa do ciclo vital dos ativos.

Reconhecendo a importância da EC, a ISO criou a família de normas ISO 59000. A família de normas ISO 59000 foi desenvolvida justamente para suprir essa lacuna, oferecendo diretrizes mais práticas de implementação de modelos de negócio circulares e redes de valor. A ISO 59004 (2024a) padroniza o vocabulário, os princípios e as diretrizes gerais para a implementação dos princípios de EC nas organizações, enquanto a ISO 59010 (2024b) detalha as orientações para a transição de modelos de negócio e redes de valor. Esta última apresenta um roteiro para que organizações saiam do paradigma linear: define limites de circularidade, mapeia fluxos de recursos e classifica ações voltadas à criação, retenção e recuperação de valor. Além disso, recomenda práticas como a avaliação de maturidade, a identificação de lacunas e o engajamento de parceiros ao longo da cadeia de valor. Também orienta ajustes na proposta de valor, nas atividades-chave e na estrutura de custos e receitas, promovendo a integração da circularidade ao núcleo estratégico das organizações.

Em particular, a ISO 59010 traz recomendações claras sobre simbiose industrial (o aproveitamento mútuo de resíduos entre empresas) e outras práticas de cooperação que viabilizam a circularidade em escala setorial (ISO, 2024b). Assim, a ISO 59010 atua como um guia operacional complementando os princípios amplos da EMF, ajudando empresas de óleo e gás a incorporarem efetivamente a economia circular em suas operações (por exemplo, definindo processos para reúso de plataformas, reciclagem de metais e outras iniciativas alinhadas à “destinação verde” no descomissionamento *offshore*).

Complementando esse arcabouço, a ISO 59020 (2024c) operacionaliza a mensuração da circularidade: define fronteiras do sistema, mapeia fluxos de entrada/saída, orienta a seleção de indicadores e a transparência de premissas e co-produtos. Neste estudo, essa norma ISO funciona como guia para estruturar os indicadores aplicados ao descomissionamento, assegurando comparabilidade entre cenários e reprodutibilidade dos cálculos.

Antes do conjunto ISO 59000, o *framework* mais influente era o proposto pela Ellen MacArthur Foundation (EMF). A partir de 2012, relatórios como “*Towards the Circular Economy*” difundiram três princípios fundamentais: eliminar resíduos e poluição desde a fase de design, manter produtos e materiais em uso pelo maior tempo possível e regenerar os sistemas naturais.

Embora a Fundação Ellen MacArthur (EMF) tenha formulado princípios aplicáveis a diversos setores da economia, esses conceitos já inspiraram iniciativas específicas no setor de óleo e gás. Grandes empresas do setor vêm incorporando práticas circulares em suas operações de descomissionamento.

A Shell, por exemplo, implementou estratégias de reúso de materiais de plataformas *offshore* desativadas e reciclagem de fluidos de perfuração, diminuindo descartes e impactos ambientais em suas atividades (Adebayo *et al.*, 2024).

No contexto brasileiro, observa-se iniciativa similar na destinação sustentável da plataforma P-32, conduzida pela Petrobras. A unidade, retirada da Bacia de Campos em dezembro de 2023, foi rebocada até o Estaleiro Rio Grande, onde passará por um processo de reciclagem que abrange todo o ciclo do desmantelamento. O modelo adotado prevê inventário prévio de materiais, controle de contaminantes e acompanhamento técnico da companhia, de maneira que praticamente 100 % da estrutura seja reaproveitada. O aço resultante será incorporado pela Gerdau na produção de novos insumos, evitando a extração mineral e mantendo materiais em uso conforme os princípios da economia circular (Agência Petrobras, 2023).

Tais iniciativas demonstram que os princípios da economia circular, como recuperação de materiais e prolongamento da vida útil de componentes, também podem agregar valor na indústria de óleo e gás, tradicionalmente vista como um modelo predominantemente linear. Para apoiar e mensurar a eficácia dessas iniciativas, diversos indicadores vêm sendo desenvolvidos e aplicados em diferentes contextos. Os indicadores de circularidade têm evoluído significativamente nas últimas décadas, com destaque para o *Material Circularity Indicator* (MCI), indicador desenvolvido pela Ellen MacArthur Foundation e amplamente validado em estudos acadêmicos (EMF, 2019).

De maneira geral, o MCI mede o grau de circularidade em escala de 0 a 1, sendo 1 o nível máximo, correspondente a um fluxo totalmente fechado. Essa métrica avalia aspectos como a origem dos materiais (reciclados ou virgens), a duração do uso do produto e o potencial de reutilização ou reciclagem ao final da vida útil, permitindo comparar o desempenho circular de diferentes soluções. Dräger *et al.* (2022), adaptaram o MCI para produtos da construção civil e demonstraram sua robustez para avaliar os fluxos materiais, a durabilidade e a reciclabilidade de produtos no setor, evidenciando a aplicabilidade prática e relevância científica do indicador.

Além do MCI, outro indicador amplamente utilizado é o *Circular Economy Index* (CEI), proposto por Di Maio e Rem (2015) e refinado por Corona *et al.* (2019). O CEI introduz uma dimensão econômica à avaliação da circularidade, ao comparar o valor do material reciclado com o valor do mesmo produto produzido com insumos virgens. Dessa forma, quantifica a retenção econômica na reciclagem, oferecendo uma dimensão monetária ao desempenho circular.

Estudos como o de Corona *et al.* (2019) destacam que, embora as ferramentas disponíveis ainda não cubram completamente todos os aspectos da economia circular, o MCI e o CEI podem ser aplicados de forma complementar. A combinação desses dois indicadores estabelece uma base sólida para medir o progresso organizacional de forma quantitativa e comparável, reforçando sua aplicabilidade nos estudos sobre economia circular.

Ampliando esse conjunto de ferramentas, outras iniciativas recentes têm buscado consolidar indicadores com foco mais abrangente e aplicabilidade empresarial. Desde 2020, o *Circular Transition Indicators* (CTI) consolidou-se como referência para mensurar a circularidade corporativa. Desenvolvido pelo Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (World Business Council for Sustainable Development – WBCSD), disponibiliza métricas quantitativas que contemplam insumos circulares, taxas de reutilização e geração de receita, aplicáveis a empresas de diferentes portes e setores (WBCSD, 2023). A padronização proposta por esses indicadores tem permitido monitorar, de forma consistente, a transição de modelos lineares para circulares, facilitando comparações intersetoriais (KPMG, 2023).

Em 2025, o WBCSD lançou o *CTI Social Impact*, expandindo o escopo da ferramenta original ao incorporar dimensões de justiça social e geração de empregos. Essa evolução evidencia a transição de uma abordagem centrada exclusivamente em fluxos de massa para uma perspectiva mais integrada, que considera também os impactos socioeconômicos das estratégias circulares (WBCSD, 2025).

A ferramenta *Circulytics*, também desenvolvida pela Ellen MacArthur Foundation, avalia empresas a partir de dois grupos de indicadores. O primeiro reúne habilitadores (estratégia e planejamento, inovação, pessoas e competências, operações e engajamento externo) enquanto o segundo mede os resultados em termos de produtos e materiais, serviços, ativos, água, energia e finanças (Ellen MacArthur Foundation, 2020). Com a adoção do padrão europeu ESRS E5, que impõe métricas obrigatórias de circularidade para o reporte corporativo, a fundação anunciou a descontinuidade do *Circulytics*. Ainda assim, seus princípios de mapeamento de fluxos de materiais e retenção de valor permanecem úteis para avaliações internas e para orientar a transição rumo às exigências do ESRS E5.

Para setores intensivos em ativos físicos, como o de óleo e gás, o *Energy Institute* e a IPIECA analisaram em 2024 a adequação do CTI e do *Circulytics* (da *Ellen MacArthur Foundation*) às especificidades dessa cadeia de valor. Concluíram que, embora o CTI ofereça robustez na mensuração de fluxos materiais, não contempla de forma satisfatória algumas estratégias qualitativas essenciais ao segmento. Por outro lado, o *Circulytics* cobre aspectos relacionados à governança e ao modelo de negócios, mas apresenta limitações quanto à granularidade quantitativa, ou seja, não oferece dados numéricos detalhados o suficiente para permitir uma análise precisa (Energy Institute; IPIECA, 2024). Assim, a literatura mais recente recomenda um modelo híbrido, no qual o CTI fornece a base numérica, enquanto ferramentas qualitativas como o *Circulytics* complementam a análise estratégica, possibilitando uma avaliação mais abrangente da circularidade no setor, considerando desde a fase de exploração até o descomissionamento.

Apesar dos avanços, ainda há desafios quando se trata de medir a circularidade de forma integrada, considerando os pilares ambiental, econômico

e social. Embora a economia circular demonstre potencial para gerar benefícios nessas três dimensões, a literatura recente revela que o equilíbrio entre elas ainda não foi plenamente alcançado. Bocken et al. (2016) já destacavam que determinados modelos de negócio circulares (como a oferta de serviços em substituição a produtos, práticas de compartilhamento e estratégias de extensão da vida útil) apresentam potencial de geração de emprego local, capacitação técnica e inclusão social, embora tais benefícios raramente sejam mensurados de forma sistemática. Na mesma linha temporal, Murray, Skene e Haynes (2017) problematizam a ausência da dimensão social nas definições predominantes de economia circular, enquanto Geissdoerfer et al. (2017) argumentam que a efetivação da sustentabilidade por meio da CE depende do equilíbrio entre os três pilares, condição ainda pouco observada.

Nos últimos anos, a literatura reforçou essa lacuna: Scarpellini et al. (2022) ressaltam que a avaliação de impactos sociais em modelos circulares é incipiente e carece de consolidação metodológica, enquanto Valencia, Bocken e Loaiza (2023) identificam que a maioria das formulações de CE privilegia fluxos materiais e energéticos, relegando aspectos de equidade e inclusão social. Mais recentemente, Ferrer-Serrano e Salesa (2025) analisam o chamado paradoxo da economia circular sob a ótica do *Triple Bottom Line*<sup>2</sup> e demonstram que os estudos seguem concentrando-se predominantemente nos aspectos ambientais e econômicos, atribuindo menor atenção à dimensão social.

No caso particular do setor de O&G, a aplicação dos princípios circulares recai sobre a gestão de ativos e materiais, pois o produto, o combustível fóssil, é consumido de forma irreversível. Estudos recentes abordam os desafios de aplicar os princípios da circularidade no processo de descomissionamento *offshore*. Nappo (2023), por exemplo, propõe um *framework* que combina ACV e indicadores de economia circular para subsidiar as tomadas de decisão sobre a retirada de plataformas. Vidal *et al.* (2022) revisitaram os critérios de seleção de rotas de destinação, demonstrando que reutilizar módulos *topside* ou reciclar o aço resultam em maior valor ambiental do que descarte. Complementarmente,

---

<sup>2</sup> O conceito de Triple Bottom Line (TBL), introduzido por John Elkington em 1994, refere-se à avaliação integrada de desempenho de organizações e políticas a partir de três dimensões interdependentes: ambiental, social e econômica (ELKINGTON, 1997).

Wei e Zhou (2024) reforçaram a importância de considerar tanto os riscos ecológicos e quanto as oportunidades de reúso na definição dos planos de abandono e remoção.

Empresas do setor vêm respondendo a essa tendência com ações concretas. O Relatório de Sustentabilidade de 2022 da Petrobras (Petrobras, 2023d) apresenta metas anuais explícitas para reduzir a geração de resíduos sólidos e ampliar a reutilização de materiais metálicos, metas essas reiteradas nos relatórios subsequentes. Como reforço a esse compromisso, a empresa instituiu em 2023 sua Política de Destinação Verde para plataformas, com foco no reúso de aço, na minimização de resíduos e na reciclagem em estaleiros nacionais, prevista para ser aplicada em 26 plataformas até 2028, consolidando-se, assim, como uma referência global em práticas circulares no setor de óleo e gás (Petrobras, 2023c).

## 2.2 DESCOMISSIONAMENTO DE PLATAFORMAS *OFFSHORE*

O ciclo de vida das plataformas *offshore* compreende as fases de concepção, construção, operação, manutenção e descomissionamento. Essas estruturas são projetadas para operar por longos períodos, comumente entre 20 e 40 anos, sendo submetidas a condições ambientais extremas e exigências operacionais intensas. Uma abordagem baseada no ciclo de vida permite integrar critérios de sustentabilidade desde a fase de projeto até o encerramento de suas atividades, favorecendo estratégias que reduzam impactos socioambientais e maximizem a recuperação de valor dos ativos ao final de sua vida útil (Capobianco et al., 2021).

As etapas do ciclo de vida podem ser agrupadas em: (i) planejamento e licenciamento ambiental; (ii) construção e comissionamento; (iii) operação e produção; (iv) manutenção e gestão de integridade; (v) descomissionamento e disposição final.

O descomissionamento *offshore* é a fase final do ciclo de vida das plataformas marítimas. Em geral, a decisão por descomissionar ocorre quando a produção deixa de ser economicamente viável, isto é, quando a receita obtida



não cobre mais os custos operacionais, transformando ativos em passivos financeiros (Tan *et al.*, 2021). Adicionalmente, fatores ambientais e de segurança pesam nessa decisão, já que estruturas envelhecidas podem apresentar riscos à integridade física e ao meio ambiente.

De acordo com Li e Hu (2022), o descomissionamento de instalações offshore é um processo complexo e estruturado em três estágios: pré-descomissionamento; execução; e pós-descomissionamento. No estágio de pré-descomissionamento, são realizadas atividades como o planejamento detalhado, coleta de informações de engenharia, inventário de materiais, avaliação de risco e de alternativas, mobilização de recursos e obtenção de licenças. Na fase de execução, efetua-se a desativação, remoção e a destinação dos componentes, que podem ser reciclados, descartados ou reutilizados. Por fim, o pós-descomissionamento compreende a demobilização das equipes, a elaboração de relatórios finais e o monitoramento ambiental contínuo, assegurando conformidade regulatória e mitigação de impactos.

Conforme afirmado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2020), o descomissionamento deve ser planejado como parte integrante do ciclo de vida dos empreendimentos *offshore*, e não como um evento isolado, sendo obrigatória a apresentação de um Programa de Descomissionamento de Instalações (PDI) que inclua alternativas técnicas, ambientais e econômicas para o encerramento das operações.

Historicamente, as operações de descomissionamento apresentaram desafios significativos de ordem técnica, econômica e ambiental. Em fases iniciais da indústria offshore, a ausência de regulamentação específica e os custos elevados de remoção total levaram, em alguns casos, à permanência parcial das estruturas no local, ou à sua conversão em recifes artificiais (*rigs-to-reefs*). Com o avanço das exigências ambientais e a consolidação de normas internacionais a partir da década de 1980, as práticas passaram a priorizar a remoção completa e a destinação controlada dos materiais (Bull *et al.*, 2019; Brill, 2018). Em paralelo, a indústria naval experimentou o fenômeno da globalização do desmonte, com o envio em larga escala de embarcações obsoletas para estaleiros localizados no Sul da Ásia, principalmente em Bangladesh, Índia e Paquistão. Relatórios recentes da *Human Rights Watch* (2023) denunciam

condições de trabalho precárias nesses locais, incluindo jornadas exaustivas, ausência de equipamentos de proteção individual, acidentes graves e exposição a substâncias tóxicas, o que caracteriza graves violações de direitos humanos e, em muitos casos, situações que se aproximam do trabalho forçado.

A escala desse problema pode ser considerada expressiva. Segundo *NGO Shipbreaking Platform* (2017), no ano de 2016, das 668 embarcações desmontadas globalmente, 87 % foram desmanteladas nos chamados “estaleiros de maré”. Mesmo após a retração desse mercado, em 2022 ainda foram contabilizadas 443 unidades, das quais 292 (equivalentes a 80 % da tonelagem total) tiveram o mesmo destino (*NGO Shipbreaking Platform*, 2023a). Em 2024, essa proporção se manteve: 80% do porte global (o equivalente a 409 navios) continuou a ser desmontado nessas regiões (*NGO Shipbreaking Platform*, 2025).

Esse cenário intensificou a pressão internacional por práticas de descomissionamento mais responsáveis e sustentáveis, liderada por ONGs e sindicatos que denunciaram a externalização de riscos humanos e ambientais para os países em desenvolvimento. Essas denúncias repercutiram na imprensa especializada e em publicações do setor (*WASTE Management World*, 2017), ampliando o debate sobre a necessidade de uma regulamentação mais rígida e de aplicação de soluções baseadas em justiça socioambiental.

No Brasil, esse debate ganhou força após a Petrobras ser criticada por supostamente enviar mais de vinte embarcações para desmantelamento em estaleiros como os citados. Como resposta, a companhia adotou, em 2023, uma Política de Destinação Verde de Plataformas, voltada à reciclagem ambientalmente adequada de suas instalações. Como exemplo prático dessa mudança, a Petrobras leiloou a plataforma FPSO P-32 para ser reciclada em uma instalação equipada com piso impermeável localizada no município de Rio Grande/RS (*NGO Shipbreaking Platform*, 2023c).

### 2.2.1 Processo técnico-operacional do descomissionamento *offshore*

O descomissionamento *offshore*, entendido como o encerramento e a remoção definitiva de plataformas marítimas de produção de óleo e gás, tornou-se relevante em escala global devido à grande quantidade de instalações que atingem o fim de sua vida útil. Estima-se que até 2040 cerca de 2.000 estruturas sejam desativadas em um contexto global (Wei; Zhou, 2024). Desde a década de 1990, regulamentos internacionais passaram a exigir que a desativação ocorra com rigor técnico e mínimo impacto ambiental (Chandler *et al.*, 2017; OSPAR, 1998).

Um marco regulatório importante foi a adoção da Decisão OSPAR 98/3, adotada em 1998, que proíbe o descarte ou abandono no mar de instalações *offshore* desativadas, exceto em casos tecnicamente justificados, como estruturas de concreto ou jaquetas de aço de grande porte. Essa medida foi fortemente influenciada pelo debate público e político gerado pelo episódio do Brent Spar<sup>3</sup>, em 1995, que evidenciou os riscos e a falta de consenso sobre o despejo de grandes estruturas oceânicas (Watkins; Passow, 2002). Desde então, a OSPAR 98/3 tem impulsionado a remoção da maior parte das instalações na região, consolidando o princípio de que o descomissionamento deve priorizar a retirada total das estruturas e a destinação ambientalmente adequada dos materiais.

Em paralelo, surgiram programas alternativos como o “*rigs-to-reefs*” nos EUA, que permitiram transformar partes de plataformas em recifes artificiais, desde que comprovadamente benéficos para a vida marinha e seguros para a navegação (Chandler *et al.*, 2017). Apesar dessas alternativas, mantém-se amplamente reconhecido no âmbito internacional o princípio do descomissionamento seguro, fundamentado na remoção ou tratamento de potenciais poluentes e na mitigação de riscos ambientais e à navegação. De acordo com as diretrizes da International Maritime Organization (IMO),

---

<sup>3</sup> O caso Brent Spar (1995), referente à tentativa da Shell de descartar uma unidade de armazenamento de petróleo no Atlântico Norte, provocou ampla mobilização pública liderada pelo Greenpeace e resultou na revisão das políticas regionais de disposição de estruturas *offshore*. O episódio foi determinante para a adoção da Decisão OSPAR 98/3, que estabeleceu critérios mais restritivos para o descomissionamento e o abandono de instalações no mar (Watkins; Passow, 2002).

especialmente a Resolução A.672(16), a retirada total das instalações deve ser priorizada sempre que técnica e ambientalmente viável, admitindo exceções apenas quando a remoção integral representar risco superior ou inviabilidade comprovada (IMO, 1989). Esse entendimento tem orientado marcos regulatórios nacionais e regionais, consolidando o descomissionamento como uma etapa essencial da gestão ambiental de instalações offshore.

Do ponto de vista operacional, o processo de descomissionamento é tecnicamente complexo e envolve etapas bem definidas, que funcionam como uma “reversão” da instalação original (Wei; Zhou, 2024). Inicialmente, ocorre o planejamento detalhado com estudos técnicos e econômicos, seguido pela obtenção das autorizações regulatórias necessárias, que abrangem desde o abandono de poços até a remoção das estruturas e o descarte adequado dos resíduos.

Com as licenças aprovadas, inicia-se o abandono permanente dos poços, por meio do processo de *plug and abandon* (P&A), que consiste na cimentação interna para prevenir vazamentos, conforme diretrizes da *International Association of Oil & Gas Producers* (IOGP, 2023). Na sequência, a plataforma entra em fase de limpeza e descontaminação geral, quando são removidos os resíduos de hidrocarbonetos, produtos químicos, amianto e metais pesados eventualmente presentes na unidade, em linha com as melhores práticas internacionais (Reda *et al.*, 2024).

Em seguida, ocorre o desmantelamento físico da unidade. Em plataformas fixas, os módulos superiores (*topsides*) são seccionados e içados por embarcações de grande capacidade (*heavy-lift vessels*), enquanto o esqueleto da estrutura submersa (jaqueta) é cortado abaixo da linha de lama, utilizando técnicas de corte subaquático ou ferramentas abrasivas, garantindo a segurança e o cumprimento dos protocolos ambientais (BSEE, 2023). Já nas plataformas flutuantes, nem sempre é possível separar o casco e os *topsides*. Nesses casos, a remoção pode envolver o içamento da estrutura inteira sobre barcas por

meio de *flotation*<sup>4</sup> ou levantamento em blocos, seguido do seu transporte até instalações *onshore* especializadas (BSEE, 2023).

Infraestruturas submarinas, como dutos e cabos elétricos, também exigem tratamento específico durante o descomissionamento. No Mar do Norte, a remoção completa tornou-se obrigatória, embora em alguns casos seja permitido o enterramento controlado, desde que se comprove a ausência de contaminação residual (NSTA, 2025). Ao final do processo, é realizada a limpeza detalhada do local (*site clearance*), com uso de sonares, câmeras subaquáticas e redes especializadas para garantir a remoção de resíduos, minimizando riscos ambientais e à navegação (BSEE, 2023).

Os custos envolvidos no descomissionamento offshore são expressivos e influenciados por múltiplos fatores, como porte estrutural, profundidade, distância da costa e disponibilidade de infraestrutura local. No contexto do Reino Unido, estimativas recentes indicam que as operações de descomissionamento deverão demandar cerca de £ 27 bilhões entre 2023 e 2032, com gastos anuais já próximos de £ 2,4 bilhões em 2024 (NSTA, 2025).

No Brasil, embora as condições ambientais sejam favoráveis em alguns aspectos, o descomissionamento de estruturas localizadas em águas profundas e distantes da costa acarreta desafios logísticos e tecnológicos relevantes. Modelos nacionais recentes demonstram que os custos operacionais são fortemente impactados por fatores como a necessidade de embarcações especializadas, condições oceanográficas adversas e gestão de riscos ambientais (ELLWANGER et al., 2022; SOUZA et al., 2024). Essas análises corroboram que, apesar do potencial de reaproveitamento e circularidade, a execução de descomissionamentos em águas ultraprofundas tende a exigir investimentos substanciais.

Adicionalmente, cabe ressaltar que as operações *offshore*, inerentemente, incluem atividades de alto risco, como o içamento de grandes

---

<sup>4</sup> *Flotation*, também referido como *float-on/float-off* ou *float-over* removal, é a técnica em que uma barça semi-submersível é parcialmente submersa por lastreamento controlado, posicionada sob o casco ou *topside* da plataforma, e depois reflutuada para içar a estrutura inteira em um único bloco, possibilitando seu transporte intacto até o estaleiro sem cortes extensivos (Malin Group, 2025).

cargas e cortes estruturais. Por isso, normas como a ISO 45001<sup>5</sup> passaram a ser adotadas, exigindo planos detalhados de segurança, treinamento especializado e monitoramento contínuo das condições ambientais, evitando acidentes e minimizando impactos ao meio ambiente (Capobianco *et al.*, 2022; Climate and Pollution Agency, 2011). Assim, o descomissionamento *offshore*, apesar de complexo e oneroso, é hoje reconhecido globalmente como uma etapa indispensável e planejada do ciclo de vida das instalações marítimas.

### 2.2.2 Gestão de resíduos e materiais no descomissionamento

O descomissionamento de plataformas offshore envolve fluxos massivos de materiais, exigindo gestão rigorosa para assegurar viabilidade econômica, segurança operacional e proteção ambiental. No Reino Unido, projeta-se a retirada de aproximadamente 704 mil toneladas de *topsides* e 382 mil toneladas de jaquetas até o final da década (OGUK, 2021). Considerando o conjunto das estruturas offshore desativadas no Mar do Norte, o relatório estima que cerca de 1,2 milhão de toneladas de materiais deverão ser trazidas em terra para reuso e reciclagem, incluindo *topsides*, jaquetas e outros componentes associados (OGUK, 2021).

Embora o aço estrutural seja o material predominante nessas estruturas e apresente elevada reciclabilidade, existem também quantidades menores de metais como cobre (em cabos elétricos) e alumínio (em componentes específicos). Os volumes expressivos reforçam a necessidade de sistemas robustos de logística reversa, triagem e reciclagem, integrados a planejamento desde as fases iniciais, de modo a maximizar a recuperação de materiais e minimizar desperdícios (OGUK, 2021; NSTA, 2023).

Outro fluxo relevante no descomissionamento é formado pelos materiais compósitos e não metálicos, como polímeros reforçados com fibra de vidro

---

<sup>5</sup> ISO 45001 é uma norma internacional que define um sistema de gestão para saúde e segurança no trabalho (SST), chamado *Occupational Health and Safety Management System* (OHSMS). Publicada em 2018, substituiu as diretrizes anteriores da OHSAS 18001, incorporando visão mais ampla de ambiente de trabalho e bem-estar dos colaboradores (ISO, 2018).

(PRFV), utilizados em grades e tubulações, além de isolantes térmicos com poliuretano, plásticos e concretos. Esses materiais, em comparação ao aço, têm menor valor reciclável e frequentemente constituem desafios significativos, devido à maior complexidade para o seu descarte. Além disso, destaca-se um inventário de resíduos perigosos, incluindo fluidos oleosos remanescentes, lodos contendo hidrocarbonetos, materiais radioativos de ocorrência natural (NORM), resíduos contaminados com mercúrio, bifenilas policloradas (PCBs) presentes em equipamentos antigos e amianto, comumente utilizado como isolante térmico nas instalações mais antigas (Climate and Pollution Agency, 2011).

Nesse cenário complexo, a correta classificação e segregação de materiais tornam-se etapas críticas na gestão do descomissionamento. Ao trazer estruturas desmontadas para instalações em terra (*onshore*), equipes especializadas realizam um inventário técnico detalhado e classificam os materiais em quatro categorias principais: (i) metálicos recicláveis, majoritariamente aço carbono e metais não ferrosos, como cobre e alumínio; (ii) não metálicos reutilizáveis ou recicláveis, incluindo compósitos, plásticos e concretos; (iii) resíduos perigosos que demandam tratamento especial, como fluidos contaminados, lamas tóxicas e asbestos; e (iv) materiais inertes sem valor econômico, destinados à disposição final controlada em aterros industriais<sup>6</sup> (Climate and Pollution Agency, 2011; Capobianco *et al.*, 2022).

Para cada categoria, são definidas rotas tecnológicas específicas, orientadas pela hierarquia de gestão de resíduos e por critérios ambientais, econômicos e técnicos. A reciclagem é amplamente adotada como a estratégia preferencial para materiais metálicos, especialmente o aço, dada sua alta reciclabilidade e valor econômico intrínseco. O aço das plataformas é cortado em seções transportáveis, descontaminado de revestimentos quando

---

<sup>6</sup> Exemplos de materiais inertes frequentemente identificados durante o descomissionamento *offshore* incluem colchões de concreto utilizados para proteção de dutos, blocos e estacas de concreto estruturais, tijolos e entulho cerâmico provenientes de módulos habitacionais, lastros rochosos (*“rock-dump”*) e solos não contaminados, painéis de vidro e fibra de vidro não impregnada, bem como bolsas de *grout* já endurecido empregadas na estabilização de tubulações. Após triagem, essas frações costumam ser britadas e reincorporadas como agregado em obras civis ou, quando não há demanda, encaminhadas a aterros classe II destinados a resíduos inertes (Climate and Pollution Agency, 2011; SEPA, 2018).

necessário, e encaminhado para siderúrgicas, onde é fundido e reinserido na cadeia produtiva, sendo transformado em novos produtos.

Estudos indicam que taxas superiores a 90% de reciclagem em peso já foram alcançadas em projetos de descomissionamentos recentes, devido principalmente à predominância do aço (Nappo, 2023). Além disso, o aço pode ser reciclado repetidamente sem perda significativa de suas propriedades mecânicas, fortalecendo a sua circularidade econômica e ambiental.

Estudos de ACV apontam que a produção de aço novo pelo processo convencional de Forno Básico a Oxigênio (Basic Oxygen Furnace – BOF) emite cerca de 2,32 t CO<sub>2</sub>/t de aço, enquanto a reciclagem da sucata via processo de Forno Elétrico a Arco (Electric Arc Furnace – EAF) gera apenas 0,70 t CO<sub>2</sub>/t de aço (JRC/Comissão Europeia, 2025). Ou seja, o uso de aço reciclado pode evitar até 1,62 t CO<sub>2</sub>/t de aço, o que representa uma redução de ~70 % nas emissões em comparação ao aço virgem (Comissão Europeia, 2025).

Isso corrobora a constatação de que, apesar de a reciclagem ser responsável por uma parcela relevante das emissões totais associadas ao descomissionamento (Nappo, 2023; Capobianco *et al.*, 2022), sua adoção reduz significativamente o impacto climático do ciclo de produção, sobretudo quando comparada com a extração de matérias-primas e com o uso de métodos convencionais de fabricação de aço. Nesse sentido, ampliar as taxas de reciclagem e reaproveitamento mostra-se uma estratégia ambiental e economicamente vantajosa, contribuindo para a mitigação de impactos negativos e a redução de passivos futuros. Ainda assim, é importante frisar que a reciclagem não é isenta de impactos, uma vez que exige um elevado consumo energético e, da mesma forma, gera emissões, especialmente durante as etapas de transporte e processamento dos materiais.

Para os resíduos que não podem ser reciclados diretamente, o coprocessamento em fornos industriais tem se mostrado uma rota interessante. No contexto *offshore*, resíduos perigosos como borras oleosas, lamas contaminadas e certos compósitos poliméricos podem ser aproveitados energeticamente em fornos industriais, particularmente em cimenteiras, substituindo parcialmente os combustíveis fósseis utilizados em seu processo de



produção. O coprocessamento destrói os contaminantes orgânicos e aproveita o valor energético desses resíduos, reduzindo a necessidade de aterros e promovendo a economia circular (Capobianco *et al.*, 2022).

Já para os resíduos que não podem ser tratados por reciclagem ou coprocessamento, como amianto ou materiais contaminados com NORM, a disposição final controlada em aterros industriais licenciados (Classe I) é obrigatória. Esses resíduos requerem acondicionamento e rotulagens específicas, para garantir a segurança durante as etapas de transporte e confinamento definitivo. Embora essa seja uma alternativa ambientalmente menos desejável, uma vez que não recupera o valor econômico do resíduo, a disposição controlada é indispensável nos casos de resíduos que não dispõem de outras alternativas técnicas viáveis (Brasil, 2010; IBP, 2017).

Cabe ressaltar que a disposição final de resíduos contaminados com Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (NORM) não é permitida em aterros industriais convencionais. Esses materiais devem ser destinados a instalações aprovadas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) para o recebimento de resíduos radioativos (repositórios para resíduos de baixa ou média atividade) ou, alternativamente, reinjetados em profundidade (reinjeção geológica) ou depositados em cavernas salinas, entre outras soluções geotécnicas consideradas seguras (Valeur, 2011).

Outras estratégias vêm sendo estudadas para o reaproveitamento de resíduos e materiais no descomissionamento *offshore*, com destaque, por exemplo, para o reaproveitamento *in situ*. Essa estratégia consiste em utilizar as próprias estruturas da plataforma no local original, sem removê-las totalmente. Exemplos conhecidos incluem a criação de recifes artificiais, em que partes da plataforma, especialmente as jaquetas de aço, são propositalmente afundadas ou posicionadas no fundo do mar para formar habitats marinhos e favorecer o desenvolvimento de biodiversidade local (Schroeder; Love, 2004). Além disso, também é possível reutilizar infraestruturas submarinas para novos fins, como por exemplo tubulações originalmente destinadas ao transporte de óleo e gás sendo convertidas em estruturas para armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>, técnica essa que vem sendo testada na região do Mar do Norte.

No Golfo do México, o Programa *Rigs-to-Reefs* já resultou na conversão bem-sucedida de dezenas de plataformas em recifes artificiais, demonstrando benefícios ambientais como o incremento na diversidade de espécies marinhas (Schroeder; Love, 2004). Essa abordagem pode oferecer vantagens significativas quando comparada às estratégias de remoção completa das instalações, uma vez que evita impactos ambientais e custos associados à remoção, podendo também prolongar a vida útil das estruturas originais. Contudo, exige uma análise comparativa detalhada e uma aprovação regulatória específica, devido à complexidade dos riscos envolvidos.

No Brasil, a permanência de estruturas no mar somente é permitida quando os estudos comprovarem que essa alternativa gera menor impacto ambiental do que a remoção completa (IBP, 2017; Oliveira, 2017). As autoridades ambientais, especialmente o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), avaliam criteriosamente aspectos críticos como a estabilidade estrutural em longo prazo, a inexistência de contaminantes (por exemplo, resíduos em dutos submarinos), a segurança à navegação (garantindo uma profundidade mínima de 55 metros sobre recifes artificiais, conforme padrões internacionais de navegação, além de potenciais impactos ecológicos negativos, como a propagação de espécies invasoras (IBP, 2017).

Outro ponto relevante do reaproveitamento *in situ* é o compromisso contínuo e de longo prazo, exigido do operador. A adoção do reaproveitamento *in situ* implica na apresentação de um rigoroso plano de monitoramento pós-descomissionamento, a ser aprovado pelas autoridades ambientais e marítimas, incluindo inspeções periódicas para garantir a integridade e estabilidade das estruturas remanescentes (Chandler *et al.*, 2017). Embora essa opção reduza custos imediatos com transporte e desmonte, pode implicar em responsabilidades financeiras futuras, relacionadas à manutenção ou eventuais intervenções adicionais que se façam necessárias.

Na prática, dificilmente uma única rota de destinação de resíduos atende plenamente as necessidades de um projeto de descomissionamento. Por isso, costuma-se adotar uma combinação de soluções: reúso, reciclagem de metais,

coprocessamento de resíduos, disposição em aterros industriais, armazenamento controlado e reaproveitamento in situ.

A gestão integrada desses fluxos deve ser planejada desde as fases iniciais do projeto, por meio de avaliações comparativas detalhadas (*comparative assessments*), analisando-se diferentes cenários, como por exemplo remoção total ou parcial. Ferramentas analíticas, incluindo análises multicritério, avaliam fatores diversos: emissões atmosféricas, riscos operacionais, custos diretos e indiretos, além de impactos sociais e econômicos (Capobianco *et al.*, 2022; Wei; Zhou, 2024).

Sob a perspectiva da economia circular, observa-se um interesse crescente por soluções de reutilização (reúso) e valorização (*upcycling*), consideradas superiores à simples reciclagem devido à preservação máxima do valor dos materiais (Capobianco *et al.*, 2022). Entretanto, o reúso direto das estruturas e equipamentos ainda é limitado por barreiras técnicas, regulatórias e mercadológicas. Entretanto, o reúso direto de estruturas e equipamentos ainda é limitado por barreiras técnicas, regulatórias e mercadológicas, resultando em predominância das rotas de reciclagem e recuperação de materiais nos atuais projetos de descomissionamento (Capobianco *et al.*, 2022).

No caso específico de equipamentos industriais como turbinas e guindastes, existe a possibilidade de condicionamento e revenda. Porém, elementos estruturais sob medida, projetados especificamente para determinado campo, têm baixa viabilidade de reúso. Por essa razão, a reciclagem do aço e de outros metais permanece como rota predominante, seguida pelo coprocessamento energético de resíduos orgânicos contaminados, enquanto a disposição final em aterros permanece reservada aos rejeitos finais não reaproveitáveis, que não possuem alternativas técnicas viáveis.

Os custos associados à gestão integrada dos resíduos representam uma parcela significativa do custo total do descomissionamento. As operações logísticas de transporte *offshore-onshore*, bem como a desmontagem em terra e os processos industriais subsequentes envolvem despesas consideráveis com logística, mão de obra, energia e taxas ambientais, associadas à destinação adequada dos resíduos, à emissão de licenças e ao cumprimento dos requisitos

legais relacionados à gestão ambiental. Por outro lado, existem oportunidades de geração de receita com a venda dos materiais recicláveis, como o aço e o cobre, reduzindo o custo líquido dos projetos. Além disso, em muitos casos, os operadores celebram contratos antecipados de venda da sucata metálica, aproveitando condições favoráveis do mercado de commodities, mitigando parte de suas despesas.

Finalmente, a gestão sustentável e integrada dos materiais oriundos do descomissionamento é estratégica para as empresas do setor de óleo e gás. De acordo com a ANP (2021), essa abordagem, além de garantir a conformidade com regulamentações ambientais cada vez mais rígidas e diretrizes internacionais – recomendadas por organizações como *Energy Institute* e IPIECA (2024) – contribui para melhorar o desempenho dos indicadores ambientais, sociais e de governança (ESG), fortalecendo a reputação corporativa e a conformidade regulatória das empresas do setor de óleo e gás.

### **2.2.3 Contexto regulatório e econômico brasileiro**

No contexto regulatório brasileiro, o marco inicial para o descomissionamento *offshore* foi a Resolução ANP nº 27/2006, que estabeleceu os procedimentos básicos para a desativação de instalações de produção. Essa norma exigia que os operadores submetessem previamente à ANP um Programa de Descomissionamento de Instalações (PDI), que em síntese é um documento que detalha as etapas do descomissionamento, como o abandono seguro dos poços, a remoção de equipamentos e a recuperação ambiental da área (IBP, 2017).

A Resolução estabelecia ainda, como regra geral, a remoção integral das instalações ao final da vida produtiva, admitindo exceções apenas em situações técnica e ambientalmente justificadas, mediante a aprovação da autoridade marítima competente (IBP, 2017). Em suma, a política brasileira alinhava-se ao princípio internacional de "remover o que foi levado ao mar".

No âmbito ambiental, o descomissionamento segue as diretrizes da Resolução CONAMA nº 01/1986, que estabelece os procedimentos de

licenciamento ambiental e a obrigatoriedade do EIA/RIMA, complementados por Termos de Referência específicos do IBAMA, que podem demandar a avaliação comparativa de alternativas (remoção total, parcial ou permanência in situ) conforme a sensibilidade ambiental local.

Apesar dessas diretrizes, até meados da década de 2010, persistiam lacunas importantes na regulamentação brasileira. Havia poucos regulamentos abordando detalhadamente os aspectos técnicos do descomissionamento, e não existia uma articulação formal entre os diversos órgãos envolvidos. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010) estabelece a hierarquia de gestão de resíduos (não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final), aplicável aos materiais após chegada em terra. Esta hierarquia se alinha aos princípios da economia circular, criando uma ponte conceitual entre a regulação nacional e as melhores práticas internacionais de circularidade.

O arcabouço regulatório brasileiro aplicável ao descomissionamento de instalações *offshore* desenvolveu-se de forma gradual e com lacunas normativas. Até 2017, observava-se um quadro de insegurança regulatória, decorrente da ausência de instrumentos específicos e da existência de competências parcialmente sobrepostas entre os órgãos responsáveis (ANP, IBAMA e Marinha do Brasil), o que gerava interpretações não uniformes e impactava prazos e custos dos projetos (IBP, 2017).

Em 2020, a publicação da Resolução ANP nº 817/2020 representou um avanço técnico e institucional ao consolidar o Regulamento Técnico de Descomissionamento, tornando obrigatória a análise comparativa entre alternativas de desativação e definindo requisitos detalhados para os Programas de Descomissionamento de Instalações (PDI). A partir desse marco, buscou-se superar a fragmentação normativa e alinhar a atuação entre os diferentes órgãos competentes, preparando o terreno para uma abordagem integrada.

Essa norma representou um avanço regulatório substancial, harmonizando os procedimentos entre os três principais órgãos reguladores envolvidos: A ANP, o IBAMA e a Marinha do Brasil. Cada órgão manteve suas atribuições legais específicas, porém a nova regulamentação criou um fluxo

integrado de aprovações, trazendo maior clareza procedimental e segurança jurídica para os operadores (ANP, 2020b; ANP, 2021a).

Nesse novo arranjo institucional, compete à ANP avaliar a conveniência do descomissionamento sob a perspectiva técnica e econômica; ao IBAMA assegurar que as alternativas propostas sejam ambientalmente adequadas, exigindo a realização de Estudo de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) com análise comparativa dos possíveis cenários, tendo como referência preferencial a remoção completa das estruturas (Oliveira, 2017; IBP, 2017); e à Marinha, cabe zelar pela segurança da navegação e pela proteção da vida humana no mar, monitorando a retirada das unidades flutuantes e certificando eventuais estruturas remanescentes estejam devidamente sinalizadas em cartas náuticas (ANP, 2021a).

Outro avanço regulatório importante é a exigência de planejamento de longo prazo. A partir da publicação da Resolução ANP nº 817/2020, os operadores devem apresentar os Programas de Descomissionamento de Instalações (PDIs) com pelo menos cinco anos de antecedência ao encerramento das operações. Essa antecipação tem o intuito de permitir que sejam realizadas avaliações técnicas mais robustas, contribuindo para o desenvolvimento da cadeia produtiva local e garantindo o provisionamento financeiro para assegurar os recursos necessários à execução das etapas de descomissionamento conforme o planejado (ANP, 2021a; Tan *et al.*, 2021). Tais avanços regulatórios refletem o reconhecimento de que o descomissionamento *offshore* deve ser planejado desde o início do ciclo de vida das instalações, evitando que se torne um passivo ambiental ou financeiro para o país.

No contexto do descomissionamento *offshore*, também é relevante considerar o Decreto nº 12.082/2024 que institui a Estratégia Nacional de Economia Circular (ENEC), que visa promover a transição do modelo linear para circular (BRASIL, 2024). Complementarmente, o Plano Nacional de Economia Circular (PNEC), aprovado em 2025 por meio da Resolução nº 1/2025 da Comissão Interministerial de Desenvolvimento Sustentável (CIDS), estabelece um conjunto de 18 macro-objetivos e 71 ações estratégicas para implementar a circularidade na economia brasileira (BRASIL, 2025). Embora não trate especificamente do setor de óleo e gás, o plano adota uma abordagem

transversal, definindo diretrizes voltadas ao reaproveitamento de materiais, à redução da geração de resíduos e à extensão do ciclo de vida de produtos e equipamentos. Esse caráter intersetorial oferece um referencial normativo para que projetos de descomissionamento incorporem práticas como a reutilização de componentes, a reciclagem de estruturas metálicas e a destinação sustentável de resíduos, em consonância com as agendas nacionais de sustentabilidade, inovação e transição energética (BRASIL, 2025). As principais diretrizes desses dois instrumentos normativos e suas possíveis aplicações ao descomissionamento *offshore* estão sintetizadas no Quadro 1. Adicionalmente, o quadro inclui a associação de cada eixo temático aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, com destaque para as metas e indicadores mais diretamente relacionados, de modo a evidenciar a aderência da pesquisa às agendas globais de sustentabilidade (ONU, 2015).

Quadro 1 – Diretrizes da ENEC 2024 e do PNEC 2025 aplicadas ao descomissionamento offshore e sua vinculação às metas e indicadores dos ODS

Eixo temático	Principais diretrizes (ENEC 2024 + PNEC 2025)	Aplicação ao descomissionamento offshore	Principais ODS relacionados (metas e indicadores) <sup>7</sup>
<b>Reaproveitamento de materiais</b>	Incentivo ao reaproveitamento e reuso de produtos e materiais, priorizando o prolongamento da vida útil; redesenho de equipamentos para facilitar reutilização.	Seleção e reaproveitamento de módulos, bombas, válvulas e sistemas antes do descarte.	ODS 12.2: uso eficiente de recursos (indicadores 12.2.1 e 12.2.2); ODS 12.5: reduzir a geração de resíduos (indicador 12.5.1); ODS 9.4: modernização sustentável da indústria (indicador 9.4.1).
<b>Reciclagem</b>	Valorização da reciclagem de materiais de alto valor agregado, como metais e ligas especiais; integração com cadeias produtivas para reaproveitamento de materiais.	Reciclagem de estruturas metálicas (aço e ligas especiais) provenientes do casco e módulos.	ODS 12.5: reciclagem e redução de resíduos (indicador 12.5.1). ODS 9.4: modernização sustentável da indústria (indicador 9.4.1)
<b>Redução de resíduos</b>	Estabelecimento de metas para minimizar resíduos; incentivo à remanufatura e recondicionamento como alternativas ao descarte.	Minimização de resíduos perigosos por meio de desmontagem e descontaminação planejadas.	ODS 12.4: gestão ambientalmente adequada de químicos e resíduos (indicadores 12.4.1 e 12.4.2); ODS 6.3: melhorar a qualidade da água, reduzir poluição (indicadores 6.3.1 e 6.3.2).
<b>Integração setorial</b>	Fomento à articulação entre cadeias produtivas e setores para aproveitamento de subprodutos.	Conexão com indústrias siderúrgicas, cimenteiras e fornecedores de peças recondicionadas.	ODS 17.16: parcerias multissetoriais — indicador 17.16.1; ODS 9.4: modernização sustentável da indústria (indicador 9.4.1).
<b>Inovação e P&amp;D</b>	Apoio ao desenvolvimento de tecnologias e inovação em design e processos para ampliar circularidade.	Projetos de P&D para inventário, corte, separação e descontaminação com menor impacto ambiental.	ODS 9.5: pesquisa e capacidade tecnológica (Indicadores 9.5.1 e 9.5.2).

Elaborado pelo autor, com base em BRASIL (2024), BRASIL (2025a) e ONU (2015).

<sup>7</sup> A associação entre os eixos temáticos da ENEC 2024 e do PNEC 2025 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) foi realizada a partir de uma análise de convergência temática. Para cada eixo, identificaram-se os pontos de contato com as metas e indicadores oficiais da Agenda 2030 das Nações Unidas (ONU, 2015), considerando os impactos ambientais, sociais e econômicos mais relevantes no contexto do descomissionamento offshore.



Esses avanços normativos são acompanhados por uma estimativa crescente de investimentos no setor. Dados do Painel Dinâmico de Descomissionamento da ANP apontam que o Brasil deverá alocar cerca de R\$ 70,2 bilhões até 2029 em atividades de abandono permanente de poços, desmobilização de plataformas, recuperação ambiental, remoção de linhas e equipamentos submarinos e gestão de resíduos. Essas ações envolvem pelo menos cinquenta e seis plataformas nas bacias de Campos, Sergipe-Potiguar, Santos e Espírito Santo (ANP, 2025). Esse montante já supera os gastos históricos do Mar do Norte para o período equivalente, posicionando o Brasil entre os três maiores mercados mundiais de desmantelamento. Tal cenário impõe desafios e exige soluções como o corte submarino em lâminas d'água superiores a 1.500 m, logística de longas distâncias até a costa e infraestrutura adequada para o processamento *onshore* de grandes volumes de sucata (Santos *et al.*, 2024).

Nesse sentido, o Plano Estratégico 2024-2028 da Petrobras prevê US\$ 11,4 bilhões (aproximadamente R\$ 57 bilhões, considerando câmbio de R\$ 5,00/US\$) para desativar vinte e três plataformas e abandonar aproximadamente 550 poços, com meta de reciclar 80% do peso total das estruturas. Essa carteira já mobiliza contratos de transporte *heavy-lift*, serviços de *plug and abandon* e unidades especializadas em reciclagem metálica (Petrobras, 2023a).

Esses investimentos configuram, simultaneamente, desafios operacionais e oportunidades de desenvolvimento. De um lado, pressionam o fluxo de caixa das operadoras, sobretudo as independentes, que precisam constituir garantias financeiras antecipadas, conforme estabelecido na Resolução ANP 854/2021<sup>8</sup>. Por outro lado, fomentam a cadeia de suprimentos nacional, criando demanda por serviços especializados em engenharia submarina, corte a frio, logística portuária, reciclagem metálica e pesquisa em rotas de reaproveitamento de

---

<sup>8</sup> Resolução ANP nº 854 2021 exige que a operadora apresente garantia financeira específica para custear o descomissionamento de instalações de exploração e produção de petróleo e gás, devendo o instrumento inicial ser constituído até cento e oitenta dias após o primeiro volume comercial produzido. O dispositivo criou o Modelo de Aporte Progressivo, pelo qual o valor a garantir é recalculado anualmente e deve alcançar cem por cento dois anos antes do término da produção ou do contrato. São admitidas, todas com cláusulas mínimas previstas em anexos da norma, seis modalidades principais de garantia: carta de crédito, seguro garantia, penhor de petróleo e gás natural, garantia corporativa, fundo de provisionamento e termo executivo extrajudicial (ANP, 2021b).

estruturas. Estudos recentes apontam o potencial de geração de milhares de empregos diretos e indiretos na próxima década, com impactos positivos sobre o desenvolvimento regional e tecnológico do setor (Santos *et al.*, 2024).

Desse modo, o descomissionamento *offshore* deixa de ser visto apenas como passivo a ser gerido e passa a ocupar um lugar estratégico na agenda de transição energética e de desenvolvimento industrial. Isso reforça a necessidade de políticas públicas integradas, que incentivem a inovação tecnológica e a capacitação de fornecedores locais, ao mesmo tempo em que garantam o rigor ambiental e a segurança operacional ao longo de todo o processo.

## 2.3 INDICADORES DE CIRCULARIDADE APLICÁVEIS AO SETOR DE ÓLEO E GÁS

O setor de óleo e gás enfrenta o desafio de transicionar para uma economia mais circular, o que requer métricas adequadas para avaliar o desempenho circular de suas operações. A seleção de indicadores de circularidade relevantes é fundamental para monitorar o progresso, identificar oportunidades de melhoria e alinhar as ações às metas de sustentabilidade do setor (ISO, 2024a). A seguir, definem-se os critérios utilizados para selecionar indicadores de circularidade voltados ao setor de óleo e gás e classificam-se os indicadores selecionados em blocos temáticos (materiais, energia, emissões e valor socioeconômico).

### 2.3.1 Critérios de seleção de indicadores

Os indicadores escolhidos devem ser relevantes para os objetivos da transição circular no contexto do óleo e gás, ou seja, precisam refletir aspectos cruciais das operações do setor que possam ser aprimorados sob a ótica da economia circular. Indicadores relevantes são aqueles estreitamente ligados à tomada de decisão e às áreas de maior impacto ou oportunidade de circularidade (Energy Institute; IPIECA, 2024).

Em outras palavras, a seleção prioriza métricas alinhadas às matérias-primas, processos e resíduos significativos do negócio, de forma que os resultados auxiliem efetivamente na gestão. Por exemplo, um indicador como o

percentual de conteúdo reciclado em materiais de entrada é altamente relevante, pois endereça a fração de matéria-prima não virgem utilizada na cadeia produtiva, um aspecto central para “fechar o ciclo” de materiais no setor.

Esse indicador teria maior relevância do que métricas genéricas desconectadas das atividades-fim da indústria. A aplicação do critério de relevância garante que a triagem bibliográfica foque em indicadores com utilidade prática para avaliar a circularidade nas operações de óleo e gás, evitando distrações com métricas de importância marginal. Essa abordagem é consistente com estudos que recomendam avaliar a relevância setorial e estratégica de cada indicador antes de incorporá-lo em avaliações de sustentabilidade (Bueno *et al.*, 2011).

O critério da mensurabilidade assegura que os indicadores selecionados sejam quantificáveis de forma objetiva e baseada em metodologia consistente. Indicadores mensuráveis possuem definições claras e fórmulas de cálculo bem estabelecidas, permitindo a coleta de dados confiáveis e a comparação ao longo do tempo ou entre unidades de negócio (Moraga *et al.*, 2019; ISO, 2024b).

Conforme as diretrizes da ISO 59020:2024, é importante definir indicadores mensuráveis que permitam rastrear o uso de recursos e perdas de maneira padronizada. Assim, privilegiam-se indicadores com fundamento técnico sólido (por exemplo, com referência em normas ou *frameworks* reconhecidos) e que produzam resultados numéricos (tipicamente em forma de porcentagem, índice ou valor absoluto).

Um exemplo de indicador mensurável é a taxa de reciclagem de resíduos sólidos (%), cuja fórmula pode ser claramente definida como a razão entre a massa de resíduos encaminhados para reciclagem e a massa total de resíduos gerados, multiplicada por 100. Essa métrica é de fácil mensuração, pois baseia-se em dados de peso de resíduos, geralmente registrados nas operações industriais. Por outro lado, indicadores vagos ou estritamente qualitativos (como, hipoteticamente, um “índice de cultura circular”) seriam descartados por carecerem de métricas objetivas de avaliação. Em suma, a mensurabilidade garante rigor na quantificação do desempenho circular, aumentando a confiabilidade dos resultados obtidos (ISO, 2024b).

Além de ser relevante e mensurável, um indicador só é viável se houver dados acessíveis e confiáveis para calculá-lo. A literatura sobre descomissionamento e avaliação multicritério de infraestruturas de óleo e gás evidencia que lacunas de dados operacionais, de inventário de materiais e de destinação de resíduos são frequentes e podem comprometer a robustez analítica de estudos de circularidade (Wei; Zhou, 2024; Terpou, 2017). Desse modo, foram priorizados indicadores cujos insumos de dados fossem disponíveis ou facilmente obtidos nos sistemas corporativos existentes, evitando métricas que dependam de informações inexistentes ou de difícil acesso.

Por exemplo, para calcular o percentual de material não virgem utilizado, é necessário dispor de dados de compra de materiais discriminando origem virgem *versus* reciclada; caso a empresa não rastreie essa informação, o indicador torna-se inviável na prática. A disponibilidade foi considerada tanto em termos de existência quanto de qualidade dos dados. Estudos ressaltam que limitações de dados podem prejudicar a avaliação acurada da circularidade, especialmente em atividades complexas ou legadas do setor (Energy Institute; IPIECA, 2024).

Em trabalhos de avaliação de desempenho, critérios como simplicidade e disponibilidade dos dados são comumente adotados justamente para garantir a implementação prática das métricas selecionadas (Bueno *et al.*, 2011). Assim, assegura-se que os indicadores escolhidos poderão de fato ser calculados com os recursos informacionais disponíveis, aumentando a efetividade do monitoramento de circularidade.

O panorama regulatório, sobretudo em jurisdições como a União Europeia, vem evoluindo rapidamente para incluir requisitos de reporte de circularidade (por exemplo, a diretiva europeia *Corporate Sustainability Reporting Directive* (CSRD) e os padrões ESRS, em especial o ESRS E5 focado em economia circular) (Falkenberg *et al.*, 2023).

Indicadores compatíveis com a regulação são aqueles que seguem definições oficiais, facilitando o atendimento a obrigações legais e a comparação setorial. O *Global Reporting Initiative* (GRI) é um padrão global amplamente utilizado para relatórios de sustentabilidade, abordando impactos ambientais,

sociais e econômicos de forma abrangente e voltado a múltiplas partes interessadas (GRI, 2023).

Já o *Sustainability Accounting Standards Board* (SASB) estabelece métricas específicas por indústria, focadas em aspectos de sustentabilidade considerados financeiramente relevantes aos investidores (SASB, 2022). Portanto, selecionar um indicador de circularidade (por exemplo, taxa de reutilização de materiais) que esteja alinhado às métricas exigidas por GRI ou SASB, ou por padrões internacionais como ISO 59020:2024, assegura convergência entre relatórios de sustentabilidade voluntários e obrigações regulatórias, otimizando a consistência e a comparabilidade das informações divulgadas.

Além disso, a compatibilidade regulatória evita conflitos entre o sistema de medição interno da empresa e as referências externas de sustentabilidade. Como destacado em relatório setorial, o surgimento de novas normas pode obrigar o acompanhamento de certos indicadores, de modo que é prudente já incorporar métricas aderentes a esses padrões e manter o monitoramento de mudanças regulatórias relevantes (Energy Institute; IPIECA, 2024). Um caso prático é a exigência de reporte de porcentagem de resíduos enviados a destinos de recuperação (reciclagem, coprocessamento etc.) presente em regulações europeias, empresas que adotam indicador semelhante internamente estarão em vantagem para atender a tais requerimentos (OECD, 2019).

### **2.3.2 Classificação dos indicadores selecionados**

Os indicadores propostos foram organizados em quatro blocos temáticos principais: materiais, energia, emissões e valor socioeconômico, com o objetivo de cobrir as dimensões essenciais da economia circular aplicadas ao setor de óleo e gás. Essa divisão estratégica facilita tanto uma análise específica quanto integrada do desempenho circular das empresas. Tal organização está alinhada com recomendações internacionais, as quais enfatizam a importância de categorizar indicadores segundo fluxos materiais, energia consumida, impactos

ambientais e valor socioeconômico gerado, proporcionando assim uma avaliação completa e coerente da circularidade (ISO, 2024a).

No bloco dos indicadores de materiais, o foco principal está em métricas relacionadas à gestão dos fluxos físicos de materiais. Esses indicadores refletem a capacidade da empresa em manter materiais em uso contínuo, reduzir descartes e fechar ciclos produtivos. Em óleo e gás, isso inclui insumos como aço, água, reagentes químicos utilizados em processos diversos e resíduos sólidos e efluentes gerados em atividades como perfuração, refino e descomissionamento (Terpou, 2017; Wei; Zhou, 2024).

Um dos principais indicadores nessa categoria é a taxa de recuperação de materiais, que quantifica a fração de resíduos ou materiais pós-uso reinseridos nos ciclos produtivos através de reciclagem, remanufatura ou reúso, em comparação aos destinados à disposição final. Esse cálculo pode abranger materiais agregados ou específicos e é representado por: % recuperação de materiais =  $(\text{massa resíduos recuperados} \div \text{massa total de resíduos gerados}) \times 100$ .

Além da taxa global de recuperação, a literatura destaca indicadores específicos para monitorar estratégias distintas de circularidade, como a taxa de reúso e a taxa de reciclabilidade. A taxa de reúso corresponde à proporção de materiais ou componentes que são diretamente reutilizados em sua função original ou em aplicações similares, prolongando sua vida útil sem necessidade de reprocessamento industrial (Ghisellini *et al.*, 2016).

Uma alta taxa de reúso indica que a empresa consegue reinserir uma parcela relevante de recursos nos processos produtivos, reduzindo a extração de matérias-primas virgens e minimizando resíduos. Estudos recentes destacam oportunidades de reúso no setor: componentes metálicos e equipamentos recuperados de poços e plataformas são reempregados após manutenção, evitando sucata prematura (Adebayo *et al.*, 2024). Essa prática de reúso contribui diretamente para fechar ciclos materiais, alinhando-se aos princípios da economia circular e às metas de sustentabilidade corporativa (Adebayo *et al.*, 2024; Lau *et al.*, 2022). Essa taxa é representada pelo cálculo  $TR = (\text{massa destinada a reúso} \div \text{massa total de resíduos gerados}) \times 100\%$ .

Já a taxa de reciclabilidade indica o percentual de resíduos que é de fato submetido a processos de reciclagem e reinserido como matéria-prima secundária nos ciclos produtivos (Moraga *et al.*, 2019). Conforme definido na EN 13440:2003, a taxa deve ser calculada pela equação  $TRec = (\text{massa de resíduos reciclados} \div \text{massa total de resíduos gerados}) \times 100 \%$  (European Committee for Standardization, 2003), considerando apenas os fluxos efetivamente encaminhados à reciclagem e excluindo rejeitos de produção primária.

Em um modelo circular simulado para refino de óleo usado, chegou-se a recuperar cerca de 80% do óleo lubrificante residual como matéria-prima novamente utilizável, um exemplo concreto do potencial de reúso de resíduos dentro da cadeia de valor (Lau *et al.*, 2022). No setor de óleo e gás, uma alta taxa de reciclabilidade reflete eficiência na gestão de resíduos, permitindo que materiais como a sucata metálica, polímeros de instalações e borras oleosas sejam convertidos em insumos novamente aproveitáveis. Por exemplo, projetos de reciclagem de óleo lubrificante usado e recuperação de frações de hidrocarbonetos em borras resultaram em menor necessidade de matéria-prima nova e em redução do passivo ambiental dessas correntes residuais (Lau *et al.*, 2022; Adebayo *et al.*, 2024).

Além disso, a avaliação da “reciclabilidade” de equipamentos ao fim da vida útil, quanto de seus materiais podem ser reciclados, passou a integrar métricas de desempenho ambiental nas empresas do setor (Sharma *et al.*, 2023), orientando melhorias de design e logística reversa para maximizar a recuperação material. Esses indicadores complementares permitem avaliar quão bem a empresa implementa as duas principais estratégias da economia circular (reutilização e reciclagem) para fechamento de ciclos, fornecendo uma visão mais granular do destino dos materiais pós-uso (Ghisellini *et al.*, 2016; Moraga *et al.*, 2019).

Os dados geralmente são extraídos do inventário de resíduos mantido pela gestão ambiental da empresa. Normalmente, essa taxa é detalhada em categorias específicas, como porcentagem reciclada ou reutilizada, conforme preconizado pelo padrão europeu ESRS E5 sobre economia circular (Wei; Zhou, 2024). Uma alta taxa de recuperação indica eficiência no aproveitamento de materiais, contribuindo diretamente para reduzir impactos ambientais.

Por outro lado, é fundamental acompanhar a taxa de perda ou disposição final, que representa a fração de materiais descartados de forma permanente (por exemplo, enviados a aterros ou incinerados sem recuperação de energia) em relação ao total de resíduos gerados. A taxa é medida em:  $TP = (Massa \text{ em disposição final} \div Massa \text{ total}) \times 100\%$ .

Esse indicador evidencia a parcela de recursos que escapa aos ciclos produtivos circulares, ou seja, o quanto de material acaba não sendo reaproveitado na economia (Moraga *et al.*, 2019; EASAC, 2016).

Uma elevada taxa de disposição final evidencia falhas na retenção de valor dos materiais, isto é, uma parcela grande de insumos termina como rejeito não reaproveitado, contrariando os princípios da circularidade (Sharma *et al.*, 2023). Por outro lado, quanto menor for a taxa de disposição final, maior a eficiência circular, pois valores baixos indicam que a empresa consegue minimizar rejeitos e manter a maior parte dos materiais em uso produtivo contínuo, alinhando-se aos princípios da hierarquia de resíduos que privilegia reuso e reciclagem sobre descarte (EASAC, 2016).

No segmento de petróleo e gás, esforços para reduzir a disposição final incluem desde programas de *zero landfill* (aterro zero) para resíduos perigosos e não perigosos até reinjeção segura de certos resíduos em poços esgotados, tudo visando diminuir o volume enviado a aterros (Adebayo *et al.*, 2024). Além do benefício ambiental direto, a redução da taxa de disposição final é vista como métrica-chave de eficiência circular e de desempenho em sustentabilidade no setor. Cálculo:  $TP = (Massa \text{ em disposição final} \div Massa \text{ total}) \times 100\%$ .

No bloco de energia, os indicadores são voltados à redução da dependência energética fóssil e à ampliação do uso de energias renováveis e recuperação energética. Para empresas de óleo e gás, grandes consumidoras de energia, esses indicadores são fundamentais para relacionar economia circular a objetivos de descarbonização e eficiência energética (EASAC, 2016).

A economia circular no âmbito energético também incentiva o aproveitamento de fluxos residuais de energia, expresso pela chamada taxa de valorização energética (TVE). Esse indicador corresponde à parcela da demanda energética suprida por energia recuperada de resíduos ou subprodutos



(como calor residual de processos industriais ou utilização de gases combustíveis que seriam descartados), reduzindo a necessidade de insumos energéticos primários (ISO, 2024a).

Conforme definido na EN 13439:2004,  $TVE = (\text{massa de resíduos encaminhada a recuperação energética} \div \text{massa total de material gerado}) \times 100\%$ , devendo o numerador registrar apenas fluxos efetivamente introduzidos em unidades com recuperação de calor (European Committee for Standardization, 2004). Valores elevados sinalizam que a empresa converte desperdícios em uso útil de energia, melhorando a eficiência operacional e mitigando emissões (ISO, 2024a).

Organizações internacionais já incorporam essa métrica: a ISO 59020:2024 recomenda monitorar a fração de energia recuperada no consumo total como parte da avaliação de circularidade (ISO, 2024c). Em suma, quanto maior a porcentagem de energia oriunda de fontes reaproveitadas, mais próximo o sistema produtivo estará de um modelo circular auto-sustentado.

Outro indicador, o percentual de energia recuperada ou reutilizada internamente, é o percentual de energia renovável consumida, calculado da seguinte forma:  $\% \text{ energia renovável} = (\text{energia renovável consumida} \div \text{energia total consumida}) \times 100$ .

Essa métrica considera energia elétrica e térmica, abrangendo fontes como solar, eólica, biomassa e hidráulica. Os dados geralmente vêm do balanço energético empresarial, incluindo aquisição de energia certificada como renovável ou produção própria. Por exemplo, uma refinaria que utilize 50% de energia elétrica proveniente de fontes renováveis e 10% do calor obtido por biomassa alcança aproximadamente 60% de energia renovável, demonstrando forte avanço rumo à circularidade energética (Energy Institute; IPIECA, 2024; EASAC, 2016).

Embora esse indicador seja amplamente utilizado na fase operacional para acompanhar a descarbonização da matriz energética de instalações industriais (EASAC, 2016; Energy Institute; IPIECA, 2024), não é comum seu uso específico no descomissionamento, pois dificilmente se empregam fontes renováveis significativas durante as atividades de descomissionamento

(Velenturf, 2020). Em teoria, seria possível adotar energia elétrica de origem limpa ou biocombustíveis para abastecer os processos de desmontagem, reduzindo as emissões de GEE associadas. O percentual de energia recuperada ou reutilizada internamente, que é um indicador que avalia quanto da energia antes desperdiçada é aproveitada internamente, seguindo a fórmula: % energia recuperada = (energia residual reaproveitada ÷ energia total consumida) × 100

O bloco "Indicadores de Emissões" inclui métricas associadas às emissões ambientais, especialmente de gases de efeito estufa (GEE) e poluentes diversos, em conexão direta com práticas de economia circular. Embora a redução de emissões represente um objetivo ambiental amplo, está intimamente ligada às ações circulares, já que estas tendem a diminuir emissões comparativamente ao modelo linear tradicional, por meio do reaproveitamento de materiais e uso de energia renovável (Terpou, 2017; Wei; Zhou, 2024).

Um indicador-chave desse bloco é a intensidade de emissões de GEE, expresso como quilogramas de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e) por unidade de produto ou serviço. Exemplos são tCO<sub>2</sub>e por barril equivalente de petróleo produzido (boe) ou por tonelada de produto refinado (Terpou, 2017). A fórmula utilizada é: Intensidade de GEE = Emissões totais (tCO<sub>2</sub>e) ÷ Produção total (unidades).

Essa métrica, comum em relatórios de sustentabilidade, permite avaliar indiretamente ganhos de circularidade. Espera-se que a implementação de práticas circulares reduza a intensidade de emissões, seja por menor consumo de recursos virgens (menos emissões associadas à extração e processamento), maior utilização de energia renovável, ou pela diminuição na geração de resíduos (redução de emissões por decomposição ou incineração). Dados necessários para esse indicador provêm dos inventários corporativos de carbono (escopos 1, 2 e eventualmente 3) e relatórios operacionais, com unidades tipicamente expressas em kg ou tCO<sub>2</sub>e por unidade produzida (Energy Institute; IPIECA, 2024). Por exemplo, uma redução da intensidade de emissões de uma refinaria após adoção de práticas circulares indica eficácia na mitigação de emissões.

No descomissionamento, não há um “produto” sendo gerado, o que dificulta a aplicação direta dessa métrica de intensidade (Velenturf, 2020). A

literatura sobre descomissionamento de instalações petrolíferas tende a avaliar as emissões totais de GEE do processo ou as emissões evitadas por práticas circulares (como reutilização de equipamentos ou reciclagem de materiais), comparando cenários de destinação dos resíduos e estruturas desmontadas (Partridge *et al.*, 2023).

A quantidade de emissões evitadas por práticas circulares, é uma métrica que expressa diretamente em toneladas de CO<sub>2</sub>e ou percentagem relativa a um cenário-base linear. Sua fórmula é: Emissões evitadas = Emissões cenário-base – Emissões após circularidade. Embora não seja um indicador exclusivamente de circularidade, permite mensurar explicitamente os benefícios para mudança climática obtidos com iniciativas circulares. Além disso, recomenda-se o monitoramento de emissões de poluentes locais associados à circularidade, como a redução do gás queimado em *flare* (%), prática especialmente importante na indústria de óleo e gás (Ige *et al.*, 2022). Reduções na queima ou fugas de metano, obtidas por tecnologias de vedação e reutilização de gases, complementam a avaliação ambiental das práticas circulares.

O último bloco inclui indicadores de valor socioeconômico, que avaliam impactos financeiros e sociais das estratégias circulares, indo além dos benefícios ambientais diretos. Demonstrar que iniciativas circulares são financeiramente viáveis e proporcionam ganhos sociais é crucial para empresas. Indicadores como valor monetário economizado ou gerado (em R\$ ou US\$) avaliam a economia obtida com substituição de matérias-primas por reciclados, redução de custos com destinação de resíduos ou receitas advindas da venda de materiais recuperados. Tais métricas traduzem benefícios ambientais em termos financeiros, facilitando a comunicação com gestores e investidores sobre o valor econômico agregado pela circularidade (ISO, 2024).

Outros indicadores importantes são investimento e retorno associado em iniciativas circulares, monitorando-se recursos aplicados e retorno obtido, e geração de empregos e capacitação em circularidade. Esses últimos expressam benefícios sociais, como número de empregos verdes gerados ou percentual de colaboradores treinados em economia circular, reforçando o compromisso social da empresa na transição circular (Energy Institute; IPIECA, 2024).

Por fim, o Quadro 2 sistematiza os indicadores de circularidade – taxa de reúso, taxa de reciclabilidade, taxa de valorização energética e taxa de perda ou disposição final – selecionados a partir da revisão bibliográfica e pela convergência com os propósitos centrais da dissertação, que buscam mensurar a eficiência da economia circular no descomissionamento de plataformas *offshore* (ISO, 2024c). Esses indicadores oferecem métricas quantitativas capazes de captar, simultaneamente, a maximização da recuperação de valor e a minimização de perdas de materiais, aspectos intrínsecos ao problema de pesquisa.

Quadro 2 – Indicadores de reúso, reciclabilidade, valorização energética e disposição final no setor de O&amp;G

Indicador	Fonte/framework	Tipo de indicador	Exemplos de indicadores	Aplicabilidade no Setor de O&G
<b>Taxa de Reúso</b> (Reutilização)	ISO 59020 (2024); CTI (2020); ESRS E5	Quantitativo (percentual de recurso reutilizado sobre o total)	Ex.: Reúso de água – A Petrobras atingiu 29,3% de reúso de água doce em 2022 (50,7 bilhões de litros reutilizados) (Petrobras, 2023d), reduzindo a captação de novas fontes. Também se aplica a materiais, p. ex. proporção de equipamentos ou peças reaproveitadas em projetos.	Alta – Amplamente monitorado para melhorar eficiência no uso de recursos hídricos e materiais. Empresas acompanham essa taxa para diminuir consumo de insumos naturais e custos operacionais (Petrobras, 2023d), sendo particularmente relevante em operações com elevado uso de água (refinarias, termelétricas etc.) e na reutilização de componentes.
<b>Taxa de reciclabilidade</b> (Reciclagem)	EN 13440 (2003); ISO 59020 (2024); CTI (2020); ESRS E5	Quantitativo (fração em massa passível de reciclagem ou efetivamente reciclada).	Ex.: Reciclagem de estruturas metálicas – No descomissionamento <i>offshore</i> , a maior parte de uma plataforma pode ser reutilizado ou reciclada (Masterson, 2024), dada a alta reciclabilidade do aço e outros metais. Outros exemplos incluem reciclagem de catalisadores gastos e sucata de equipamentos, reinserindo esses materiais na cadeia produtiva.	Alta – Especialmente relevante na gestão de resíduos sólidos e fim de vida de ativos no setor. A elevada reciclabilidade de materiais como aço, alumínio e ligas metálicas em instalações de O&G permite taxas de reciclagem muito altas (Masterson, 2024). Indicadores de reciclagem são usados para avaliar programas de logística reversa e recuperação de valor, alinhando-se a metas corporativas e exigências legais.

Indicador	Fonte/framework	Tipo de indicador	Exemplos de indicadores	Aplicabilidade no Setor de O&G
<b>Taxa de Valorização Energética</b> (Recuperação de Energia)	EN 13439 (2004); ESRS E5; CTI (2020)	Quantitativo (percentual do resíduo ou fluxo aproveitado em recuperação de energia; eficiência energética do processo).	Ex.: Aproveitamento de resíduos para energia – Refinarias co-processam borras oleosas e lodos em fornos de cimento, recuperando energia do resíduo em substituição a combustíveis fósseis (TN Petróleo, 2025). No <i>upstream</i> , projetos capturam gás que seria queimado em <i>flare</i> para geração de energia ou vapor ( <i>gas-to-power</i> ).	Média – Aplicável a fluxos onde a reciclagem material é inviável, mas existe valor calorífico a ser recuperado (p.ex. resíduos oleosos, gases residuais). Traz benefícios duplos de destinação e geração de energia, porém depende de infraestrutura especializada (unidades de incineração com geração de energia, caldeiras, sistemas de captura de gás) nem sempre disponível em todas as operações.
<b>Taxa de Perda ou Disposição Final</b> (destinação em aterro/sem recuperação)	Programas “Aterro Zero” “Zero Waste”; CTI (2020); ESRS E5;	Quantitativo (fração de resíduos destinados à eliminação final, sem reutilização, reciclagem ou recuperação energética).	Ex.: Envio de resíduos a aterro – A Refinaria de Mataripe (Acelen) reduziu em um ano a destinação de resíduos a aterro de 60% para 9,6%, desviando 90,4% dos resíduos para reutilização, reciclagem ou valorização energética (TN Petróleo, 2025). Essa melhoria rendeu à refinaria a certificação “Aterro Zero” (Selo Bronze, <10% de descarte em aterro), evidenciando a aplicação do indicador para verificar redução de perdas.	Alta – Indicador crítico de desempenho ambiental no O&G, acompanhado de perto para eliminar passivos e impactos. Altas taxas de disposição final indicam ineficiências na gestão de resíduos; por isso, metas corporativas e regulações ambientais visam reduzir ao mínimo o descarte em aterros ou incineração sem energia (TN Petróleo, 2025). A aplicabilidade é ampla no setor, guiando iniciativas de resíduo zero e melhoria contínua na gestão de resíduos em operações <i>onshore</i> e <i>offshore</i> .

Elaborado pelo autor

## 2.4 BARREIRAS E OPORTUNIDADES PARA ADOÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR

Esta subseção aprofunda o debate sobre as barreiras e oportunidades para a adoção da economia circular no descomissionamento *offshore*, mantendo-se estritamente ancorada no corpo de referências mapeado na revisão bibliográfica. A análise consolida evidências destacadas por autores que investigaram desde entraves culturais e organizacionais até condicionantes técnicos, regulatórios e econômicos à circularidade (Kirchherr *et al.*, 2018; Nappo, 2023). Ao mesmo tempo, integra perspectivas que apontam caminhos promissores para a valorização de materiais, criação de novos mercados e redução de impactos ambientais (Terpou, 2017; Velenturf, 2020). Desse modo, o texto mantém a coerência com o levantamento teórico precedente, servindo de ponte entre o diagnóstico das práticas atuais e a proposta de indicadores de circularidade que sustentam esta pesquisa.

Nesse sentido, a incorporação dos princípios da economia circular no descomissionamento *offshore*, voltados à maximização da reutilização de materiais e redução dos resíduos, enfrenta múltiplas barreiras. Estudos destacam especialmente as dificuldades culturais e organizacionais como obstáculos particularmente restritivos nesse processo (Kirchherr *et al.*, 2018; Nappo, 2023).

No setor de óleo e gás, uma cultura tradicionalmente avessa a riscos predomina, com gestores e equipes frequentemente resistentes a adotar práticas inovadoras ainda não amplamente validadas (Kirchherr *et al.*, 2018). Investimentos prévios em processos lineares reforçam essa inércia, pois mudanças são percebidas como ameaças à competitividade (Guldmann; Huulgaard, 2020). Além disso, a ausência de políticas governamentais coordenadas e incentivos específicos contribui para manter essa resistência organizacional, dificultando o estabelecimento de uma cultura institucional favorável à transição circular (Nappo, 2023).

Barreiras regulatórias também desempenham papel significativo, uma vez que as normativas atuais frequentemente enfatizam a remoção total das estruturas, como, por exemplo, o previsto na decisão OSPAR 98/3, dificultando

práticas alternativas como reaproveitamento ou reuso (Velenturf, 2020). A fragmentação institucional, caracterizada por múltiplos órgãos reguladores com objetivos nem sempre alinhados, complica ainda mais a implementação de estratégias circulares integradas (Velenturf, 2020).

Adicionalmente, o contexto econômico atua como um fator restritivo. Decisões financeiras tradicionalmente orientadas por custos imediatos e retornos de curto prazo dificultam a viabilização econômica da reutilização de componentes, cujo retorno financeiro é difuso e de longo prazo (Sharma *et al.*, 2023). Custos elevados para recuperação, certificação e readaptação de equipamentos usados somam-se a regimes fiscais, criando desincentivos econômicos para práticas circulares (Guldmann; Huulgaard, 2020; Marques *et al.*, 2021).

No aspecto técnico, equipamentos *offshore* projetados há décadas sem considerar a possibilidade de reutilização são frequentemente incompatíveis com padrões técnicos atuais, demandando esforços complexos de adaptação e remoção especializada (Terpou, 2017). A natureza sob medida das plataformas *offshore* limita ainda mais o reaproveitamento direto, impossibilitando economias de escala em processos de remanufatura (Marques *et al.*, 2021).

Do ponto de vista logístico, faltam infraestruturas adequadas para fluxos reversos de materiais, como unidades especializadas para descontaminação e reciclagem avançada (Nappo, 2023; Velenturf, 2020). Assim, limitações informacionais também restringem a circularidade, dado que planos de descomissionamento raramente oferecem dados detalhados sobre qualidade e potencial de reutilização dos materiais disponíveis, dificultando tanto o planejamento prévio quanto a criação de cadeias de suprimentos circulares eficazes (Marques *et al.*, 2021; Velenturf, 2020).

A adoção da economia circular no descomissionamento de plataformas *offshore* apresenta importantes oportunidades, compensando parcialmente os desafios já mencionados. Entre as possibilidades mais promissoras está o desenvolvimento de novos mercados para materiais e equipamentos recuperados, permitindo agregar valor ao que antes seria tratado como resíduo.



Experiências como as do Mar do Norte mostram que centros dedicados à remanufatura e revenda de componentes *offshore* podem viabilizar a descontaminação, reparo e certificação de equipamentos usados, reduzindo a incerteza quanto à qualidade e potencializando sua reutilização (Terpou, 2017). Essa iniciativa, alinhada às recomendações feitas pelo *Zero Waste Scotland* e pela RSA (*Royal Society of Arts*), pode estimular um mercado secundário robusto, reaproveitando aço, ligas especiais e componentes mecânicos valiosos que voltariam à cadeia produtiva com menor impacto ambiental e menor custo do que novas extrações e produções (Terpou, 2017).

Além disso, surgem oportunidades inovadoras de reaproveitamento das estruturas em setores diferentes do óleo e gás. Estudos indicam que *topsides* e jaquetas *offshore* podem ser reaproveitados em fundações para turbinas eólicas ou estruturas para aquicultura *offshore*, devido à sua robustez estrutural e durabilidade (Leporini *et al.*, 2019).

Outra aplicação promissora envolve o uso de dutos submarinos e reservatórios esgotados para projetos de armazenamento e transporte de carbono (CCS), prolongando o uso dessas infraestruturas na transição energética e mitigando emissões. Ao repensar as plataformas como recursos reutilizáveis, empresas e governos podem reduzir a necessidade de novas construções, alinhando-se diretamente aos princípios da sustentabilidade e economia circular (Fowler *et al.*, 2019).

Do ponto de vista socioeconômico, teoricamente a adoção de práticas circulares no descomissionamento *offshore* tende a gerar mais empregos qualificados e reter mão de obra especializada localmente, uma vez que atividades como desmontagem seletiva, inspeção e reparo exigem equipes técnicas mais amplas e multidisciplinares do que a simples desmobilização para sucata (Terpou, 2017). Nappo (2023) reforça que a circularidade pode atuar como catalisador de *clusters* industriais regionais mais resilientes, estimulando a inovação e a diversificação de cadeias produtivas ligadas ao descomissionamento. Regiões pioneiras no descomissionamento com abordagem circular podem potencialmente converter esse processo em vantagem competitiva. A partir da internalização de capacidades técnicas e institucionais (como experiência em reciclagem, reuso, remanufatura e

modelagem de circularidade) essas regiões poderiam exportar serviços, tecnologias e expertise para outros mercados globais que enfrentarão desafios semelhantes (Velenturf, 2020).

Os benefícios ambientais também são expressivos: reutilizar componentes reduz drasticamente emissões de gases de efeito estufa e economiza recursos naturais. Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida indicam que reaproveitar estruturas pode evitar significativamente impactos ambientais em comparação com a reciclagem convencional ou fabricação de novos materiais, diminuindo a pegada de carbono, a pressão sobre aterros e os riscos da manipulação de materiais perigosos (Terpou, 2017; Marques *et al.*, 2021).

## 2.5. LACUNAS DE PESQUISA

Ao mapear a literatura que fundamenta esta investigação, observaram-se áreas em que o debate sobre economia circular e descomissionamento *offshore* permanece incipiente ou fragmentado, apontando necessidades claras de aprofundamento teórico-empírico. Essas lacunas, sistematizadas a seguir, envolvem desde a mensuração de benefícios socioeconômicos até a padronização de indicadores e a disponibilidade de evidências de campo. Reconhecê-las é decisivo não só para orientar novas agendas de pesquisa, mas também para ancorar a proposta metodológica deste estudo, que busca ampliar a compreensão da circularidade em ambientes marítimos ao integrar dimensões ambientais, sociais e econômicas de forma harmonizada. Uma dessas lacunas diz respeito à quantificação dos benefícios socioeconômicos associados à reutilização de materiais e valorização de resíduos, especialmente no contexto *offshore*.

Atualmente, a literatura dedica atenção predominante às métricas ambientais, como redução de emissões e taxas de reciclagem, deixando em segundo plano questões socioeconômicas como geração de empregos locais, desenvolvimento regional e retenção de expertise nas comunidades costeiras (Nikanorova *et al.*, 2020). Wei e Zhou (2024), por exemplo, destacam a escassez de indicadores específicos capazes de medir efeitos comunitários diretos, como

melhoria na reputação das empresas ou oportunidades recreativas pós-descomissionamento.

De forma semelhante, Nikanorova *et al.* (2020) enfatizam que a dimensão social da economia circular permanece marginalizada nas avaliações atuais, demandando o desenvolvimento de métodos robustos que incorporem claramente fatores sociais e econômicos na análise da sustentabilidade dos projetos de descomissionamento. Tal integração permitiria uma visão mais completa e equilibrada dos impactos e benefícios das práticas circulares.

Outra limitação crítica refere-se à ausência de padronização dos indicadores de circularidade aplicados especificamente ao descomissionamento *offshore*. Embora exista um amplo conjunto de métricas disponíveis para medir circularidade em diversos setores industriais, falta consenso sobre quais desses indicadores seriam mais adequados para o contexto particular das plataformas marítimas (Costa *et al.*, 2025).

Esta falta de uniformidade gera problemas metodológicos, dificultando comparações entre casos distintos e limitando a generalização dos resultados obtidos. Costa *et al.* (2025) apontam que, atualmente, cada estudo ou empresa adota métricas próprias e frequentemente limitadas a aspectos isolados (como eficiência energética ou reutilização material), sem captar plenamente a essência sistêmica e integrada da economia circular.

Como consequência, fica prejudicada a construção de *benchmarks* ou indicadores compostos que possam avaliar, de forma ampla, o desempenho das estratégias circulares em descomissionamento *offshore*, enfatizando a necessidade urgente de pesquisas que proponham e validem um conjunto harmonizado de indicadores adequados a esta indústria específica.

Finalmente, há uma clara deficiência de dados empíricos detalhados e de estudos aplicados que documentem exemplos reais de implementação da economia circular em plataformas descomissionadas (Sharma *et al.*, 2023). A literatura predominante permanece em nível conceitual ou exploratório, faltando informações práticas sobre iniciativas de reúso e reciclagem já executadas.

Terpou (2017) destaca que essa ausência de transparência e dificuldade de acesso a inventários detalhados forçam pesquisadores a trabalhar com aproximações e suposições, reduzindo a confiabilidade dos resultados obtidos. Velenturf (2020) reforça que a falta de informações sobre valor e qualidade dos

itens recuperados cria uma barreira adicional para a tomada de decisões por investidores e operadores. Dessa forma, suprir essas lacunas é essencial para avançar rumo à implementação mais efetiva e generalizada da economia circular no setor *offshore*.

Outro ponto negligenciado nos métodos correntes é a integração de critérios sociais e econômicos nas ferramentas de apoio à decisão para descomissionamento sustentável. Abordagens como análises multicritério e indicadores compostos ainda se concentram majoritariamente em métricas ambientais (Wei; Zhou, 2024), sem incorporar, por exemplo, índices de criação de emprego por tonelada reutilizada ou indicadores de desenvolvimento socioeconômico local.

Essa omissão sugere uma carência metodológica: modelos de avaliação de sustentabilidade aplicados ao fim da vida de plataformas precisam evoluir para incluir explicitamente dimensões de justiça social e viabilidade econômica da circularidade, alinhando-se ao tripé da sustentabilidade (Sharma *et al.*, 2023). Diante dessas lacunas (quantificação socioeconômica deficiente, falta de indicadores padronizados e escassez de dados empíricos integrados) a presente dissertação direciona seus esforços para preencher parte desse vazio de conhecimento.

Ao focar na aplicação de indicadores de circularidade no descomissionamento *offshore*, com ênfase na reutilização de materiais e valorização de resíduos, este trabalho busca desenvolver um referencial prático que englobe não apenas aspectos ambientais, mas também critérios sociais e econômicos na avaliação de alternativas de desmonte. Ademais, ao aplicar tais indicadores em estudo de, espera-se contribuir com dados empíricos sobre o desempenho da economia circular em projetos de descomissionamento, oferecendo referências para futuras comparações e aprimoramentos.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 TIPO DE PESQUISA

De modo a obter os resultados e respostas acerca da problematização apresentada neste trabalho, este estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem qualitativa, com objetivos exploratórios e descritivos. Adota-se o delineamento de estudo de caso, tendo como foco o descomissionamento da plataforma FPSO P-35 do campo de Marlim da Petrobras.

Conforme Gil (2008), pesquisas exploratórias buscam maior familiaridade com o problema e costumam envolver levantamento bibliográfico e estudos de caso, enquanto pesquisas descritivas visam detalhar características de fenômenos ou processos, descrevendo-os com rigor e profundidade. No presente trabalho, o caráter exploratório está presente na investigação de um tema recente: a destinação sustentável de instalações *offshore*. O aspecto descritivo, por sua vez, está presente na documentação sistematizada das etapas do descomissionamento da P-35, especialmente no que se refere à gestão de seus resíduos. A pesquisa também é classificada como documental e bibliográfica, pois se baseia na análise de documentos técnicos e regulamentares, bem como em literatura científica.

Nesse sentido, a estratégia metodológica adotada baseia-se no delineamento de estudo de caso, estruturado conforme as fases propostas por Yin (2015): (i) planejamento e projeto, envolvendo a definição do objeto, das questões de pesquisa e das proposições teóricas; (ii) coleta de dados, por meio de múltiplas fontes de evidência (incluindo relatórios oficiais, documentos normativos, artigos científicos, teses e outras fontes acadêmicas); e (iii) análise e interpretação, que compreende a organização, categorização e triangulação das informações obtidas.

Essa abordagem, de natureza exploratória e descritiva, com enfoque qualitativo, fundamenta-se em procedimentos documentais e bibliográficos (Gil, 2008), permitindo compreender o objeto de estudo de forma integrada,

articulando o contexto empírico às referências teóricas pertinentes, com o devido rigor científico.

### 3.2 DELIMITAÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DO ESTUDO DE CASO

O estudo de caso está delimitado espacialmente na Bacia de Campos, litoral norte do Rio de Janeiro, no campo de Marlim, onde a FPSO P-35 esteve instalada. Essa unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência (FPSO) foi convertida e instalada no final da década de 1990 para atuar no desenvolvimento do campo de Marlim, constituindo parte do conjunto de plataformas dessa região *offshore* brasileira.

Quanto ao recorte temporal, a análise abrange o período compreendido entre o fim da viabilidade operacional da unidade e as etapas iniciais de seu descomissionamento, com foco no intervalo de 2019 a 2024. Esse intervalo inclui a elaboração do Programa de Descomissionamento de Instalações (PDI), aprovado em 2020, a cessação da produção, concluída por volta de 2022, e a preparação para a desmontagem e retirada da unidade.

O estudo considerou as informações disponíveis até 2023, ano em que se consolidaram as estimativas relativas à massa dos materiais, às rotas de destinação e aos cenários de reúso da plataforma. Mudanças posteriores, como revisões de cronograma ou alteração do destino final dos materiais, não foram contempladas no escopo do estudo. Essa delimitação temporal e espacial teve como intuito assegurar que o estudo permanecesse focado em um contexto bem definido, considerando a conjuntura recente de descomissionamento no Brasil, conferindo coerência e consistência à investigação.

### 3.3 TÉCNICAS DE COLETA DE DADOS

Foram empregadas técnicas de coleta de dados documentais e bibliográficas, visando abranger tanto os dados empíricos do caso da P-35, quanto o conhecimento já consolidado na literatura especializada.

Primeiramente, realizou-se uma análise documental dos relatórios técnicos oficiais relacionados ao descomissionamento da unidade. O principal documento examinado foi o Programa de Descomissionamento de Instalações (PDI) da FPSO P-35, fornecido pela Petrobras e submetido aos órgãos reguladores (ANP e IBAMA). Esta versão pública do PDI, revisada em 2023, contém o inventário técnico da plataforma, incluindo a descrição dos equipamentos e estruturas, estimativas de volume e massa dos materiais a serem retirados, bem como as estratégias de destinação propostas (reciclagem, descarte, entre outras).

A partir desse documento, extraíram-se dados quantitativos como a tonelagem de aço e demais materiais constituintes da P-35, as listagens de componentes reaproveitáveis e não reaproveitáveis, além das alternativas de disposição consideradas no caso base do projeto, como a alienação da unidade para desmonte em estaleiro. Adicionalmente, foram analisados outros documentos técnicos e regulatórios, como pareceres do IBAMA sobre a destinação de resíduos e comunicados oficiais da ANP, de modo a compreender os condicionantes técnicos e legais envolvidos.

Esta etapa de pesquisa documental seguiu as diretrizes metodológicas recomendadas por Sá-Silva, Almeida e Guindani (2009), que salientam a importância de avaliar criticamente a origem, o contexto e o conteúdo dos documentos coletados, bem como de cruzar diferentes fontes para validação das informações. Assim, os dados do PDI da P-35 (Petrobras, 2023b) foram confrontados com dados secundários e referências internacionais análogas, a fim de assegurar sua consistência e atualidade.

Paralelamente à análise documental, foi conduzida uma revisão bibliográfica nas bases indexadas internacionais *Scopus* e *Web of Science* e nacionais SciELO e Portal CAPES, abrangendo publicações entre 2016 e 2025. Essa investigação incorporou ainda literatura cinzenta obtida em repositórios institucionais e temáticos, como a Biblioteca Digital de Teses e Dissertações e o repositório da USP, que disponibilizam documentos relevantes, incluindo teses, dissertações, relatórios técnicos, normas e publicações governamentais.

A busca bibliográfica combinou descritores em português e inglês, relacionados a economia circular, eficiência no uso de recursos, setor de óleo e gás, descomissionamento, resíduos, reúso, indicadores e avaliação. Foram

empregados operadores *booleanos* adaptados às especificidades de cada base, articulando termos como “economia circular/*circular economy*”, “eficiência de recursos/*resource efficiency*”, “óleo e gás/*oil and gas*”, “descomissionamento/*decommissioning*”, “resíduos/*waste*”, “reúso/*reuse*”, “reciclagem/ *recycling*”, “indicadores/*indicators*” e avaliação/*assessment*. Esse conjunto de palavras-chave assegurou a recuperação de estudos alinhados ao tema central do trabalho.

Os critérios de inclusão priorizaram estudos recentes (da última década) e relevantes ao contexto brasileiro ou a casos de reúso de materiais e estruturas *offshore*. Foram identificados e selecionados artigos científicos, capítulos de livros, normas técnicas e trabalhos acadêmicos que versassem sobre: (a) práticas e desafios do descomissionamento de instalações de petróleo; (b) aplicação dos princípios dos 3Rs (reduzir, reutilizar, reciclar) e da economia circular no setor de óleo e gás; (c) indicadores de desempenho ambiental ou de circularidade em projetos de desativação de ativos industriais.

Concluída a revisão bibliográfica, elaborou-se uma matriz comparativa com os indicadores de circularidade identificados na literatura especializada.

A triagem dessa matriz levou em conta três filtros:

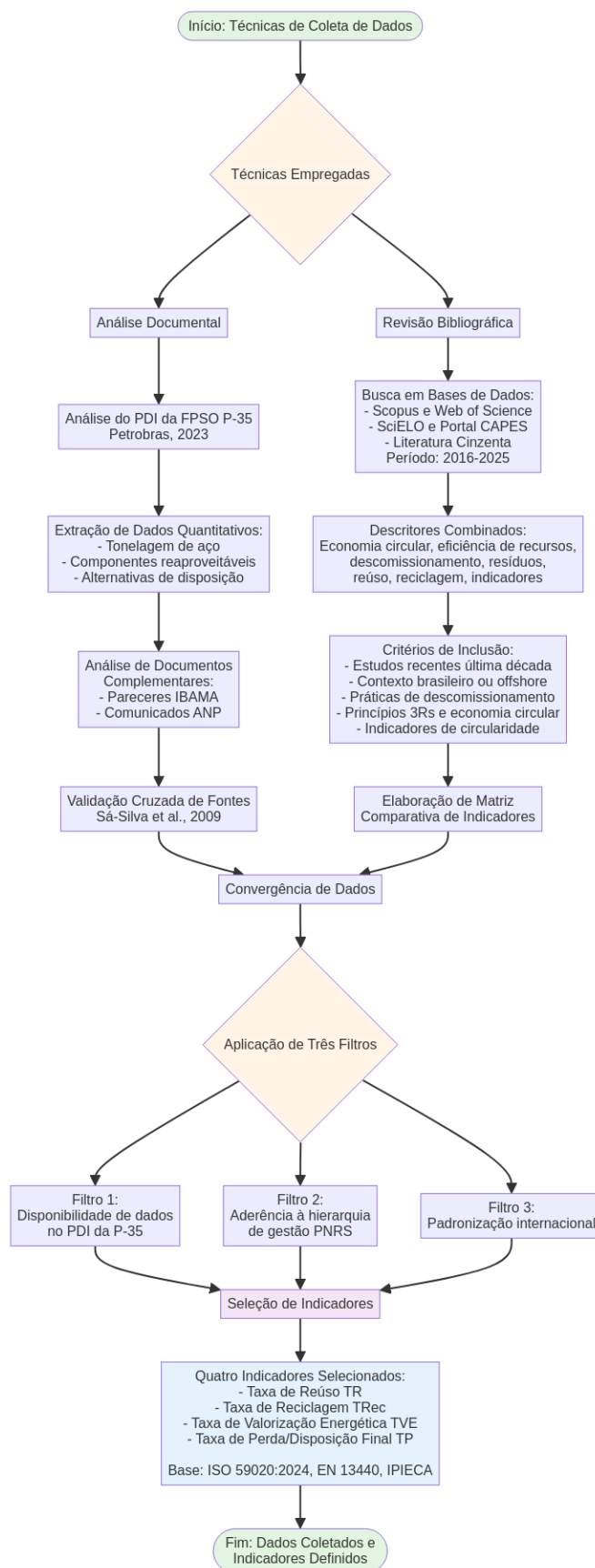
- i) disponibilidade de dados primários no PDI da FPSO P-35;
- ii) aderência à hierarquia de gestão de resíduos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS);
- iii) existência de padronização internacional.

Com base nesses filtros, foram selecionados quatro indicadores: Taxa de Reúso (TR), Taxa de Reciclagem (TRec), Taxa de Valorização Energética (TVE) e Taxa de Perda/Disposição Final (TP). Estes indicadores contam com definições robustas, consolidadas em normas internacionais como a ISO 59020:2024 e EN 13440 e são recomendados por guias técnicos da IPIECA para o setor de óleo e gás, o que reforça sua robustez metodológica.

A Figura 2 sintetiza o processo metodológico empregado na coleta de dados e na seleção dos indicadores de circularidade utilizados neste estudo.



Figura 2 – Fluxograma das técnicas de coleta de dados e seleção de indicadores de circularidade



Elaborada pelo autor.

### 3.4 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE DE DADOS

Após a coleta, os dados foram submetidos a procedimentos combinados de análise qualitativa e quantitativa. Em um primeiro momento, as informações extraídas do PDI da FPSO P-35 (Petrobras, 2023b) e dos demais documentos foram organizadas em categorias temáticas, alinhadas às etapas do descomissionamento: desconexão e remoção de dutos, desancoragem, desmontagem do *topside*, destinação de resíduos, entre outras. Essa estruturação inicial visou facilitar a sistematização dos dados para posterior análise comparativa.

Em seguida, com foco no objetivo específico de avaliar a circularidade do descomissionamento da P-35, foi realizado um inventário de massa de todos os materiais e componentes envolvidos no processo. Esse inventário consolidou os dados disponíveis sobre peso das estruturas metálicas, equipamentos, tubulações, ancoragens, materiais contaminados, entre outros elementos.

Com base nesse levantamento, cada item inventariado foi classificado segundo a sua rota de destinação prevista: i) Reúso direto, envolvendo a reutilização da estrutura ou de equipamentos, na própria empresa ou por terceiros; ii) Reciclagem, com envio para processamento metalúrgico ou recuperação de materiais; iii) Valorização energética, por meio do aproveitamento energético de resíduos em processos como coprocessamento ou incineração com geração de energia) ou iv) Disposição final/perda, representando a destinação em aterro industrial ou abandono *in situ*, caracterizando perda de material para o ciclo produtivo.

Essa categorização buscou refletir a hierarquia de gestão de resíduos estabelecida na PNRS, priorizando o reúso e a reciclagem sobre outras formas de recuperação e, por fim, a disposição final ambientalmente adequada (Brasil, 2010, Art. 9º). Os indicadores selecionados, conforme destacado na seção anterior, foram calculados como a razão entre a massa destinada à respectiva rota e a massa total descomissionada, multiplicada por 100%. Por construção, a soma  $TR + T_{Rec} + TVE + TP$  é igual a 100%, garantindo a cobertura do destino de todos os materiais descomissionados.

Esses indicadores de circularidade foram selecionados por sua aderência aos princípios da economia circular e por refletirem métricas de desempenho ambiental amplamente utilizadas em estudos de fim de vida de estruturas industriais (Montenegro, 2022; OEUK, 2021b). Sua aplicação permite quantificar, de forma simples e objetiva, o grau de retenção de valor material alcançado no processo de descomissionamento. Quanto maiores os valores de TR e TRec, maior é o grau de circularidade e sustentabilidade do processo, ao passo que um valor elevado de TP denota maiores perdas do ponto de vista ambiental e econômico. No contexto da FPSO P-35, partiu-se de um inventário comum de aproximadamente 64 mil toneladas de materiais para projetar três cenários de destinação.

Para a comparação quantitativa, foram definidos três cenários de descomissionamento que representam filosofias distintas de gestão de fim de vida. A estruturação desses cenários baseou-se em três fontes: (i) análise das rotas de destinação propostas no PDI da FPSO P-35; (ii) revisão de literatura sobre melhores práticas internacionais de descomissionamento *offshore*; e (iii) análise de viabilidade técnica considerando as características dos materiais e equipamentos inventariados. Os cenários representam um espectro desde o desmonte completo (Cenário A) até a extensão de vida útil (Cenário B) e um cenário intermediário de reaproveitamento parcial com desmonte (Cenário C). Essa construção permite comparar estratégias lineares e circulares com base nos indicadores escolhidos.

Para fundamentar as premissas do Cenário B, que prevê a transferência da FPSO para novo campo e consequente extensão de sua vida útil, foram examinados relatos de reúso industrial de plataformas, como remontagem de unidades semelhantes, e estudos que quantificam os ganhos ambientais desse prolongamento (OEUK 2021b; Marques *et al.* 2021). Na sequência, calcularam-se os indicadores de circularidade taxa de reúso, taxa de reciclagem, valorização energética e disposição final para os três ambientes avaliados Cenário A desmonte completo, Cenário B extensão da vida útil e Cenário C reúso parcial, permitindo a comparação percentual apresentada em gráficos. Esses resultados demonstram o aumento do aproveitamento de materiais quando se adotam práticas que vão além do desmonte convencional.

### 3.5 FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS UTILIZADOS

A construção da metodologia apoiou-se em fundamentos teórico-metodológicos e em um referencial normativo integrado, oriundos tanto de políticas públicas nacionais quanto de normas técnicas internacionais ligadas à sustentabilidade e ao descomissionamento offshore. Este arcabouço metodológico garante aderência às legislações brasileiras e aos padrões internacionais aplicáveis ao descomissionamento e à gestão ambiental, assegurando rigor, legitimidade e conformidade legal a todas as etapas metodológicas e às análises realizadas.

Em especial, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Brasil, 2010) constitui o principal eixo estruturante do referencial normativo adotado. A hierarquia da gestão de resíduos prevista nessa política — que prioriza a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e, por fim, a disposição final ambientalmente adequada — embasou todo o raciocínio metodológico do estudo. As opções de destinação da FPSO P-35 foram avaliadas à luz desse escalonamento, buscando-se maximizar a retenção de valor (por meio do reúso e da reciclagem) e minimizar as perdas e rejeitos.

Os indicadores de circularidade selecionados (TR, TRec, TVE e TP) derivam diretamente dessa hierarquia, representando, respectivamente, os níveis de reutilização, reciclagem, valorização energética e disposição final definidos na PNRS. Além disso, princípios como a distinção entre resíduo e rejeito, a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a priorização de tecnologias limpas orientaram a classificação dos materiais inventariados no PDI da FPSO P-35 e a avaliação das estratégias de destinação propostas.

Dessa forma, a metodologia não apenas se alinha, mas operacionaliza concretamente os objetivos da PNRS de promover a economia circular e a gestão sustentável de materiais no contexto do descomissionamento offshore, assegurando coerência entre as dimensões normativa, técnica e ambiental da pesquisa.

No âmbito regulatório específico do setor, a pesquisa observou a Resolução ANP nº 817/2020, editada pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Essa resolução institui o Regulamento Técnico de Descomissionamento de Instalações de Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural, estabelecendo os procedimentos e requisitos obrigatórios para desativação de plataformas, abandono de poços, remoção de linhas e destinação de bens *offshore* no Brasil (ANP, 2020b).

Todos os passos analisados no caso da P-35 (da elaboração do PDI à execução das atividades *offshore*) foram cotejados com as diretrizes dessa norma, assegurando que o estudo considerasse as obrigações legais do operador, como a necessidade de aprovação prévia do plano pela ANP, a articulação com outros órgãos (IBAMA, Marinha) e as alternativas de destinação de materiais (reuso, alienação, afundamento etc.) permitidas ou vedadas pela regulamentação.

Também foram consultados, quando cabível, documentos normativos correlatos, a exemplo da Resolução CONAMA nº 469/2015 (que dispõe sobre o descarte no mar de estruturas artificiais, aplicável em casos de *reefing* ou abandono de partes de plataformas) e normativas do IBAMA relativas ao licenciamento de descomissionamento, de modo a enriquecer a compreensão das exigências legais – embora o foco tenha permanecido na resolução ANP 817/2020 e na PNRS Lei 12.305/2010, conforme escopo principal definido.

Em complemento aos referenciais nacionais, foram incorporados os referenciais metodológicos das normas da ISO pertinentes à sustentabilidade e economia circular, assegurando que o estudo observasse boas práticas internacionalmente reconhecidas. A norma ISO 14044:2006 (*Environmental management, Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines*) foi utilizada como referência para estruturar o pensamento em termos de ciclo de vida. Conjuntamente, a ISO 14040:2006 (série de Avaliação do Ciclo de Vida) foram utilizadas como referência de boas práticas para condução de análises ambientais de fim de vida, garantindo alinhamento metodológico com estudos internacionais de ACV (ISO, 2006a). Adicionalmente, a ISO 59010:2024 (Economia Circular – Diretrizes para transição de modelos de negócio e redes de valor) foi incorporada ao referencial, por tratar-se de um documento de

vanguarda que consolida princípios de economia circular aplicáveis transversalmente a diversos setores (ISO, 2024b).

Embora normas ISO não tenham força de lei, seu uso confere padronização e credibilidade acadêmica aos métodos empregados, razão pela qual foram citadas e seguidas em espírito. Por fim, inclui-se no referencial normativo a Política de Destinação Verde da Petrobras, conforme divulgada pela companhia. A Petrobras tem publicado diretrizes internas e metas de destinação para plataformas aposentadas, alinhadas aos compromissos de economia circular e redução de emissões. Tais diretrizes corporativas, embora não sejam normas públicas, complementam o arcabouço normativo considerado, pois refletem a tradução prática, pela operadora, dos requisitos legais e das recomendações internacionais no contexto real dos projetos.

Além disso, foram observados os princípios éticos aplicáveis à condução de pesquisas acadêmicas. Todos os dados e informações extraídos de documentos técnicos, artigos ou demais fontes estão devidamente referenciados, garantindo crédito aos autores originais. Ademais, ao propor cenários alternativos (como extensão da vida útil da plataforma e descomissionamento com reuso parcial de equipamentos), assegurou-se tratar-se de um exercício hipotético analítico, sem qualquer interferência direta em decisões reais ou comunicação que pudesse gerar expectativas indevidas em comunidades ou empregados afetados, evitando-se, assim, quaisquer implicações éticas relacionadas a comunicados sensíveis.

No que tange às limitações do estudo, reconhece-se inicialmente o caráter singular do estudo de caso. Por se concentrar em uma única instalação (FPSO P-35) e em condições específicas, os achados e conclusões têm validade contextual e não pretendem ser generalizados para todo e qualquer projeto de descomissionamento. As lições extraídas aplicam-se sobretudo a unidades semelhantes em contexto brasileiro, podendo não se reproduzir em outras configurações ou regiões sem as devidas adaptações.

Outra limitação diz respeito à qualidade e disponibilidade dos dados. O estudo depende fortemente das informações contidas nos documentos técnicos (PDI, relatórios ambientais etc.) fornecidos pela operadora e órgãos reguladores.

Caso esses documentos apresentem lacunas, estimativas aproximadas ou inconsistências, isso inevitavelmente se reflete nos resultados.

Há também limitações inerentes à simplificação dos cenários estudados. O cenário A (desmonte), B (extensão da vida útil) e C (desmonte com reuso parcial) foram delineados de forma simplificada para efeitos de cálculo dos indicadores, não foram, por exemplo, incorporadas análises de custo econômico ou de logística detalhada dessas opções, o que seria necessário para uma avaliação completa de viabilidade. Assim, os resultados de circularidade devem ser interpretados dentro do escopo estritamente ambiental/massivo considerado; fatores financeiros, regulatórios adicionais ou de cronograma não entraram na métrica, mas podem influenciar a decisão real de optar ou não pelo reuso.

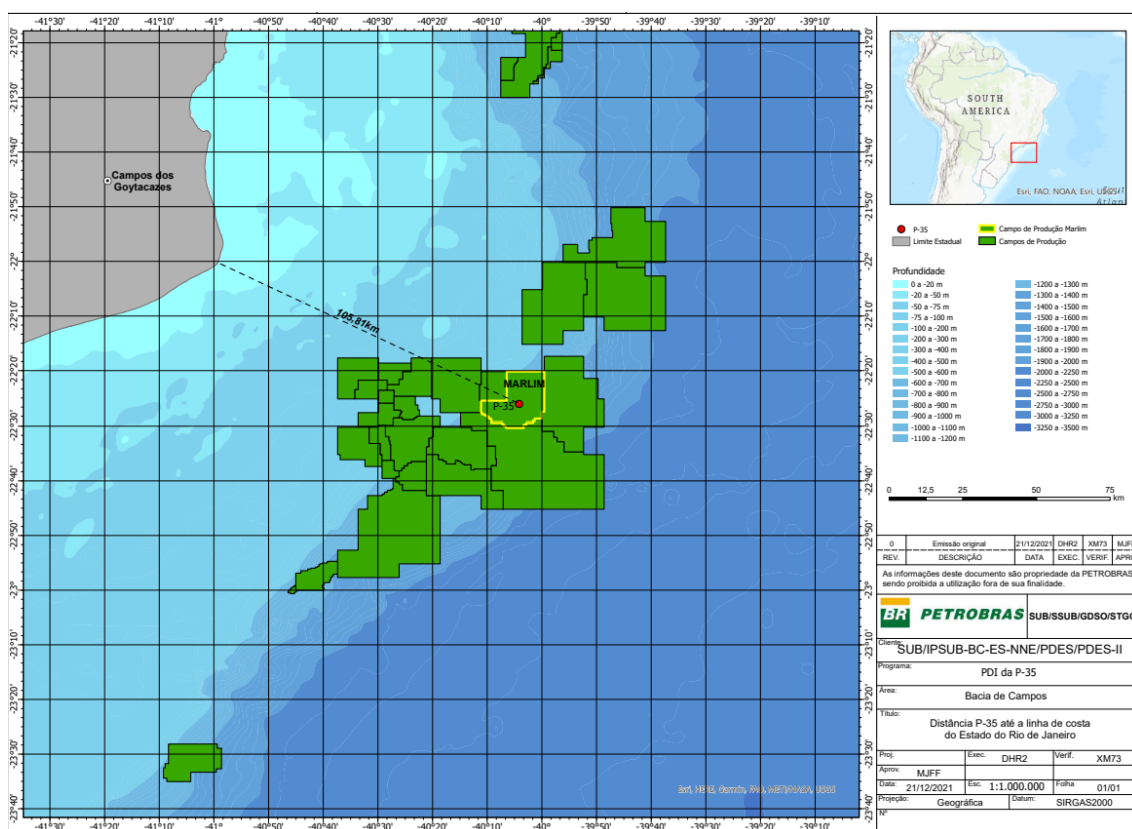
Destaca-se também que, apesar de a pesquisa ter integrado referências atualizadas e multidisciplinares, o campo de descomissionamento sustentável é dinâmico e está em evolução. Novas tecnologias de reciclagem, alterações regulatórias (por exemplo, incentivos fiscais para reciclagem local de embarcações) ou iniciativas de *upcycling* de plataformas podem emergir e alterar o panorama. Os resultados aqui apresentados refletem o estado da técnica disponíveis com base nas referências bibliográficas levantadas nesse trabalho; estudos futuros podem complementá-los ou refiná-los à medida que o setor avance. Reconhecer essas limitações é essencial para contextualizar as conclusões e evitar extrapolações indevidas.

## 4. ESTUDO DE CASO

### 4.1 INTRODUÇÃO

O descomissionamento de plataformas *offshore* tornou-se um tema de grande relevância no Brasil, diante do crescente número de unidades em fim de vida operacional e da necessidade de gestão sustentável desses materiais (Montenegro, 2022). Neste contexto, a plataforma FPSO P-35, localizada na Bacia de Campos, no campo de Marlim, conforme figura abaixo, foi selecionada como objeto de estudo de caso dessa dissertação.

Figura 3 - Mapa de Localização da P-35 na Bacia de Campos



Anexo 1 (Petrobras, 2023b)

A P-35 é uma plataforma que apresenta características que a tornam especialmente relevante para esta análise. Foi uma das primeiras unidades flutuantes de produção em águas profundas do Brasil, iniciando sua operação em 1999 e atuando por mais de duas décadas na Bacia de Campos (Petrobras,



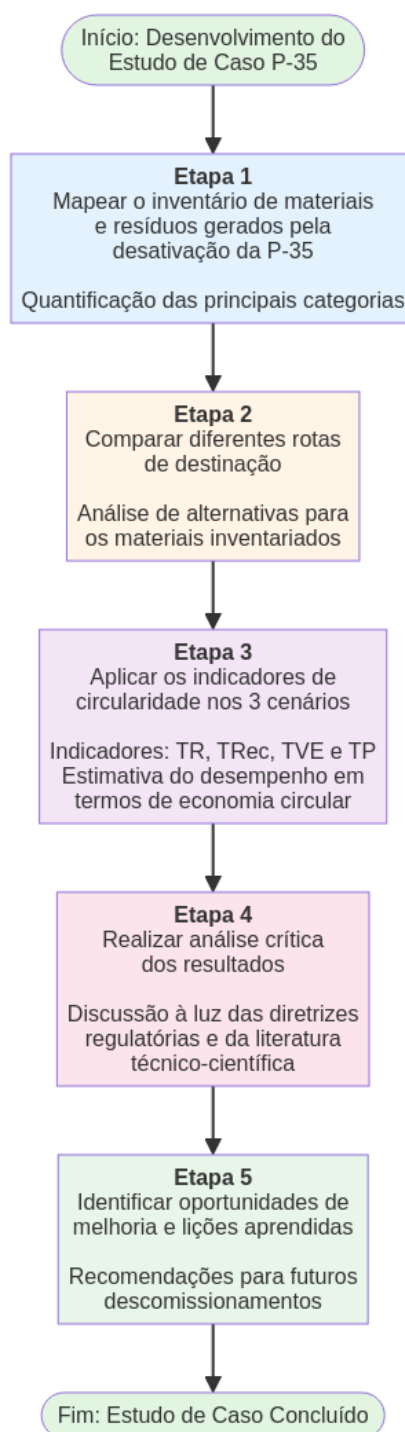
2023b). Seu descomissionamento ocorre em paralelo ao projeto de revitalização dos campos de Marlim e Voador, que possui um amplo cronograma e prevê a substituição de plataformas antigas por plataformas novas unidades (FPSOs Anna Nery e Anita Garibaldi) a partir de 2023 (Lepic, 2025).

Outro aspecto relevante que justifica a escolha da P-35 é a significativa escala de materiais envolvidos (aproximadamente 64 mil toneladas de estrutura metálica e equipamentos), além do seu potencial de aplicação dos princípios de economia circular na destinação desses materiais. Adicionalmente, a plataforma ilustra os desafios técnicos, ambientais e regulatórios tipicamente enfrentados no descomissionamento *offshore* no Brasil, ao mesmo tempo em que destaca as oportunidades de reúso e reciclagem de equipamentos e materiais no setor de óleo e gás.

Nesse sentido, este estudo concentra-se no descomissionamento da plataforma FPSO P-35, abrangendo desde o encerramento de sua produção até as estratégias de destinação de seus componentes no período de 2021 a 2024. Excluem-se do escopo do estudo as etapas de abandono de poços (já executadas). São estudados os materiais gerados pelo desmonte da unidade e do sistema submarino associado, com ênfase na avaliação da circularidade desses materiais.

As etapas de desenvolvimento do estudo de caso incluíram: (1) Mapear o inventário de materiais e resíduos gerados pela desativação da P-35, quantificando as principais categorias; (2) Comparar diferentes rotas de destinação; (3) Aplicar os indicadores de circularidade TR, TRec, TVE e TP nos 3 cenários selecionados, sendo desmonte completo (Cenário A); extensão de vida útil (Cenário B); e cenário intermediário de reaproveitamento parcial com desmonte (Cenário C), de modo a estimar o desempenho do caso de estudo em termos de economia circular; (4) Realizar a análise crítica dos resultados e discutindo-os à luz das diretrizes regulatórias e da literatura técnico-científica; e (5) Identificar oportunidades de melhoria e lições aprendidas para futuros descomissionamentos. A figura 4 ilustra as etapas de desenvolvimento do estudo de caso.

Figura 4 – Etapas de desenvolvimento do estudo de caso sobre o descomissionamento da FPSO P-35



Elaborado pelo autor

Este estudo busca, portanto, sistematizar a experiência de descomissionamento da FPSO P-35, oferecendo aprendizados úteis para projetos similares. A seguir, são detalhadas as características técnicas da unidade.

## 4.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PLATAFORMA P-35

A plataforma P-35 é uma unidade flutuante do tipo FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading unit*), ou seja, um navio convertido para produzir, armazenar e exportar petróleo em alto-mar, conforme figura abaixo. Originalmente construído em 1979 como um navio petroleiro VLCC (*Very Large Crude Carrier*) de nome José Bonifácio, o casco foi convertido em FPSO em 1998 para operar no campo de Marlim.

Figura 5 – Imagem do FPSO P-35 em sua locação (Campo de Marlim)



(Petrobras, 2023b)

A unidade possui comprimento de 329 metros, boca (largura) de aproximadamente 54 metros e calado operacional em torno de 21 metros (Petrobras, 2023b). A arqueação leve, que corresponde basicamente à massa estrutural sem carga, é de cerca de 51.504 toneladas, constituídas predominantemente de aço carbono no casco e nos módulos de processo.

A P-35 foi instalada em posição fixa por um sistema de ancoragem do tipo torre (*turret*) interna, conectada a oito linhas de ancoragem que a mantinham em profundidade média de 842 a 860 metros de lâmina d'água. Cada linha de ancoragem inclui seções de correntes e cabos de aço, fixadas no leito marinho por estacas/pilhas de ancoragem. Em termos de capacidade de produção, a planta de processo da P-35 foi projetada para 100 mil barris de petróleo por dia,

com capacidade adicional de compressão de gás e injeção de água (Petrobras, 2023b).

A unidade operava ainda como navio-aliviador, possuindo tanques de armazenamento de óleo e um sistema de *offloading* para transferência a navios petroleiros. Sua planta de processo englobava diversos equipamentos (separadores, compressores, turbomáquinas etc.) dispostos em conjuntos integrados (*packages*) sobre o convés, em vez de módulos destacáveis (Petrobras, 2023b) – o que significa que, no descomissionamento, não está prevista a remoção segregada de módulos individuais, mas sim o desmantelamento integral da planta a bordo. Materiais construtivos especiais incluem ligas metálicas em equipamentos e tubulações, além de alguns componentes em alumínio (por exemplo, o heliponto de 60 toneladas pode ser de liga leve) e polímeros de engenharia em sistemas auxiliares.

Contudo, estima-se que mais de 90% da massa total da P-35 seja constituída de aço e outras ligas ferrosas, dado o porte do casco e das estruturas de topo. Os demais materiais – metais não ferrosos (cabo de cobre, componentes em alumínio, incluindo os ânodos de sacrifício em liga alumínio e zinco, cuja massa combinada é inferior a 1 % do total da unidade), polímeros (revestimentos, borrachas, plásticos de tubulações flexíveis) e cerâmicos (isolantes, concretos de lastro), por exemplo – correspondem a frações menores, porém relevantes para o plano de gerenciamento de resíduos perigosos e não perigosos. Cabe mencionar a presença de anodos de sacrifício de liga alumínio/zinco instalados externamente no casco e dutos submarinos para proteção anticorrosiva, os quais também entram no inventário de materiais a serem considerados (Petrobras, 2023b).

Durante seus mais de 20 anos de operação, a P-35 esteve conectada a múltiplos poços produtores e injetores no campo de Marlim, contribuindo para o escoamento de volumes expressivos de óleo e gás. Sua desativação, em junho de 2021, decorreu da obsolescência técnica da unidade e da estratégia da Petrobras de renovar o parque de plataformas do campo com unidades mais eficientes (Petrobras, 2023b). Após a parada, a P-35 permaneceu ancorada em locação por um período para viabilizar as atividades iniciais de descomissionamento (limpeza de sistemas, desconexão de dutos) e aguardar disponibilidade de recursos para retirada. Em 2023, com a entrada progressiva

das novas FPSOs no projeto de revitalização do campo, todos os poços anteriormente interligados à P-35 foram abandonados ou reconectados às novas unidades, e a FPSO P-35 foi oficialmente desativada e preparada para remoção (Petrobras, 2023b).

Atualmente, a P-35 encontra-se sem utilização produtiva (“*cold stacked*”), tendo sido desconectada dos *risers* e umbilicais e com o sistema de ancoragem pronto para desfazer – o que configura o estado de pré-descomissionamento. A unidade aguarda o reboque para o estaleiro de desmantelamento ou eventual reaproveitamento. Inicialmente, o PDI da Petrobras previu a alienação da P-35 para desmonte e reciclagem em estaleiro internacional, com o rebocamento direto da unidade desde a locação *offshore* até um dique seco no exterior (Petrobras, 2023b).

Como contingência, considerou-se a possibilidade de trazê-la temporariamente para águas abrigadas no Brasil caso houvesse atraso no processo de venda. No entanto, decisões recentes apontam para uma mudança no destino da P-35: em 2025, a Petrobras anunciou planos de modernizar e reutilizar a FPSO P-35, em vez de desmontá-la, no âmbito de uma iniciativa de reaproveitar três FPSOs de Marlim (P-37, P-35 e P-47) que originalmente seriam sucateados (Lepic, 2025).

Essa mudança, que ainda está em avaliação, alinha-se à tendência de prolongar a vida útil de ativos *offshore* quando viável, reduzindo a geração de sucata e atendendo aos princípios da economia circular. De todo modo, para efeitos do presente estudo (baseado nas premissas originais do PDI), assume-se o cenário de descomissionamento com retirada da plataforma da locação e destinação final de seus materiais, considerando-se também, em discussão, as implicações do possível cenário de extensão de vida da unidade.

O processo de desativação da P-35 está sujeito a um arcabouço normativo específico. A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) regula tecnicamente o descomissionamento de instalações de E&P por meio da Resolução ANP nº 817/2020, que estabelece que todas as instalações *offshore* devem ser removidas ao término da concessão, salvo exceções justificadas e aprovadas (por exemplo, permanência de estruturas no local, apenas se atenderem a requisitos técnicos e ambientais rigorosos) (Montenegro, 2022). Em outras palavras, o *rig-to-reef* (conversão de

plataformas em recifes artificiais) não é a prática padrão no Brasil e só pode ocorrer em caráter excepcional.

No caso de Marlim, sendo um campo em revitalização e não em abandono completo, o PDI da P-35 foi enquadrado como descomissionamento parcial sem devolução de área, permitindo que alguns componentes submarinos fossem abandonados *in situ* (conforme discutido a seguir) sem impactar a continuidade das operações no campo. A ANP, ao analisar e aprovar o PDI, verificou a aderência às diretrizes de segurança, meio ambiente e viabilidade técnica, incluindo planos de abandono de poços, remoção de linhas e destinação de materiais.

No âmbito ambiental, o descomissionamento requer licenciamento junto ao IBAMA, conforme a legislação ambiental brasileira. Para a P-35, foi conduzido um processo de licenciamento específico abrangendo o campo de Marlim e Voador (Processo IBAMA nº 02022.000479/2016), no qual o IBAMA analisou o EIA/RIMA ou estudos equivalentes apresentando os impactos das alternativas de descomissionamento (Petrobras, 2023b).

A licença ambiental de descomissionamento foi obtida em 2021, permitindo o início das atividades mediante condicionantes de monitoramento e controle ambiental. Entre essas condicionantes, destaca-se a gestão adequada de resíduos (incluindo resíduos perigosos, como óleo residual, NORM (*Naturally Occurring Radioactive Material* – materiais radioativos de ocorrência natural acumulados durante a operação) e possíveis substâncias tóxicas) e a necessidade de um Plano de Monitoramento Pós-Descomissionamento (PMPD) para acompanhar eventuais efeitos ambientais após a retirada da plataforma (Petrobras, 2023b).

A Marinha do Brasil também tem competência nesse processo, especialmente no que tange à segurança da navegação e prevenção da poluição marinha. A desmobilização de uma FPSO envolve comunicação e autorizações da autoridade marítima para o reboque, bem como inspeções para garantir que a unidade esteja devidamente limpa (*gas-free*) e estável para transporte. No caso de envio a estaleiro estrangeiro, aplicam-se ainda convenções internacionais como a Convenção de Basiléia (movimentação transfronteiriça de resíduos perigosos) e, no âmbito de desmontagem de navios, as diretrizes da Convenção de Hong Kong em 2009 e do Regulamento Europeu nº 1257/2013 – que, embora

o Brasil não seja signatário formal, servem de referência para as melhores práticas.

A Petrobras, na sua Política de Destinação Verde, comprometeu-se a utilizar estaleiros certificados que sigam tais padrões internacionais de saúde, segurança e meio ambiente no desmanche de plataformas (JPT, 2023). Esse modelo, adotado a partir do descomissionamento da P-32, prevê inventário prévio detalhado, minimização da geração de resíduos, reciclagem de equipamentos e fomento à economia circular, que estaleiros devem operar em diques secos ou áreas impermeabilizadas com drenagem apropriada, e atender à Regulamentação da União Europeia n.º 1257/2013, nos casos de desmonte internacional, ou às exigências ambientais, de saúde e segurança aplicáveis no Brasil. A política também integra diretrizes da ONU sobre direitos humanos e anticorrupção ao longo da cadeia de fornecedores, reafirmando o compromisso da estatal com práticas de ASG (Ambiental, Social e Governança) (Petrobras, 2023a).

De fato, no descomissionamento da FPSO P-32 (campo de Marlim Sul), a estatal realizou em 2023 o primeiro desmonte sustentável no Brasil, em parceria com uma siderúrgica nacional, demonstrando a viabilidade de reciclagem local de grande parte da sucata metálica gerada (JPT, 2023). Esses desenvolvimentos regulatórios e corporativos indicam um direcionamento claro: maximizar a remoção segura das estruturas *offshore* e promover a reutilização/reciclagem *onshore*, mitigando impactos ambientais e gerando benefícios socioeconômicos (por exemplo, sucata como matéria-prima industrial e oportunidades para o setor naval).

#### 4.3 MAPEAMENTO DE FLUXOS DE MATERIAIS E RESÍDUOS

Nesta seção são inventariados os materiais componentes da FPSO P-35 e os resíduos gerados ou identificados durante o seu descomissionamento, bem como as rotas de destinação propostas. O mapeamento baseia-se nos dados do PDI da plataforma e está organizado de forma a comparar cenários de destinação (completa *versus* parcial, extensão da vida útil *versus* outras rotas como reuso parcial, reciclagem, valorização energética ou descarte), conforme

os objetivos do estudo. Quanto ao inventário de materiais a serem descomissionados, tem-se que a FPSO P-35, em sua condição de descomissionamento, contém uma variedade de materiais estruturais, equipamentos, componentes submarinos e resíduos acumulados.

A Estrutura de aço carbono representa aproximadamente 60.000 toneladas, abrangendo o casco do navio, convés, módulos/pacotes de processo, suportes e estruturas diversas. Trata-se da fração majoritária (em torno de 95% da massa total) e corresponde a chapas, perfis e equipamentos predominantemente em aço estrutural. Esse material, por sua natureza, possui alto valor de reciclagem, podendo ser revertido em sucata ferrosa de qualidade para fornos siderúrgicos (Petrobras, 2023b).

Os metais não-ferrosos e ligas especiais somam algumas centenas de toneladas, incluindo cobre (cabeamento elétrico, enrolamentos de motores), alumínio (estruturas como *helideck* - plataforma destinada ao pouso e decolagem de helicópteros, componentes de módulos elétricos), aços inoxidáveis e ligas de níquel (presentes em sistemas de processo, tubulações e válvulas resistentes à corrosão). Embora quantitativamente inferiores ao aço carbono, esses materiais têm alto valor unitário e são direcionáveis à reciclagem ou até reúso de certos componentes. Apesar de representar fração ínfima da massa (menor que 1 %), os ânodos em alumínio e zinco devem ser segregados e encaminhados a recicladores especializados, conforme diretrizes da NBR 10004:2024, evitando descarte inadequado.

Os polímeros e compósitos são estimados em dezenas a centenas de toneladas, principalmente sob a forma de linhas flexíveis e umbilicais (que contêm camadas poliméricas de plástico e borracha, além de armaduras metálicas) e revestimentos de cabos e equipamentos. Adicionalmente, incluem materiais como poliuretano e borracha (por exemplo, revestimento de risers, juntas de expansão), além de tintas industriais e revestimentos anticorrosivos. Esses polímeros, após desmonte, apresentam potencial significativo de reciclagem mecânica e, em alguns casos, química. Legislações e práticas industriais buscam priorizar essa recuperação material. Às vezes, quando a reciclagem não é viável (por contaminação, mistura ou degradação) são destinados à valorização energética via coprocessamento ou disposição em aterros industriais. (Petrobras, 2023b).



Fluidos remanescentes e borras oleosas totalizam algumas dezenas de metros cúbicos, incluindo resíduos como borras de petróleo em tanques, óleos lubrificantes usados, emulsões oleosas e fluidos hidráulicos presentes em sistemas e linhas. No caso da P-35, procedimentos prévios de limpeza foram realizados: por exemplo, a limpeza dos tanques de carga e sistemas de produção reduziram significativamente as borras, classificando-as como resíduos oleosos (não radioativos) (Petrobras, 2023b). Esses resíduos líquidos e pastosos são destinados a tratamentos especializados (separação água/óleo, descarte de águas tratadas) e, no caso de borras com poder calorífico, podem também ser encaminhados a coprocessamento como combustível alternativo.

Os materiais perigosos específicos incluem substâncias radioativas naturalmente ocorrentes (NORM), fontes artificiais, amianto e PCBs (bifenilas policloradas). Em relação à NORM, a P-35 passou por monitorações radiométricas: não foi detectada radioatividade acima dos níveis de ação nos equipamentos de processo, indicando ausência de incrustações significativas de NORM. Qualquer resíduo potencialmente radioativo identificado (como borras de vaso separador) foi removido e acondicionado conforme os protocolos corporativos e normativos. A unidade também possui fontes radioativas seladas em instrumentos – por exemplo, um medidor nuclear com 48 fontes de Am-241 na planta e diversos *ignitores* contendo trítio em turbocompressores e turbogeradores (Petrobras, 2023b).

Essas fontes serão desinstaladas e devolvidas a fornecedores ou armazenadas segundo as normas da CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear), não sendo recicláveis. Quanto ao amianto, embora não mencionado explicitamente no PDI, eventualmente, devido à idade de construção (década de 1970), algumas partes do navio contenham isolamento térmico à base de amianto (em exaustão de turbinas ou caldeiras, p. ex.). Equipes especializadas deverão remover e acondicionar esses materiais, com destinação a aterro classe I (perigoso) licenciado. Componentes com PCBs (bifenilas policloradas, presentes em tintas antigas ou em fluidos dielétricos de transformadores) também requerem manejo especial – contudo, nos projetos mais recentes da Petrobras esses materiais têm sido substituídos ao longo dos anos, podendo já não estar presentes em quantidade relevante.

As estruturas submarinas contemplam o desmonte de dutos de produção e injeção (risers flexíveis), umbilicais eletro-hidráulicos e equipamentos submarinos, como árvores de natal molhadas, *manifolds*, bases e dutos rígidos curtos. Esses itens constituem materiais mistos: metálicos (aço das linhas rígidas, aço e fibra nos risers flexíveis, ligas nos equipamentos) e poliméricos (polietileno, poliamida, poliuretano dos dutos flexíveis e umbilicais). Por exemplo, um umbilical submarino típico contém mangueiras de polímero que, ao serem cortadas, liberam fluidos internos (óleos ou MEG), exigindo procedimentos mitigadores. Toda a sucata metálica proveniente dessas estruturas (trechos de linhas, componentes de aço) é coletada para reciclagem, enquanto os resíduos poliméricos (revestimentos de linhas, restos de mangueiras) são segregados para coprocessamento ou descarte adequado. No PDI da P-35, estimou-se a geração de resíduos metálicos/poliméricos considerável nessa etapa, porém “a maior parte do material é reciclável” e não deverá sobrecarregar aterros (Petrobras, 2023b).

Em resumo, o inventário da P-35 abrange um grande volume de aço reciclável, quantidades menores de metais não-ferrosos também recicláveis, e frações de resíduos perigosos ou não recicláveis (polímeros contaminados, óleos, materiais tóxicos, p. ex.) que requerem destinação ambientalmente adequada. A seguir, o Quadro 3 apresenta os principais componentes do inventário da FPSO P-35 e suas estratégias de destinação previstas no PDI.

Quadro 3 - Resumo do inventário de materiais da FPSO P-35

Componente	Massa (t)	Percentual (%)	Destinação prevista (PDI)	Tipo de destinação
FPSO P-35 (casco e sistemas integrados)	51.504	80	Alienação em leilão	Alienação (destino a definir) – Circular
Amarras de topo e cabos	3.191	5	Reciclagem	Circular
Amarras de fundo e estacas	2.610	4	Permanência <i>in situ</i>	Disposição final (linear)
Dutos flexíveis e umbilicais	7.081	11	Reciclagem	Circular
<b>Total</b>	<b>64.386</b>	<b>100</b>	<b>---</b>	<b>---</b>

Dados do inventário adaptados do PDI da FPSO P-35 (Petrobras, 2023b). Tipo de circularidade conforme IPIECA e Energy Institute (2025). Percentuais calculados sobre a massa total.

Cabe destacar que determinados resíduos e rejeitos especiais presentes na FPSO P-35 (cerâmicos, fluidos residuais, amianto e materiais com presença

de NORM, p. ex.) não foram incorporados no inventário principal de materiais apresentado neste trabalho. Esses elementos, embora quantificados no PDI, representam menos de 5% do total e possuem naturezas e rotas de destinação distintas das aplicadas às massas metálicas predominantes. Assim, foram tratados separadamente, de forma a evitar distorções nos indicadores de circularidade e a manter a comparabilidade com metodologias de referência utilizadas.

No planejamento do descomissionamento, duas dimensões decisórias influenciam diretamente os fluxos de materiais: se haverá remoção completa ou parcial das estruturas e se os materiais ou remanescentes serão reutilizados, reciclados, destinados à valorização energética ou descartados. A plataforma P-35 serve como exemplo claro dessas questões relacionadas ao descomissionamento. Em conformidade com as diretrizes regulatórias, a Petrobras optou por remover integralmente a plataforma da locação e a maior parte dos sistemas submarinos.

Contudo, determinados componentes foram selecionados para permanecer definitivamente no leito marinho devido a critérios técnicos e ambientais. Particularmente no sistema de ancoragem da P-35, as estacas de ancoragem e as partes inferiores das amarras permanecerão permanentemente no fundo marinho, não sendo recuperadas (Petrobras, 2023b).

Essas partes, grandes cilindros de aço cravados no subsolo marinho e segmentos de correntes de grande calibre, são consideradas de difícil remoção (demanda corte ou reboque com altíssimo esforço) e de baixo impacto ambiental se deixadas *in situ*, por serem materiais inertes (aço) com corrosão lenta.

Assim, parte do peso do sistema de ancoragem não será retirado, caracterizando um descomissionamento parcial desse subsistema. Em contraste, todos os equipamentos submarinos removíveis, como cabeças de poço (WHs), *manifolds* e dutos, serão removidos. No caso dos dutos flexíveis e umbilicais, o plano prevê a remoção completa sempre que possível, utilizando técnicas de *pull-out* (reboque e recolhimento contínuo da linha) para trazê-los à superfície e enrolá-los em carretéis a bordo de embarcação especializada (PLSV - *Pipe Lay Support Vessel*). Contudo, admite-se que em alguns casos de linhas entrelaçadas ou parcialmente soterradas, seja necessário cortar segmentos

submersos que estejam inacessíveis, deixando pequenos trechos no fundo (cenário de exceção) (Petrobras, 2023b).

Nesses casos, os trechos remanescentes são igualmente de material inerte (aço/polímero) e ficam como “sucata submarina” sem uso, sujeita apenas à degradação natural. Assim, do ponto de vista de fluxos, a opção por remoção parcial implica que uma porção dos materiais não ingressa na cadeia de reciclagem ou reúso, permanecendo no ambiente (controle pelo órgão regulador). Este material deixado *in situ* representa, no contexto de economia circular, uma perda de matéria (não aproveitada) e um passivo ambiental monitorado. Já a remoção completa maximizaria a recuperação de materiais, porém a um custo e impacto ambiental potencialmente maiores (dragagem, distúrbio do leito, emissões de retirada). No caso da P-35, seguiu-se uma abordagem balanceada ditada pelas melhores práticas e autorização: remoção total da plataforma e quase todos os componentes, com abandono apenas do que é justificável (estacas e segmentos de corrente) (Montenegro, 2022).

Após a remoção dos materiais do ambiente *offshore* e transporte para instalações em terra ou locais especializados, define-se então sua destinação final, abrangendo diferentes rotas: reúso, reciclagem, valorização energética ou descarte. O reúso implica o aproveitamento direto de componentes ou equipamentos, sem necessidade de transformação industrial, reutilizando-os em funções similares ou adaptadas.

Embora, convencionalmente, o reúso tenha sido limitado para FPSOs no Brasil devido à obsolescência e desgaste após longos períodos de operação, para a P-35 surgiu a possibilidade de seu reúso integral em outro projeto após modernização, o que representaria o máximo grau de reúso, prolongando sua vida útil e adiando a reciclagem por anos (Lepic, 2025). De modo geral, equipamentos mecânicos em bom estado, estruturas modulares e materiais consumíveis não utilizados podem ser reaproveitados em outras unidades ou operações. Até 2021, cogitou-se o reaproveitamento de alguns poços reserva da P-35 para novas FPSOs, porém sem previsão de reúso dos seus módulos originais (Petrobras, 2023b).

A reciclagem constitui a rota principal planejada para a massa metálica e outros materiais recuperados, transformando-os industrialmente em matéria-prima secundária. Para a P-35, o plano inicial previa o envio da unidade para um

estaleiro certificado onde seria desmontada, com os metais segregados e reciclados por siderúrgicas especializadas. A Petrobras comprometeu-se a seguir as melhores práticas nesse desmantelamento, buscando altos índices de reciclagem e rastreabilidade.

Plataformas *offshore* adequadamente tratadas internacionalmente atingem taxas superiores a 95% de reciclagem em massa (OEUK, 2021a), índice também esperado para a P-35. A maior parte do aço carbono, metais nobres e polímeros potencialmente recicláveis seriam encaminhados para reciclagem. Por exemplo, cabos de aço e amarras seriam enviados para bases em terra e posteriormente alienados para reciclagem (Petrobras, 2023b).

A valorização energética refere-se ao aproveitamento do conteúdo energético dos resíduos, como polímeros contaminados e resíduos orgânicos, através de coprocessamento em fornos industriais ou incineração com recuperação energética. Fragmentos poliméricos contaminados de dutos flexíveis, resíduos de bioincrustação e borras oleosas são exemplos de resíduos destinados à valorização energética no caso da P-35. O PDI indicou o encaminhamento de bioincrustações provenientes da limpeza de âncoras e linhas para coprocessamento. Estima-se que menos de 5% da massa total da plataforma tenha essa destinação energética (Petrobras, 2023b).

Por fim, a disposição final refere-se aos materiais sem opções econômicas de tratamento ou reciclagem. Isso inclui resíduos perigosos como rejeitos radioativos, amianto e materiais impregnados com substâncias perigosas, destinados a aterros industriais classe I licenciados. No contexto da P-35, itens como revestimentos com metais pesados e lodos contaminados, além de componentes deixados permanentemente no fundo do mar, são classificados como disposição final controlada. Estima-se que menos de 1-2% da massa total sejam destinados ao descarte definitivo, devido à inviabilidade técnica ou econômica de tratamento ou reciclagem desses materiais.

A visualização dos fluxos de materiais entre cenários pode ser descrita da seguinte forma. No Cenário A (desmantelamento completo), toda a massa da P-35 seria removida do ambiente *offshore*. Desse total, aproximadamente 95 % seriam destinadas à reciclagem. Isso inclui sucata metálica e materiais passíveis de reaproveitamento, conforme padrões internacionais que indicam taxas superiores a 95 % para estruturas *offshore* tratadas adequadamente. Entre 4 %

e 5 % seria direcionado à valorização energética, compostos principalmente por polímeros e resíduos orgânicos. Menos de 1 % da massa total seria encaminhada a aterros ou submetida a destruição especializada, referindo-se a materiais perigosos sem viabilidade de recuperação. Nesse cenário, o reuso direto seria praticamente inexistente. Já no Cenário B (extensão da vida útil da FPSO), uma proporção significativa (por hipótese, aproximadamente 80-85%) da massa da P-35 continuaria em uso (a unidade em si), enquanto apenas os componentes substituídos ou requalificados gerariam sucata para reciclagem.

Assim, no curto prazo, o fluxo de resíduos seria muito menor, porém, ao final da segunda vida útil, o desmantelamento ainda ocorreria. Embora a maior parte dos metais removidos seja potencialmente reciclável, estudos setoriais revelam gargalos importantes na cadeia brasileira de desmantelamento. Os estaleiros nacionais, em sua maioria, ainda privilegiam novas construções e dispõem de capacidade limitada de corte e reciclagem, o que restringe o volume anual que pode ser processado (Sinaval, 2024).

Portos e estaleiros carecem de diques secos, pátios impermeabilizados e equipamentos de içamento adequados para receber cascos de grande porte, criando um estrangulamento logístico (ANP, 2023; FGV Energia, 2024). Relatos da indústria apontam que a falta de infraestrutura e de inovação tecnológica freia a expansão dessa atividade (Jornal Portuário, 2025).

Além disso, o licenciamento ambiental federal pode levar anos, gerando incerteza jurídica e adiando o início das operações de desmonte (TCU, 2024; PPI, 2023). Casos recentes, como o atraso no desmonte da FPSO P-32, ilustram a resistência de estaleiros em assumir projetos de reciclagem e a necessidade de investimentos específicos (Couto, 2025). Portanto, não há garantia de que todo material reciclável encontrará destino imediato no País, reforçando a urgência de políticas públicas, incentivos e investimentos para superar barreiras de infraestrutura, mercado e licenciamento (IBAMA, 2025).

Importante frisar que todo o processo deve ocorrer com rastreabilidade e conformidade legal, garantindo que materiais perigosos não sejam dispersos inadequadamente – por exemplo, a sucata retirada no mar será içada e acondicionada de forma segura (uso de *big bags* ou contentores estanques, no caso de fragmentos pequenos), evitando qualquer descarte acidental durante o transporte (Petrobras, 2023b).

#### 4.4 INDICADORES DE CIRCULARIDADE APLICADOS

Para avaliar de forma quantitativa o desempenho do descomissionamento da FPSO P-35 sob a ótica da economia circular, foram definidos e calculados quatro indicadores principais de circularidade: 1. Taxa de Reúso (TR); 2. Taxa de Reciclabilidade (TRec); 3. Taxa de Valorização Energética (TVE); e 4. Taxa de Perda/Disposição Final (TP). Esses indicadores baseiam-se na distribuição de massa entre as diferentes rotas de destinação mapeadas na seção anterior, refletindo os princípios da hierarquia de resíduos (reúso > reciclagem > recuperação > descarte) conforme estabelecida na PNRS e em literaturas sobre economia circular.

Com base nesses indicadores, foram estruturados três cenários de destinação para o descomissionamento da FPSO P-35, representando distintos níveis de circularidade e retenção de valor material. O Cenário A (Desmonte Completo) reflete a prática convencional, em que a unidade é integralmente desmantelada e seus componentes são encaminhados predominantemente à reciclagem ou à disposição final. O Cenário B (Extensão de Vida Útil) corresponde à reutilização integral da unidade, mediante readequações técnicas que permitiriam sua continuidade operacional, postergando a geração de resíduos e maximizando o aproveitamento dos materiais existentes. Já o Cenário C (Reaproveitamento Parcial com Desmonte) configura uma situação intermediária, na qual parte dos módulos, equipamentos e estruturas é reaproveitada em outros ativos ou projetos, enquanto o restante é desmontado e destinado à reciclagem.

A comparação entre esses três cenários, por meio dos indicadores TR, TRec, TVE e TP, permite quantificar o desempenho circular de cada alternativa, evidenciando o potencial de ganho ambiental e de redução de perdas conforme o grau de reaproveitamento adotado. Dessa forma, os cenários funcionam como uma aplicação prática da hierarquia de resíduos estabelecida na PNRS, demonstrando como diferentes estratégias de descomissionamento podem gerar distintos níveis de circularidade e eficiência no uso de recursos.

A Taxa de Reúso (TR) define-se como a porcentagem da massa total de materiais descomissionados que é reutilizada diretamente em sua forma original, sem passar por reprocessamento industrial. Matematicamente:  $TR = (\text{Massa}$

destinada a reúso  $\div$  Massa total descomissionada)  $\times 100\%$ . Este indicador reflete o quanto dos ativos mantêm sua função ou são empregados em nova função sem voltarem a ser matéria-prima.

No caso da P-35, considerando o cenário base do PDI (desmantelamento da plataforma), a taxa de reúso é praticamente 0%, pois não estava previsto o aproveitamento de equipamentos ou estruturas – todo o material seria removido para reciclagem ou descarte (Petrobras, 2023b). Entretanto, é instrutivo analisar um cenário alternativo: se a plataforma for efetivamente modernizada para novo uso, a TR daria um salto significativo.

Considerando que cerca de 85% da massa da unidade possa ser reaproveitada (mesmo após a substituição de alguns módulos e a retirada de equipamentos obsoletos), obtém-se uma TR aproximada de 85%. Esse índice representa um ganho circular relevante, pois cada tonelada destinada ao reúso elimina a necessidade de reciclagem ou de produção equivalente, reduzindo significativamente o consumo de energia e as emissões associadas à fabricação de novos materiais, como o aço.

Embora o reúso integral de unidades ainda seja relativamente raro, casos demonstram sua viabilidade técnica e econômica. A Mærsk Inspirer, após operar no campo Volve (2007–2016), foi modernizada e reinstalada em Yme, no Mar do Norte, em 2021, marcando o retorno da produção na área após mais de uma década de inatividade (Offshore Magazine, 2021). De modo semelhante, o antigo FPSO Berge Helene foi convertido em BW Adolo e redirecionado ao campo Tortue, no Gabão, pela BW Offshore, demonstrando o potencial de reaproveitamento de ativos flutuantes em novos contextos produtivos (Upstream, 2019). Já na Holanda, a plataforma fixa Q13-A vem sendo adaptada no projeto PosHYdon para a produção de hidrogênio verde in situ, ilustrando a reconversão de infraestruturas maduras para novas finalidades energéticas e a integração de tecnologias de baixo carbono ao ambiente offshore (PosHYdon, 2025).

Esses exemplos internacionais reforçam que o reaproveitamento de infraestruturas offshore, quando tecnicamente viável, constitui alternativa estratégica para estender o ciclo de vida dos ativos e reduzir emissões associadas à reciclagem e à fabricação de novas estruturas, princípios que também orientam a avaliação de cenários desenvolvida neste estudo.



Paralelamente, o reúso de componentes vem ganhando tração como estratégia de sustentabilidade e eficiência no descomissionamento offshore. O relatório *Re-use & Decommissioning 2024* da Nexstep documenta iniciativas de reaproveitamento de equipamentos nos Países Baixos e ações de cooperação entre operadores para acelerar a desativação responsável, incluindo o incentivo à criação de plataformas digitais para compartilhamento de ativos e componentes certificados (Nexstep, 2024).

No Reino Unido, o regulador NSTA (*North Sea Transition Authority*) e a entidade setorial OEUK (*Oil & Gas UK*) vêm promovendo abordagens semelhantes, desenvolvendo ferramentas digitais e bancos de dados voltados à identificação de oportunidades de reúso e reaproveitamento de infraestrutura em projetos de descomissionamento, captura e armazenamento de carbono (CCS) e hidrogênio (OEUK, 2021b). Estudos internacionais indicam que o reemprego de componentes de alto valor (como subconjuntos submarinos, manifolds e dutos) pode reduzir custos e emissões associadas à fabricação de novos equipamentos, desde que observados os requisitos de certificação e integridade (DNV, 2021).

À luz desses precedentes, mantêm-se, para o caso da FPSO P-35, as hipóteses de trabalho adotadas neste estudo: TR\_base = 0 % (cenário de desmonte total) e TR\_reúso aproximadamente 80–85 %, caso a unidade seja modernizada. Recomenda-se, adicionalmente, a avaliação do reúso seletivo de componentes de alto valor agregado, mesmo que a plataforma não seja reaproveitada integralmente, sendo uma estratégia coerente com as práticas emergentes na indústria do Mar do Norte e com os princípios de retenção de valor da economia circular

A Taxa de Reciclabilidade (ou Reciclagem) (TRec) corresponde à parcela da massa total que é efetivamente reciclada como matéria-prima secundária. Cálculo:  $TRec = (Massa\ reciclada \div Massa\ total) \times 100\%$ . Inclui principalmente metais enviados à siderurgia e possivelmente outros materiais reciclados (alguns polímeros reciclados mecanicamente, caso ocorram, p. ex.).

Para a P-35, conforme discutido, a reciclabilidade esperada é altíssima. Das aproximadamente 64 mil toneladas, estima-se que cerca de 90 a 95% serão recicladas no cenário de desmantelamento completo. Isso abrange a quase totalidade do aço estrutural, aço inox e ligas metálicas, bem como cobre e

demais metais recuperados (Petrobras, 2023b). Um fator de redução mínimo pode advir de eventuais contaminantes: por exemplo, peças com revestimento de chumbo ou com amianto não podem ser imediatamente recicladas sem tratamento. Ainda assim, esses contaminantes representam fração ínfima.

A literatura internacional confirma que plataformas comparáveis alcançam índices acima de 90% de reciclagem em peso, graças ao predomínio de metais nos materiais (OEUK, 2021b). Convém destacar que a TRec considera a reciclagem efetiva, ou seja, a massa que de fato entrou em processos de reciclagem. No PDI, o termo “passíveis de reciclagem” foi empregado (Petrobras, 2023b), indicando potencial.

Aqui assume-se que todo potencial será realizado, uma vez que Petrobras tem parceria com unidades recicladoras e compromisso de monitorar o destino da sucata (JPT, 2023). Portanto, estima-se uma TRec\_P-35 de aproximadamente 95% nos cenários A (base) e B (extensão da vida útil). No cenário B a taxa de reciclagem imediata seria menor (pois grande parte não é desmontada), mas isso significaria apenas postergar a reciclagem para o futuro.

Nesse cenário de extensão da vida útil, foi considerado que cerca de 15% da massa da unidade será renovada durante a modernização, sendo enviada de imediato à reciclagem. Os 80% remanescentes permanecem em operação e sua desmontagem futura pode alcançar recuperação de 90-95%. Experiências recentes de descomissionamento no Mar do Norte mostram que, em campanhas específicas, 95 % a 99 % do material efetivamente removido e desembarcado foram reciclados ou reaproveitados, especialmente em estruturas metálicas e equipamentos de superfície (DOF Subsea, 2022; Harbour Energy, 2023). No entanto, esses valores referem-se apenas à fração de material retirada e processada em terra, não à massa total original da instalação.

Em estudos oficiais noruegueses, estima-se que 98 % dos resíduos gerados nas operações de remoção de instalações offshore sejam compostos por aço reciclável (Norwegian Petroleum, 2025). Em paralelo, publicações setoriais do Reino Unido relatam que, historicamente, aproximadamente 95 % do material efetivamente removido em campanhas de descomissionamento tem sido reciclado ou reaproveitado, valor que é frequentemente tratado como meta operacional de referência pela indústria britânica (OEUK, 2021; 2024). Campanhas recentes conduzidas com embarcações especializadas, como o

*Pioneering Spirit*, confirmam taxas elevadas de recuperação e reaproveitamento de estruturas metálicas em operações de grande porte (*Offshore Energy*, 2022).

Somando o reúso imediato com a reciclagem futura, o FPSO tende a atingir aproveitamento global de 90-95%, já que perdas inerentes a corte, oxidação e contaminação permanecem inevitáveis (Nexstep, 2024).

A Taxa de Valorização Energética (TVE) indica a fração da massa total destinada à recuperação de energia em vez de reciclagem material ou reúso. Formulação:  $TVE = (\text{Massa encaminhada à valorização energética} \div \text{Massa total}) \times 100\%$ . No caso em estudo, entram aqui principalmente os resíduos poliméricos e orgânicos incinerados ou co-processados, como explicado.

Com base no inventário, podemos estimar: polímeros de risers/umbilicais, assumindo que uma linha flexível de grande diâmetro pese, por exemplo, 50 t por km (com uns 20-30% de polímero), e a P-35 possua aproximadamente 20 km de linhas flexíveis, teríamos da ordem de 200–300 toneladas de polímeros dos dutos; bioincrustação, possivelmente dezenas de toneladas úmidas (bem menos em seco); borras oleosas não recuperáveis, algumas toneladas; madeiras e resíduos diversos, pequenas quantidades. Somando, chega-se a talvez 300–500 toneladas de materiais para valorização energética.

Para fins de cálculo, estima-se uma TVE\_P-35 de aproximadamente 1%. Esse valor relativamente baixo reflete o fato de que a maior parte do peso é metal (não queimável). Contudo, do ponto de vista de resíduos gerados (número de itens), os polímeros e orgânicos podem ser volumosos e exigem logística. A opção por coprocessar esses resíduos em vez de aterrá-los melhora o desempenho ambiental ao recuperar energia e liberar espaço de disposição. Algumas cadeias produtivas, conforme evidenciam Moraga *et al.* (2019), a metodologia de indicadores da Ellen MacArthur Foundation (EMF, 2019) e o indicador *Waste Recovery Rate* do *Environmental Performance Index* (Yale University, 2024), incluem a valorização energética dentro de índices agregados de recuperação de recursos.

Ainda assim, optou-se por deixar essa fração segregada, pois não há recuperação material; o destino é a valorização energética (coprocessamento/incineração). Na prática, tal rota responde por parcela muito pequena do inventário de massa em descomissionamentos, geralmente menor 2%, e limita-se a resíduos poliméricos (revestimentos anticorrosivos,

isolamentos) e lodos oleosos que não podem ser reciclados mecanicamente ou metalurgicamente (Norwegian Petroleum, 2025; Rahman *et al.*, 2024). No cenário de extensão da vida útil da FPSO, a TVE imediata seria ainda menor, já que muitas operações geradoras de resíduos (remoção de risers, p. ex.) poderiam ser adiadas ou minimizadas. De todo modo, a TVE serve como um complemento: quanto menor for, melhor a circularidade material (idealmente tudo seria reciclado ao invés de queimado). No caso da P-35, 1% é considerado um bom índice (muito próximo de cenários ideais onde quase nada vira resíduo irreversível).

A Taxa de Perda/Disposição Final (TP) corresponde à parcela da massa que se perde para o meio ou é disposta definitivamente sem recuperação de material ou energia. Em outras palavras, é o percentual de resíduos que termina em aterro controlado, depósito ou permanece no ambiente marinho. Cálculo:  $TP = (Massa \text{ em disposição final} \div Massa \text{ total}) \times 100\%$ .

Para a FPSO P-35, inclui: metais deixados no mar (estacas e correntes – aproximadamente 2.600 toneladas conforme citado, ou aproximadamente 4% da massa total) e resíduos destinados para aterros (amianto, materiais contaminados – provavelmente poucas dezenas de toneladas, menor que 0,1%). No entanto, há uma consideração: os 4% deixados no mar não são destinados para aterro em terra, mas constituem perda do ponto de vista de recurso não aproveitado.

Se a análise focasse somente no que vai a aterro terrestre, a TP cairia para abaixo de 1%. Contudo, adota-se aqui uma perspectiva ampla de circularidade, em que material abandonado no ambiente é considerado fora do ciclo produtivo (logo, perda). Portanto, a TP de aproximadamente 3–4% retrata sobretudo a opção de abandono das âncoras e demais equipamentos dispostos no leito marinho; em cenários de remoção completa, esse índice tenderia a próximo de zero<sup>9</sup>. Entretanto, cabe ponderar eventuais benefícios ambientais e de serviços ecossistêmicos eventualmente associados às estruturas dispostas no leito marinho (bioincrustações), o que não foi considerado nesse trabalho.

---

<sup>9</sup> Em cenários de remoção integral, como os adotados no setor britânico do Mar do Norte após a OSPAR Decision 98/3, que veda a permanência de instalações desativadas salvo raras derrogações, esse índice tende a zero, embora os custos de descomissionamento aumentem consideravelmente (OSPAR Commission, 2023; OEUK, 2023).

Já no cenário de extensão da vida útil da FPSO P-35 (Cenário B), a TP permanece aproximadamente 4%, pois independe do destino do *topside*, e possivelmente um pequeno extra caso equipamentos não recicláveis fossem descartados. Assim, a taxa de perda evidencia os pontos de melhoria: no futuro, tecnologias que permitam remover ou reutilizar aquelas estacas e linhas poderiam reduzir esse percentual. Contudo, vale reforçar que o impacto ambiental de deixar aço no fundo é considerado baixo – essas peças, como mencionado, são praticamente inertes e se tornam substrato artificial no ecossistema (Petrobras, 2023b). De todo modo, do ângulo da economia circular, é material que deixou o ciclo industrial.

#### **4.4.1 Cenário C intermediário de reaproveitamento parcial na FPSO P-35**

Neste cenário intermediário (Cenário C) considera-se que uma parte dos equipamentos da FPSO P-35 seja remanufaturada e reaproveitada antes do desmantelamento integral da unidade. Especificamente, estima-se que aproximadamente 20% da massa total dos equipamentos, premissa do autor a título de ilustração da proposta, possa ser destinada diretamente ao reúso em outros projetos ou até mesmo em outras indústrias, postergando sua entrada na etapa de reciclagem. Os 80% restantes seriam desmontados e direcionados para reciclagem ou descarte, seguindo a mesma lógica operacional do cenário base de desmantelamento completo.

Essa abordagem híbrida reflete as melhores práticas sugeridas na literatura, que recomendam priorizar o reúso de componentes de alto valor sempre que a reutilização integral da instalação não for viável (OEUK, 2021b). No caso da P-35, embora o PDI original não previsse o reaproveitamento dos módulos ou sistemas principais da plataforma (Petrobras, 2023b), é tecnicamente possível identificar e reutilizar diversos equipamentos em bom estado (turbomáquinas, válvulas de grande porte, geradores, guindastes, sistemas elétricos, p. ex.) para serem reformados e utilizados em outras unidades (OEUK, 2021b).

De modo geral, equipamentos mecânicos preservados, estruturas modulares removíveis e materiais consumíveis não utilizados podem encontrar aplicação em projetos novos ou em andamento, evitando a necessidade de se fabricar componentes do zero e agregando valor dentro dos princípios de economia circular (OEUK, 2021b; Marques *et al.*, 2021). Cabe salientar que, na prática atual, o reúso efetivo de materiais de plataformas descomissionadas ainda é bastante limitado, frequentemente abaixo de 5% da massa total, devido a barreiras técnicas e de mercado (Marques *et al.*, 2021). Portanto, a assunção de 20% de reúso para a P-35 representa um avanço significativo frente aos níveis típicos, demandando planejamento proativo para remanufatura e certificação desses equipamentos recuperados.

Do ponto de vista dos indicadores de destinação, o cenário de reúso parcial melhora sensivelmente a performance circular sem deixar de assegurar elevada recuperação de materiais. A Taxa de Reúso (TR) alcançaria aproximadamente 20%, valor intermediário entre a TR de aproximadamente 85% do cenário de extensão de vida (reúso integral da plataforma) e o TR nulo do desmantelamento completo. Isso significa que, de um total de cerca de 64 mil toneladas da P-35, em torno de 12 mil toneladas de equipamentos seriam aproveitadas diretamente, prolongando sua vida útil (Petrobras, 2023b).

Assim, a Taxa de Reciclagem (TRec) imediata seria menor que no caso do desmonte total: em vez de reciclar aproximadamente 95% da massa (como estimado no cenário A de desmontagem completa), seria reciclado algo em torno de 75–80% do peso original da unidade. Essa redução relativa ocorre porque uma parcela significativa dos materiais (os 20% reutilizados) foi desviada da rota de sucateamento e, portanto, não entra de imediato no fluxo de reciclagem.

Ainda assim, os aproximadamente 80% de massa que seguem para desmantelamento mantêm altíssima reciclabilidade, próxima à do cenário base, visto o predomínio de metais e ligas aproveitáveis, espera-se que praticamente todo o aço, cobre e demais metais presentes nessa fração remanescente continuem sendo efetivamente reciclados como sucata metálica (Petrobras, 2023b; OEUK, 2021a). Em outras palavras, embora o TRec global desse cenário (aproximadamente 80%) fique um pouco abaixo do cenário de reciclagem total, isso não representa perdas de material, mas sim seu reúso antecipado, os

metais reaproveitados também seriam reciclados ao término de sua segunda vida, fechando o ciclo mais adiante.

Em relação aos demais índices, Taxa de Valorização Energética (TVE) e Taxa de Perda/Disposição Final (TP), projeta-se que permaneçam semelhantes aos do desmantelamento convencional. Os componentes não contemplados no reuso (cerca de 80% da massa) ainda englobam resíduos e materiais não recicláveis que precisam de destinação adequada, como, por exemplo, fluidos oleosos, revestimentos contaminados, polímeros degradados ou itens perigosos.

Assim, tal como no cenário A, apenas uma pequena fração deverá ser submetida à recuperação de energia (queima controlada de resíduos para aproveitamento energético) ou enviada à disposição final em aterro industrial ou outra solução licenciada – em conjunto, TVE + TP tendem a totalizar menos de 5% da massa da plataforma (Petrobras, 2023b). Vale notar que a introdução do reuso parcial não aumenta essas perdas; pelo contrário, ao extrair para reaproveitamento equipamentos potencialmente complexos ou contaminantes (como módulos com asbestos, componentes com resíduos químicos etc.), o processo de desmantelamento pode até simplificar-se, focando na sucata metálica limpa. Desse modo, mantém-se elevada a eficiência de recuperação de materiais e energia, com descarte mínimo, alinhada às metas ambientais do projeto (Petrobras, 2023b).

Comparativamente aos cenários extremos já analisados, o cenário intermediário de reuso parcial demonstra ganhos importantes na lógica de circularidade, equilibrando prolongamento de uso e reciclagem. Em relação ao cenário A (desmantelamento completo), há uma redução de 20% na geração imediata de sucata e no consumo de energia associado à reciclagem de metais, já que uma parte dos componentes é diretamente reutilizada.

Isso implica menor necessidade de processos como corte, fundição ou fabricação de novos equipamentos, evitando emissões correspondentes. Ao mesmo tempo, diferentemente do cenário B (extensão da vida útil), esta alternativa não requer encontrar emprego para a plataforma inteira, mas apenas para determinados módulos e equipamentos, o que pode ser logisticamente mais viável em muitos casos.

Do ponto de vista dos indicadores, o cenário de reuso parcial aproxima-se do ideal circular ao elevar a TR para 20% e reduzir proporcionalmente a TRec imediato, sem comprometer a recuperação total de recursos ao fim do ciclo. Naturalmente, seu TR ainda fica aquém do cenário de extensão da vida útil (Cenário B) da plataforma (que reaproveita a quase totalidade da unidade por anos adicionais), porém representa um avanço notável frente ao desmonte linear tradicional.

Portanto, incorporar a remanufatura e reutilização de aproximadamente 20% dos equipamentos antes do desmantelamento maximizaria a retenção de valor dos materiais da P-35 e minimiza desperdícios, atendendo aos princípios da economia circular. Esse terceiro cenário ilustra uma solução de compromisso em que se obtêm benefícios ambientais e econômicos significativos, prolongando a vida de partes do ativo, gerando economia de insumos para novos projetos e reduzindo o volume de resíduos; sem deixar de cumprir as exigências regulatórias de retirada da instalação *offshore* e destinação final responsável de todo o inventário (ANP, 2020b; IBAMA, 2022). Em termos de desempenho global, espera-se que a P-35, sob este arranjo, apresente TR de aproximadamente 20%, TRec entre 75 e 80%, TVE  $\approx$  2% e TP  $\approx$  3% da massa, valores intermediários entre os cenários já estudados e indicativos de uma gestão mais circular dos materiais descomissionados.

#### 4.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A literatura acadêmica sobre descomissionamento *offshore* converge em afirmar que nenhuma rota isolada (seja a reciclagem imediata, seja o prolongamento integral da operação) satisfaz simultaneamente metas de desempenho ambiental, eficiência econômica e redução de passivos (Bull; Love, 2019). Abordagens híbridas, que combinam remanufatura seletiva de equipamentos com reciclagem de elevada eficiência, têm sido apontadas como caminho mais equilibrado (Velenturf, 2020), ideia reforçada por um “*horizon scan*” que definiu prioridades globais de pesquisa justamente na integração de estratégias de reuso, reciclagem e descarte mínimo (Watson *et al.*, 2023). A Tabela 1 resume o resultado da aplicação dos



indicadores de circularidade selecionados para cada um dos cenários estudados para o descomissionamento do FPSO P-35.

Tabela 1 - Indicadores de Circularidade – FPSO P-35

Indicadores		Cenário A Base (Desmonte Completo)	Cenário B Extensão da vida útil do FPSO	Cenário C Intermediário (Reúso parcial com desmonte)
1	TR – Reúso	0% (0 t)	85,0% (54.729 t)	20,0% (12.877 t)
2	TRec – Reciclagem	95,0% (61.168 t)	14,0% (9.014 t)	75,0% (48.290 t)
3	TVE - Valorização energética	1,0% (644 t)	0,5% (322 t)	2,0% (1.288 t)
4	TP - Perda/ Disposição final	4,0% (2.575 t)	0,5% (322 t)	3,0% (1.932 t)
<b>Total</b>		<b>100,0%</b> <b>(64.386 t)</b>	<b>100,0%</b> <b>(64.386 t)</b>	<b>100,0%</b> <b>(64.386 t)</b>
<b>Circularidade total (TR+TRec+TVE)</b>		<b>96,0%</b> <b>(61.811 t)</b>	<b>99,5%</b> <b>(64.064 t)</b>	<b>97,0%</b> <b>(62.454 t)</b>

Adaptado de Petrobras (2023b).

Aplicando essas recomendações ao inventário da FPSO P-35, cerca de 64 mil toneladas de estrutura e equipamentos listados no PDI (Petrobras, 2023b), são analisados três cenários. No desmonte completo (Cenário A), 95 % da massa segue para reciclagem, 1 % para valorização energética e 4 % permanecem como perda (disposição), sobretudo aço de estacas *in situ*. No polo oposto, a extensão de vida útil (Cenário B) eleva o reúso a 85 %, reduz a reciclagem imediata a 14 % e praticamente zera descartes, posicionando-se como caso de circularidade máxima, mas dependente de mercado para recolocação da unidade.

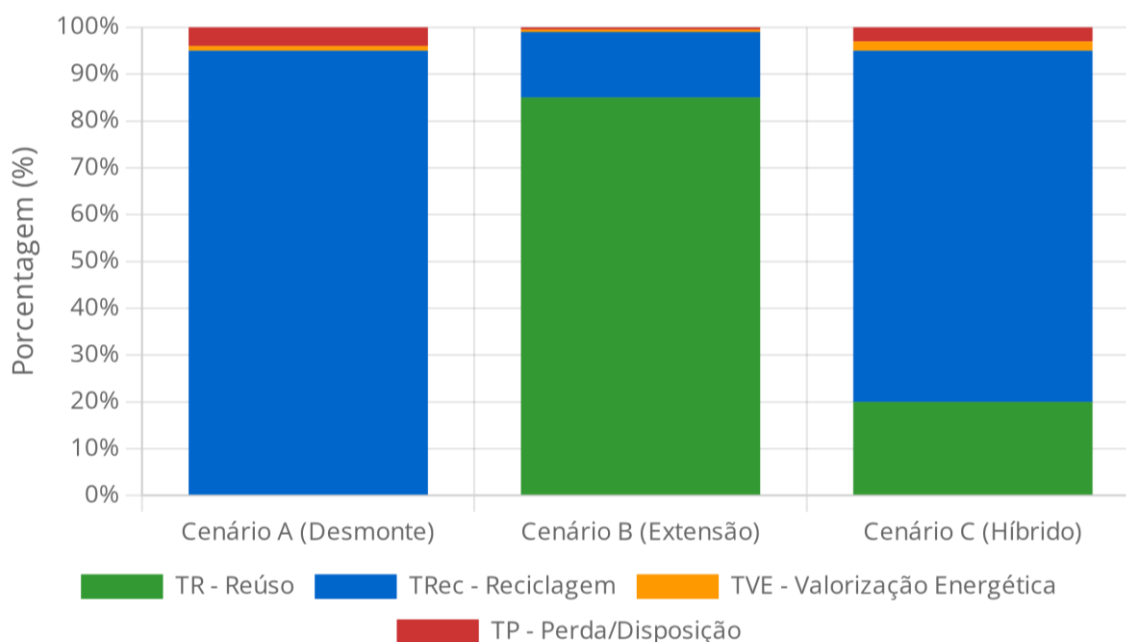
Entre esses extremos, o cenário intermediário (Cenário C) assume remanufatura de cerca de 12,8 mil toneladas (aproximadamente 20 % da massa) em componentes de grande valor, como turbomáquinas, guindastes e válvulas, faixa coerente com levantamentos de reaproveitamento no Mar do Norte (Marques *et al.*, 2021). Essa escolha desloca parte do fluxo da reciclagem para o reúso imediato: a Taxa de Reúso (TR) salta de 0 % para 20 %, enquanto

a Taxa de Reciclagem (TRec) recua para 75 %, mas permanece dentro da meta de boas práticas (70–90 %) proposta por estudos comparativos de plataformas envelhecidas (Bull; Love, 2019).

A Taxa de Valorização Energética (TVE) sobe levemente a 2 % em função de resíduos gerados nos processos de limpeza e adaptação dos equipamentos, valor inferior ao limite de 5 % recomendado em análises de sustentabilidade para sistemas *offshore* (Rahman *et al.*, 2024). Já a Taxa de Perda ou Disposição Final (TP) cai para 3 %, pois a reforma seletiva reduz a quantidade de sucata metálica deixada no leito marinho, alinhando-se à janela menor que 5 % sugerida por avaliações de ciclo de vida de ativos desativados (Zanuttigh *et al.*, 2025).

O gráfico da figura 6 abaixo evidencia essa progressão (porcentagem da massa total): a barra do desmonte completo (Cenário A) concentra o desempenho na reciclagem, a do híbrido - reuso parcial com desmonte (Cenário C) redistribui material sem aumentar perdas e a da extensão de vida (Cenário B) maximiza o reuso, quase eliminando descartes. A análise mostra que cada cenário apresenta benefícios e limitações específicos.

Figura 6 – Gráfico dos Indicadores de Circularidade – FPSO P-35



Adaptado de Petrobras (2023b)

O Cenário A (desmonte completo) oferece rastreabilidade integral e reduz o passivo futuro, mas exige elevado consumo energético e gera emissões

relevantes ao cortar, içar e fundir o aço (Watson *et al.*, 2023; Marchetti *et al.*, 2025).

O Cenário B (Extensão de Vida Útil), embora represente o nível mais elevado de circularidade, mantendo aproximadamente 85 % da massa da unidade *in situ* e evitando emissões associadas à reciclagem, deve ser interpretado como um cenário de exceção. Essa alternativa implica reuso integral da instalação, o que pressupõe a comprovação de integridade estrutural, viabilidade técnica e conformidade ambiental junto aos órgãos reguladores (ANP e IBAMA). Além disso, a postergação do descomissionamento transfere incertezas de responsabilidade e de risco ambiental para períodos mais longos (Zanuttigh *et al.*, 2025).

O Cenário C (reuso parcial) busca equilíbrio ao remanufaturar equipamentos de maior valor, diminuir emissões ligadas à produção de aço primário e limitar o descarte global a aproximadamente 3 %, embora exija logística adicional e reengenharia para a remanufatura (Watson *et al.*, 2023). Nenhuma alternativa é universalmente preferível; a decisão depende do critério dominante, seja ambiental, econômico ou relacionado ao risco, e deve considerar os *trade-offs* entre remoção total, parcial ou reuso (Zanuttigh *et al.*, 2025; Marchetti *et al.*, 2025).

Os cálculos realizados basearam-se principalmente nas informações fornecidas pelo PDI da FPSO P-35 (Petrobras, 2023b), que detalham as quantidades e tipos de materiais das instalações e as alternativas de destinação propostas (por exemplo, alienação para reciclagem, coprocessamento etc.). Complementarmente, foram utilizados dados da literatura internacional para balizar proporções típicas – como o valor de referência de 95% de reciclagem de plataformas no Mar do Norte (OEUK, 2021a).

No Brasil, o projeto de reciclagem da FPSO P-32, anunciado como o primeiro desmonte “verde” de uma plataforma no País, encontra-se atrasado. Após a chegada da unidade ao estaleiro de Rio Grande, foram identificados cerca de 30 milhões de litros de água oleosa e 270 mil litros de diesel que não constavam no inventário inicial, desencadeando disputa contratual entre Petrobras e Gerdau e suspendendo o cronograma de corte (Reuters, 2025). O impasse evidencia a importância de um inventário de resíduos completo e

verificado antes do desmantelamento, a fim de evitar custos adicionais e riscos ambientais.

Normativas como a Resolução ANP nº 817/2020 e a PNRS Lei 12.305/2010 forneceram o arcabouço teórico da hierarquia de destinação, assegurando que os indicadores aqui adotados estejam em consonância com os termos técnicos usuais (reutilização, reciclagem, recuperação e disposição final). Acadêmicos nacionais têm discutido indicadores de circularidade em diversos contextos, apontando que quantificar essas taxas ajuda a mensurar o quão próximo um processo está do modelo circular ideal (100% de reaproveitamento); embora, na prática, valores muito próximos de 100% sejam difíceis devido a perdas entrópicas e limitações técnicas (como qualidade de material reciclado degradada) (EcoStartup, 2023). No presente estudo, as eventuais incertezas nas porcentagens derivam da necessidade de estimar algumas massas (quantidade exata de polímeros ou resíduos perigosos, p. ex.), mas buscou-se ser conservador, atribuindo valores ligeiramente superiores para descarte quando incerto, para não superestimar a circularidade.

#### **4.5.1 Discussões para estudo de caso da P-35**

O estudo de caso da FPSO P-35 permitiu quantificar e avaliar o destino dos materiais de uma grande plataforma *offshore* sob a ótica da economia circular. Conforme o inventário levantado, a P-35 continha aproximadamente 64 mil toneladas de estruturas e equipamentos, sendo mais de 90% dessa massa composta por aço carbono e outras ligas ferrosas. Os demais materiais incluem pequenas frações de metais não ferrosos (cobre, alumínio, como o heliponto em liga leve), polímeros (revestimentos, borrachas, plásticos) e cerâmicos (isolantes, concreto de lastro), além de materiais perigosos como amianto e resíduos oleosos.

A predominância de metais ferrosos já indicava um elevado potencial de reciclagem, alinhado a estudos que apontam alta reciclabilidade em plataformas *offshore* devido ao predomínio de aço estrutural. Por outro lado, a presença de resíduos perigosos e componentes não removíveis (por exemplo, estacas de ancoragem cravadas no leito marinho) representa um desafio para a destinação

sustentável, pois parte desses materiais não pode ser reinserida nos ciclos produtivos e requer disposição final segura.

Foram comparadas diferentes rotas de destinação dos materiais da P-35. Esses cenários correspondem a alternativas de destinação previstas na literatura e na normativa, desde a remoção total (caso base exigido pelas convenções da IMO e pela ANP) até opções de reutilização que prolongam o uso dos ativos (ANP, 2020a). De forma geral, a comparação entre os cenários A, B e C evidencia que não existe uma solução única superior em todos os critérios, cada alternativa apresenta vantagens e limitações específicas, devendo a escolha considerar as prioridades do projeto (ambientais, econômicas, sociais ou de segurança). Em termos de indicadores de circularidade de materiais, o cenário B (reúso integral) é o mais próximo do ideal (TR mais alto, TP mínimo); o cenário A (desmonte) apresenta reúso menor porém alcança a meta de reciclagem máxima; e o cenário C (reúso parcial) busca um meio termo entre ambos, elevando sensivelmente o reúso sem comprometer a reciclagem total no ciclo de vida.

Essa constatação se alinha a estudos recentes de *horizon scanning* (prospecção) para descomissionamento *offshore*: Watson *et al.* (2023) afirmam que nenhuma alternativa é universalmente preferível, pois o desempenho relativo de cada opção depende dos critérios de avaliação (como emissões, custos, riscos operacionais e impactos ambientais). Diante disso, os autores recomendam abordagens multicritério e decisões caso a caso, considerando as especificidades técnicas e ecológicas de cada ativo. Essa perspectiva também converge com a regulamentação brasileira vigente, notadamente na Resolução ANP nº 817/2020. No caso da P-35, a opção efetivamente adotada (desmantelamento quase completo) atende aos requisitos legais e de segurança, buscando eliminar o passivo de forma rastreável.

Por outro lado, a discussão exploratória aqui conduzida revelou que há oportunidades de aprimorar a circularidade aproveitando melhor os materiais, seja via extensão de uso de toda a unidade, seja via reúso direcionado de partes. Do ponto de vista das diretrizes de economia circular e da política nacional de resíduos, os achados reforçam a importância de priorizar, sempre que possível,

as rotas hierarquicamente superiores: reúso > reciclagem > recuperação energética > descarte.

Ao aplicar essa lógica, o cenário B atende quase plenamente aos princípios da economia circular, ao manter 85% do recurso em circulação sem necessidade de voltar à cadeia extrativa. O cenário C, embora menos circular que B, ainda melhora significativamente o desempenho frente ao caso base, ao introduzir uma etapa de reúso que antes não existia e reduzir a carga imediata de reciclagem e descarte. Essas estratégias encontram respaldo na literatura: autores como Velenturf (2020) e Marchetti *et al.* (2025) argumentam que a integração de reúso e reciclagem tende a otimizar o aproveitamento total de materiais, ao mesmo tempo em que dilui impactos ambientais negativos e demandas energéticas extremas de um único caminho.

Em contrapartida, deve-se planejar cuidadosamente a implementação de alternativas de reúso, garantindo que benefícios potenciais não sejam anulados por riscos ou custos excessivos. Caso a remanufatura e transporte de equipamentos descomissionados envolva esforços logísticos elevados (por exemplo, deslocamento transcontinental ou processos industriais intensivos em emissões), os benefícios ambientais previstos anteriormente podem ser substancialmente reduzidos (Syriac; Prakash, 2022).

Ademais, a reutilização integral de uma FPSO requer avaliação rigorosa de integridade estrutural e adequação técnica ao novo local, pois caso contrário há risco de acidentes ou vazamentos que poderiam gerar impactos ambientais maiores que a economia material obtida (Syriac; Prakash, 2022). Logo, a busca pela circularidade máxima deve vir acompanhada de análises de viabilidade técnica e de ciclo de vida completas, alinhadas com as melhores práticas de descomissionamento seguro.

Outro ponto a destacar é a importância da confiabilidade dos dados e do planejamento antecipado. A estimativa dos indicadores da P-35 baseou-se nas informações do PDI (inventário de materiais e plano de destinação) e em fatores de referência da literatura internacional. Contudo, a experiência real de projetos de desmonte no Brasil já mostrou surpresas: no descomissionamento da FPSO P-32, caso pioneiro de reciclagem em território nacional, foram encontrados

volumes inesperados de resíduos (aproximadamente 30 milhões de litros de água oleosa, 270 mil litros de diesel não inventariados), que atrasaram o cronograma e geraram disputa contratual entre as partes envolvidas (Texeira; Nogueira, 2025).

Texeira e Nogueira (2025) destacam que o incidente envolvendo a plataforma P-32 expôs falhas no inventário inicial de materiais, ocasionando a suspensão temporária das atividades de corte, o que evidenciou a necessidade de um inventário completo e auditado antes do desmantelamento. Isso reforça que, na economia circular, o alcance das metas de reaproveitamento depende diretamente do controle rigoroso e transparente dos fluxos materiais.

Internacionalmente, verifica-se que a precisão dos inventários é condição essencial para atingir os objetivos de circularidade, conforme estabelecido pelo *Inventory of Hazardous Materials* (IHM), cuja atualização contínua é exigida pelos guias do *American Bureau of Shipping*, que vinculam sua exatidão à segurança operacional e à previsibilidade financeira. O UK P&I Club (2024) complementa, relatando que inconsistências nesses inventários explicam atrasos e disputas em projetos de desmonte *onshore*, recomendando inspeções presenciais antes das operações.

Um estudo de caso asiático mostra que resíduos não identificados podem reduzir em até 12 pontos percentuais a taxa planejada de reciclagem (Shin, 2014). No Brasil, subestimativas no inventário elevam custos de limpeza e geram conflitos contratuais semelhantes aos da P-32. Diante dessas vulnerabilidades, a Resolução ANP 817/2020 exige validação prévia e atualizações constantes do inventário, recomendando também auditorias independentes e plataformas digitais para rastreamento rigoroso dos resíduos desde a fase de projeto. (D3 Consulting, 2025).

Dessa forma, lições aprendidas com o atraso da P-32, onde resíduos não inventariados geraram sobrecustos e disputas entre Petrobras e Gerdau (Teixeira; Nogueira, 2025), evidenciam que, para a P-35, o êxito dos indicadores projetados depende de um inventário robusto, verificado *in loco* e mantido dinâmico. Somente com essa base será possível garantir que as metas de reciclagem e reúso estabelecidas na fase de planejamento transformem-se em

resultados efetivos, evitando desvios operacionais e assegurando a plena aderência aos princípios da economia circular.

#### **4.5.2 Implicações para a economia circular no setor offshore brasileiro**

Os resultados obtidos para a FPSO P-35 podem ser extrapolados para se avaliar o potencial de circularidade em larga escala no descomissionamento de plataformas *offshore* no Brasil. Conforme discutido na Introdução, o país enfrenta nos próximos anos um crescimento expressivo no número de unidades a serem desativadas, fruto do envelhecimento do parque de produção e da entrada de novas instalações mais modernas.

Só a Petrobras planeja desativar 26 unidades até 2027 e outras 27 unidades entre 2028-2029, totalizando 53 plataformas em horizonte de menos de uma década (Brazil Energy Insight, 2023). Isso inclui várias FPSOs de grande porte (como as do campo de Marlim, a exemplo da própria P-35, P-33, P-37, etc.) e plataformas fixas e semi-submersíveis em diversas bacias.

Com isso, o volume de materiais envolvido será enorme: projeta-se a destinação de mais de 650 mil toneladas de aço para reciclagem até 2030 apenas com esses descomissionamentos programados (Brazil Energy Insight, 2023). Em outras palavras, a quantidade de sucata ferrosa proveniente das plataformas *offshore* poderá superar meio milhão de toneladas em poucos anos, representando uma fonte significativa de matéria-prima secundária para a indústria siderúrgica nacional.

Esse cenário traz oportunidades e desafios para o mercado nacional de reciclagem de sucata e de gestão de resíduos industriais. Do lado das oportunidades, a disponibilidade de um grande volume de aço sucateado pode impulsionar a economia circular do aço no Brasil, reduzindo a necessidade de produção primária a partir de minério de ferro e economizando energia e emissões. Assim, a entrada desse material no ciclo produtivo pode contribuir para as metas de descarbonização da indústria de siderurgia.



Um levantamento do governo estimou que o descomissionamento de plataformas deve mobilizar cerca de R\$ 70,2 bilhões em investimentos até 2029, (ANP, 2025). Grande parte desse montante retorna à economia local, especialmente se as atividades forem realizadas por empresas e estaleiros nacionais. Trata-se, portanto, de uma janela para desenvolver uma indústria de reciclagem naval robusta no Brasil.

Entretanto, materializar esses benefícios requer superar desafios estruturais atualmente presentes. Um dos principais gargalos identificados é a capacidade limitada da infraestrutura portuária e industrial para atender a múltiplos dismantelamentos em paralelo. Estudos da Fundação Getúlio Vargas (FGV) Energia (2024) e análises da ANP apontam que os estaleiros brasileiros ainda carecem de diques secos, pátios impermeabilizados e equipamentos de içamento adequados para receber e desmontar cascos de grande porte.

Além disso, as exigências regulatórias brasileiras para licenciamento ambiental de projetos de descomissionamento são complexas. A ANP, o Ibama e a Marinha do Brasil requerem apresentação de Programa de Descomissionamento (PDI) único, que deve justificar decisões sobre remoção total, parcial ou permanência *in situ* com base em critérios técnicos, ambientais, sociais, de segurança e econômico (ANP, 2020b).

Essa lógica aumenta o tempo e o custo da liberação, pois envolve múltiplos órgãos reguladores, exigência de Estudos de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) e análise técnica detalhada da viabilidade das alternativas propostas. Para tornar o licenciamento mais ágil e fundamentar as escolhas em métricas objetivas, recomenda-se que seja incorporado nos PDIs dos descomissionamento um painel de indicadores de circularidade calculado a partir do inventário obrigatório previsto na Resolução ANP 817/2020.

Pesquisas setoriais e acadêmicas evidenciam que a ausência de critérios padronizados para avaliação da circularidade e da sustentabilidade no descomissionamento offshore dificulta a comparabilidade entre projetos e prolonga os processos de análise ambiental e decisória no Brasil (FGV Energia, 2024). Por outro lado, estudos internacionais indicam que o uso de indicadores claros e metodologias estruturadas fortalece a governança e a transparência das

decisões, permitindo comparar alternativas de rota sob as dimensões ambiental, econômica e social (Capobianco et al., 2022; Vidal et al., 2022).

Recomenda-se, portanto, o desenvolvimento de guias nacionais de boas práticas e indicadores padronizados, inspirados em referenciais internacionais, como a norma ISO 30000:2009, que estabelece requisitos para sistemas de gestão ambientalmente seguros em instalações de reciclagem de navios, podendo servir de base metodológica para a reciclagem de plataformas offshore no contexto brasileiro (ISO, 2009). Há também espaço para instrumentos de mercado verde, por exemplo, projetos de desmantelamento que alcancem altas taxas de reutilização e reciclagem poderiam acessar créditos de carbono ou títulos verdes, valorizando financeiramente a economia circular no setor de petróleo. Iniciativas para desenvolver mercados de equipamentos usados complementam esse esforço regulatório, pois ampliam as possibilidades de reúso efetivo de componentes. Atualmente, grande parte dos equipamentos removidos acaba destinada à sucata por falta de compradores ou de confiança na sua reaplicação. Para mudar esse quadro, é preciso dar transparência e liquidez a um mercado secundário de equipamentos petrolíferos.

No Brasil, estudos sobre desempenho sustentável de descomissionamento indicam que a inexistência de um cadastro público de componentes recuperáveis dificulta replicar tais ganhos (Capobianco *et al.*, 2022). A criação de um banco nacional, coordenado por IBP ou ANP, poderia acelerar a redistribuição de ativos da FPSO P-35 para outros campos, reduzindo custos e emissões sem comprometer a segurança (Vidal *et al.*, 2022). Esse encaminhamento encontra respaldo na Resolução ANP nº 817/2020, que já exige inventário detalhado de bens e permite sua alienação condicionada à aprovação do órgão regulador (ANP, 2020b).

O conceito de economia circular aplica-se também à etapa pós-remoção. O manual da *Norwegian Oil & Gas* reforça que planos de monitoramento ambiental devem se estender por décadas, contemplando inspeções ROV e eventual retirada tardia de sucata que represente risco ecológico (NOROG, 2020). No Brasil, a própria Resolução ANP 817/2020 exige que o Plano de Monitoramento seja submetido à ANP, IBAMA e Marinha, assegurando continuidade de supervisão (ANP, 2020b).

Projetando-se os resultados obtidos na P-35 para as plataformas previstas para desativação, pode ser gerado um mercado de desmontagem sustentável que pode movimentar milhares de empregos e fomentar inovação local (Capobianco *et al.*, 2022). Ao alinhar tais metas às agendas da ONU e às diretrizes ISO para economia circular, o setor *offshore* nacional não só reduz a pressão sobre recursos naturais, como posiciona o país como referência em gestão de materiais no fim do ciclo de vida de ativos complexos (OEUK, 2023).

Esse caminho demanda planejamento integrado, investimentos em infraestrutura de tratamento e uma governança baseada em indicadores e metas claras. Com respaldo científico e regulatório, a transição para modelos circulares no descomissionamento *offshore* deixa de ser visão distante e passa a compor uma estratégia concreta de desenvolvimento sustentável para o Brasil.

## 5. CONCLUSÃO

Esta dissertação teve como objetivo geral propor um modelo de aplicação de indicadores de economia circular na fase de descomissionamento de plataformas *offshore* na indústria de óleo e gás, visando identificar barreiras e oportunidades para facilitar a adoção de práticas sustentáveis nessa etapa do ciclo de vida das instalações. Para alcançar este propósito, foram definidos cinco objetivos específicos que orientaram o desenvolvimento da pesquisa.

O problema de pesquisa explorado está relacionado com a deficiência e falta de padronização de ferramentas que quantifiquem os benefícios da economia circular no descomissionamento *offshore*, embora o marco regulatório brasileiro exija Programas de Descomissionamento de Instalações (PDI) com alternativas técnicas, ambientais e econômicas. Essa lacuna vinha dificultando a avaliação sistemática das práticas sustentáveis, comparações consistentes e a tomada de decisão baseada em evidências.

O primeiro objetivo específico, de identificar e mapear os indicadores de circularidade disponíveis na literatura, foi atendido por meio da revisão bibliográfica sistemática. A pesquisa demonstrou a existência de diversos indicadores e *frameworks* aplicáveis ao setor de óleo e gás, permitindo não apenas compreender o estado da arte, mas também identificar àqueles com maior potencial de aplicação ao contexto do descomissionamento *offshore* como, por exemplo, a ISO 59020:2024, os *Circular Transition Indicators* (CTI) do WBCSD, o padrão de reporte europeu ESRS E5, e as normas técnicas europeias EN 13440 e EN 13439. Dessa forma, este mapeamento forneceu a base teórica necessária para as etapas subsequentes da pesquisa.

Quanto ao segundo objetivo específico, de selecionar os indicadores de circularidade mais adequados para a fase de descomissionamento de plataformas *offshore*, este resultou na escolha de quatro indicadores específicos para medir o fluxo de materiais: taxa de reúso (TR), taxa de reciclagem (TRec), taxa de valorização energética (TVE) e taxa de perda/disposição final (TP). Esses indicadores selecionados se alinham aos relatórios de organizações setoriais (IPIECA; Energy Institute), aos módulos de fluxo do CTI e às categorias de gestão de resíduos do ESRS E5, buscando compatibilidade com padrões

internacionais de reporte e permitindo a comparação de diferentes estratégias de circularidade em bases equivalentes.

O terceiro objetivo específico foi concretizado com o desenvolvimento de um *framework* metodológico para simular diferentes cenários de descomissionamento de plataformas *offshore*. A estruturação desses cenários considerou basicamente três frentes: (i) análise das rotas de destinação propostas no PDI da FPSO P-35; (ii) revisão de literatura sobre melhores práticas internacionais de descomissionamento *offshore*; e (iii) análise de viabilidade técnica considerando as características dos materiais e equipamentos inventariados no PDI. Com essa base, foram modeladas três abordagens comparáveis: desmonte completo, extensão de vida útil da plataforma e reúso parcial dos equipamentos combinado ao desmonte. Em cada cenário, foram aplicados os indicadores de circularidade selecionados, permitindo comparar estratégias lineares com opções de diferentes graus de circularidade, fornecendo subsídios objetivos para discussão técnica e tomada de decisão.

O quarto objetivo específico, consistiu na aplicação do modelo proposto ao caso real da FPSO P-35. Os resultados obtidos demonstraram que embora os cenários apresentem índices de circularidade totais próximos (96% a 99,5%), eles diferem na distribuição entre reúso e reciclagem. O cenário de desmonte completo apresenta maior taxa de reciclagem (95%), enquanto o cenário de extensão de vida útil prioriza o reúso (85%). Já no cenário intermediário de reaproveitamento parcial com desmonte há um maior equilíbrio entre o reúso (20%) e a reciclagem (75%). Essas variações refletem filosofias distintas de gestão de fim de vida de plataformas e diferentes potenciais de captura de valor econômico, ambiental e social.

Em relação ao quinto objetivo específico, as principais barreiras identificadas incluem aspectos regulatórios, logísticos, normativos e comerciais que atualmente restringem iniciativas de reaproveitamento/reúso. Por outro lado, foram mapeadas oportunidades como a criação de cadastros de componentes reaproveitáveis, o desenvolvimento de uma cadeia nacional de desmontagem e o alinhamento dos processos com requisitos normativos e políticas públicas. Em relação a esse último aspecto, a convergência entre as políticas nacionais (PNRS e PNEC), a resolução da agência reguladora (ANP nº 817/2020),

diretrizes corporativas (Política de destinação verde da Petrobras, p. ex.) e referências internacionais (padrão europeu ESRS E5, p. ex.), cria um ambiente favorável para implementar estratégias circulares no descomissionamento *offshore*. A integração de indicadores de circularidade nos Programas de Descomissionamento de Instalações pode se tornar requisito de futuras revisões regulatórias.

Os resultados mostram que o modelo proposto oferece métricas objetivas e comparáveis, úteis a órgãos reguladores e empresas, suprimindo uma lacuna no contexto brasileiro. A aplicação no caso da P-35 confirma a viabilidade técnica de integrar princípios de economia circular ao descomissionamento: diferentes combinações de rotas podem gerar circularidade total similar, mas com implicações distintas para retenção de valor e redução de impactos ambientais.

Entre as limitações do estudo, destaca-se o foco nas métricas de massa, sem consideração detalhada das emissões associadas ao transporte ou outras etapas do ciclo de vida, o uso de premissas de mercado nas premissas de reúso, sem detalhamento aprofundado das barreiras econômicas e logísticas específicas, e a análise restrita a uma única plataforma, o que pode limitar a generalização dos resultados.

Por fim, os achados desta dissertação indicam que a aplicação de indicadores de economia circular pode orientar o descomissionamento *offshore* para práticas que preservam valor e reduzem impactos ambientais e sociais, aproximando o setor de óleo e gás das metas de transição energética e economia circular previstas em políticas nacionais e referências internacionais.

## 6. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Com base nos resultados e nas limitações identificadas, se propõe as seguintes recomendações para pesquisas futuras sobre economia circular aplicada ao descomissionamento *offshore*, considerando de forma integrada os aspectos ambientais, econômicos e sociais da sustentabilidade.

Primeiramente, sugere-se o desenvolvimento de estudos comparativos que apliquem a metodologia proposta a múltiplas plataformas (FPSOs, plataformas fixas, semi-submersíveis) em variados contextos operacionais. Essa abordagem permitirá identificar padrões e validar a generalização dos indicadores de circularidade. Além dos impactos ambientais (redução de resíduos e emissões evitadas) e econômicos (valores recuperados e custos evitados), recomenda-se medir também os efeitos sociais, como geração de empregos, retenção de mão de obra local e desenvolvimento de fornecedores regionais.

Em segundo lugar, a ampliação do escopo de indicadores para incluir fluxos de água e de energia, conforme proposto pelo *framework* completo do *Circular Transition Indicators* (CTI) e integre Avaliações de Ciclo de Vida (ACV) baseadas na ISO 14040/44 para mensurar impactos ambientais associados a cada estratégia de descomissionamento. Além disso, recomenda-se explorar as possibilidades abertas pelo *CTI Social Impact*, que acrescenta dimensões de justiça social e geração de empregos ao modelo original. A aplicação conjunta dessas ferramentas viabilizará análises integradas atribuindo peso equivalente a impactos ambientais, benefícios econômicos e ganhos sociais.

Terceiro, sobre a análise econômica quantitativa, podem ser desenvolvidas metodologias para valorar economicamente os materiais e equipamentos recuperados, realizar análises de custo-benefício das estratégias circulares e avaliar a viabilidade financeira de mercados especializados para componentes *offshore* remanufaturados.

Quarto, recomenda-se a pesquisa sobre regulação e governança para explorar como políticas públicas e instrumentos de governança podem incentivar ou restringir a adoção de práticas circulares. Pode ser considerados incentivos

econômicos, critérios de circularidade em licenças ambientais e mecanismos de certificação para materiais reutilizados.

Finalmente, é válido investigar as interações entre circularidade material e serviços ecossistêmicos, especialmente no contexto de recifes artificiais e aproveitamento *in situ* de estruturas submarinas. Desenvolvendo metodologias para quantificar e comparar diferentes formas de valor (econômico, ambiental e social) a fim de apoiar análises mais holísticas de sustentabilidade.

Essas recomendações buscam contribuir para o avanço do conhecimento científico e apoiar a construção de práticas sustentáveis no setor de óleo e gás, em consonância com os objetivos de transição energética e economia circular previstos nas políticas e referências normativas nacionais e internacionais.



## REFERÊNCIAS

ADEBAYO, Yetunde Adenike; IKEVUJE, Augusta Heavens; KWAKYE, Jephtha Mensah; ESIRI, Andrew Emuobosa. Circular economy practices in the oil and gas industry: a business perspective on sustainable resource management. **GSC Advanced Research and Reviews**, Jalgaon, v. 20, n. 3, p. 267-285, set. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Descomissionamento. Perguntas Frequentes – Agente Econômico**. Portal Gov.br, Brasília, 04 set. 2020a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/aceso-a-informacao/perguntas-frequentes/agente-economico/descomissionamento>. Acesso em: 30 jul. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS- ANP. **Resolução nº 817, de 24 abr. 2020**. Dispõe sobre o descomissionamento de instalações de exploração e produção de petróleo e gás natural. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 27 abr. 2020b. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2020/abril&item=ranp-817-2020>. Acesso em: 10 jul. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Caderno de Descomissionamento de Instalações Offshore**. Rio de Janeiro: ANP, 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/livros-e-revistas/arquivos/cadernodedescomissionamento.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Resolução nº 854, de 27 de setembro de 2021**. Regulamenta os procedimentos para apresentação de garantias financeiras para descomissionamento de instalações de exploração e produção de petróleo e gás natural. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 29 set. 2021b.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Descomissionamento offshore no Brasil: caderno**. Rio de Janeiro: ANP, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/livros-e-revistas/arquivos/cadernodedescomissionamento.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Painel Dinâmico de Descomissionamento de Instalações de Exploração e Produção**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-dinamicos-sobre-exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/painel-dinamico-de-descomissionamento-de-instalacoes-de-exploracao-e-producao>. Acesso em: 7 ago. 2025.

AGÊNCIA PETROBRAS. **Plataforma P-32 da Petrobras chega ao Estaleiro Rio Grande para destinação sustentável**. Rio de Janeiro, 14 dez. 2023. Disponível: <https://agencia.petrobras.com.br/w/plataforma-p-32-da-petrobras->

[chega-ao-estaleiro-rio-grande-para-destinacao-sustentavel](#). Acesso em: 29 jul. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 10.004:2004 – Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

BAGUR-FEMENÍAS, Llorenç; PERRAMON, Jordi; ALONSO-ALMEIDA, Maria Del Mar; LLACH, Josep. Empirical evidence of organizational transformation: the subsequent consequence of the causal relationship between the adoption of circular economy strategies and their performance. **Heliyon**, London, v. 10, n. 12, e32987, jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32987>. Acesso em: 22 jul. 2025.

BOCKEN, N. M. P.; DE PAUW, I.; BAKKER, C.; VAN DER GRINTEN, B. Product design and business model strategies for a circular economy. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 33, n. 5, p. 308-320, 2016.

BRASIL. CONAMA. **Resolução nº 01, de 23 de janeiro de 1986**. Dispõe sobre critérios e diretrizes para a avaliação de impacto ambiental. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br>. Acesso em: 18 abr. 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. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. **Decreto nº 12.082, de 17 de abril de 2024**. Institui a Estratégia Nacional de Economia Circular – ENEC, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 75, p. 8-10, 18 abr. 2024.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **Plano Nacional de Economia Circular - PNEC**. Brasília: MDIC, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/enec/plano-nacional>. Acesso em: 30 jul. 2025.

BRAZIL ENERGY INSIGHT. **Petrobras launches tender for sustainable decommissioning of FPSOs: forecast to deactivate 26 units by 2027 and 27 in 2028–2029 with allocation of more than 650 000 tons of steel to recycling**. Brazil Energy Insight, set. 2023.

BRILL. Decommissioning of Offshore Installations. In: **Marine Scientific Research and Governance**. Leiden: Brill, 2018

BUENO, V. L. R. DE C.; CORDONI JÚNIOR, L.; MESAS, A. E.. Desenvolvimento de indicadores para avaliação de serviço público de odontologia. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 16, n. 7, p. 3069–3082, jul. 2011.

BULL, A. S.; LOVE, M. S. Worldwide oil and gas platform decommissioning: a review of practices and reeving options. **Ocean & Coastal Management**, v. 168, p. 274-306, 2019.

BUREAU OF SAFETY AND ENVIRONMENTAL ENFORCEMENT – BSEE. **PEIS for Oil & Gas Decommissioning Activities on the POCS A-1**. Appendix A: Site Clearance. 2023.

CAPOBIANCO, N.; BASILE, V.; LOIA, F.; VONA, R. End-of-life management of oil and gas *offshore* platforms: challenges and opportunities for sustainable decommissioning. **Sinergie – Italian Journal of Management**, v.40, n.1, p.77–97, 2022.

CAPOBIANCO, N.; BASILE, V.; LOIA, F.; VONA, R. Toward a sustainable decommissioning of *offshore* platforms in the oil and gas industry: A PESTLE analysis. **Sustainability**, v. 13, n. 11, 6266, 2021.

CHANDLER, J. P.; PATERSON, M. L.; MACHIN, R.; TATTERSALL, R. **Offshore Decommissioning and Artificial Reefs: Environmental and Policy Considerations**. North Sea Forum Report, 2017.

CLIMATE AND POLLUTION AGENCY. **Decommissioning of offshore installations**. Relatório TA-2643/2010. Oslo: Climate and Pollution Agency, 2011. Disponível em: <https://www.sodir.no/491ed6/globalassets/1-sodir/publikasjoner/rapporter-en/endelig-avvikling-rapport-engelsk.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2025.

COMISSÃO EUROPEIA – JOINT RESEARCH CENTRE. **Defining low-carbon emissions steel: A comparative analysis of blast furnace and scrap-based EAF routes**. Luxembourg, 2025.

CORONA, B. et al. Towards sustainable development through the circular economy – A review and critical assessment on current circularity metrics. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 151, p. 104498, 2019.

COSTA, L.; SCUR, G.; *et al.* Desafios das ferramentas de avaliação da economia circular no nível micro: uma exploração bibliométrica e revisão sistemática. **Revista de Administração de Empresas**, v.65, n.4, 2025.

COUTO, Luiz Mario Marques. **Descomissionamento de plataformas offshore**. LinkedIn, 15 fev. 2025. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/descomissionamento-de-plataformas-offshore-luiz-mario-marques-couto-xog1f>. Acesso em: 19 jul. 2025.

D'AMATO, D.; DROSTE, N.; ALLEN, B.; KETTUNEN, M.; LÄHTINEN, K.; KORHONEN, J.; LESKINEN, P.; MATTHIES, B. D.; TOPPINEN, A. Green, circular, bio economy: a comparative analysis of sustainability avenues. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 716-734, 2017.

DNV. **DNV supports world-first large-scale testing of submerged CO<sub>2</sub> pipelines**. Oslo, 30 nov. 2021. Disponível em: <https://www.dnv.com/news/dnv-supports-world-first-large-scale-testing-of-submerged-co2-pipelines-213273/>. Acesso em: 19 jul. 2025.

DOF SUBSEA. **DOF Subsea achieves 99 % recycle / repurpose rate on latest decommissioning project**. Oilfield Technology, 7 abr. 2022. Disponível

em: <https://www.oilfieldtechnology.com/offshore-and-subsea/07042022/dof-subsea-achieves-99-recyclerepurpose-rate-on-latest-decommissioning-project/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

DRÄGER, P. et al. Measuring circularity: evaluation of the circularity of construction products using the ÖKOBAUDAT database. **Environmental Sciences Europe**, v. 34, n. 13, 2022.

EASAC – European Academies' Science Advisory Council. **Indicators for a circular economy**. Halle (Saale): EASAC Secretariat, 2016.

ECO STARTUP. **Guia para a Economia Circular. Ecosimulador – Eco Startup**, 2023. Disponível em: <https://simulador.ecostartup.pt/wp-content/uploads/2023/02/Guia-Economia-Circular.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2025.

ELKINGTON, J. ***Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business***. Oxford: Capstone, 1997.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy: an economic and business rationale for an accelerated transition**. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2013.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circularity indicators: an approach to measuring circularity**. Cowes: EMF, 2019. Disponível em: <https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/77e62bc9924c20d0/original/Circularity-Indicators-Methodology.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circulytics Methodology**. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2024. **Circulytics: Mapping to ESRS E5**. 2024. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circulytics-esrs>. Acesso em: 6 jun. 2025.

ELLWANGER, M.; VIEIRA, F.; PEREIRA, L. C. Regulations and Cost Estimation for the Decommissioning of Offshore Fixed Platforms in Brazil. **International Journal of Civil & Environmental Engineering – IJCEE-IJENS**, v. 22, n. 3, p. 24-31, 2022.

ENERGY INSTITUTE; IPIECA. **EI – Energy Institute; IPIECA. Circular economy indicators in the oil & gas industry**. London: Energy Institute/IPIECA, 2024. Disponível em: <https://publishing.energyinst.org/topics/sustainability/circular-economy-indicators-in-the-oil-and-gas-industry>. Acesso em: 18 jul. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. **A new Circular Economy Action Plan: for a cleaner and more competitive Europe**. Communication COM(2020) 98 final. Brussels, 2020. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52020DC0098>. Acesso em: 18 jul. 2025.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 13440:2003** – Packaging – Rate of recycling – Definition and method of calculation. Brussels, 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 13439:2004** - Packaging — Rate of energy recovery — Definition and method of calculation. Brussels: CEN, 2004. 11 p.

FALKENBERG, Christof; SCHNEEBERGER, Carina; PÖCHTRAGER, Siegfried. Is sustainability reporting promoting a circular economy? Analysis of companies' sustainability reports in the agri-food sector in the scope of corporate sustainability reporting directive and EU taxonomy regulation. **Sustainability**, v. 15, n. 9, p. 7498, 2023.

FERRER-SERRANO, M.; SALESA, A. Revisiting the Circular Economy Paradox: a Triple Bottom Line Perspective. **Sustainable Development**. (no prelo), 2025.

FOWLER, A. M.; JONES, D. O. B.; REED, A. J.; *et al.* Decommissioning of *offshore* oil and gas structures – Environmental opportunities and challenges. **Science of The Total Environment**, v.658, p.973–981, 2019.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS - FGV. **Descomissionamento offshore no Brasil – perspectivas e alternativas para um futuro**. Rio de Janeiro: FGV Energia, 2024. Disponível em: [https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno\\_descomissionamento\\_offshore\\_final.pdf](https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_descomissionamento_offshore_final.pdf). Acesso em: 19 jul. 2025.

GEISSDOERFER, Martin; SAVAGET, Paulo; BOCKEN, Nancy M. P.; HULTINK, Erik J. The Circular Economy – a new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757-768, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, v.114, p.11–32, 2016.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GLOBAL REPORTING INITIATIVE – GRI. **Global Sustainability Standards Board (GSSB)**. Amsterdam: GRI, 2023.

GULDMANN, E.; HUULGAARD, R. D. Barriers to circular business model innovation: a multiple-case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 243, art. 118160, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118160.

HARBOUR ENERGY. **UK Decommissioning**. London, 2023. Disponível em: <https://www.harbouenergy.com/what-we-do/uk/decommissioning/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

HUMAN RIGHTS WATCH. **Trading Lives for Profit**: How the Shipping Industry Circumvents Regulations to Scrap Toxic Ships in Bangladesh. Nova York: HRW, 2023. Disponível em: <https://www.hrw.org/report/2023/09/28/trading-lives-profit>. Acesso em: 7 ago. 2025.

IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis). **Regulação do Descomissionamento e seus Impactos para a Competitividade do Upstream no Brasil**. Rio de Janeiro: IBP, 2017.

IGE, Oluwafemi Ezekiel; OLANREWAJU, Oludolapo A.; DUFFY, Kevin J.; OBIORA, Collins. A review of the effectiveness of Life Cycle Assessment for gauging environmental impacts from cement production. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 334, art. 130270, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129213.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Mapas de projetos em licenciamento – complexos eólicos offshore**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/mapas-de-projetos-em-licenciamento-complexos-eolicos-offshore>. Acesso em: 19 jul. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Processo IBAMA nº 02022.000479/2016 – Licenciamento Ambiental do Descomissionamento do Campo de Marlim/Voador**. Brasília: IBAMA, 2022.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). **Guidelines and Standards for the Removal of Offshore Installations and Structures on the Continental Shelf and in the Exclusive Economic Zone** (Resolution A.672(16)). 1989. Disponível em: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.672\(16\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.672(16).pdf). Acesso em: 19 jul. 2025.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF OIL & GAS PRODUCERS – IOGP. **Overview of International Offshore Decommissioning Regulations – Volume 2: Wells Plugging & Abandonment**. Londres, 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040:2006 – Environmental management — life cycle assessment — principles and framework**. Geneva: International Organization for Standardization, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044:2006 – Environmental management — life cycle assessment — requirements and guidelines**. Geneva: International Organization for Standardization, 2006b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 30000:2009 – Ship recycling management systems: specifications with guidance for use**. Geneva: ISO, 2009.



INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.

**ISO 45001:2018** – Occupational Health and Safety Management Systems – Requirements with guidance for use. 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO**

**59004:2024** – Circular economy — vocabulary, principles and guidance for implementation. Geneva: International Organization for Standardization, 2024a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO**

**59010:2024** – Circular economy — guidance on the transition of business models and value networks. Geneva: International Organization for Standardization, 2024b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.

**ISO 59020:2024 (E)** – Circular economy — Measuring circularity *framework*. Geneva: International Organization for Standardization, 2024c.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO**

**14075:2024**. Environmental management — Principles and framework for social life cycle assessment. 1. ed. Geneva: International Organization for Standardization, 2024c.

JAHN, F.; COOK, M.; GRAHAM, M. **Hydrocarbon exploration and production**. 2 ed. Oxford: Elsevier, 2008.

JORNAL PORTUÁRIO. **Indústria aponta gargalos e vê São Paulo como chave para avanço do setor de petróleo e gás**. Santos, 26 jun. 2025.

Disponível em: <https://jornalportuario.com/noticia/31886/industria-aponta-gargalos-e-ve-sao-paulo-como-chave-para-avanco-do-setor-de-petroleo-e-gas>. Acesso em: 19 jul. 2025.

JPT. **Petrobras Decommissions, works to recycle FPSO vessel**. Journal of Petroleum Technology, 28 nov. 2023. Disponível em:

<https://jpt.spe.org/petrobras-decommissions-works-to-recycle-fpso-vessel>. Acesso em: 17 jul. 2025.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Barriers to the Circular Economy: Evidence from the European Union (EU). **Ecological Economics**, v.150, p.264–272, 2018.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 221-232, 2017.

LAU, P. J.; NG, W. P. Q.; SHEN, H. B.; LIM, C. H.; CHUAH, K. H. Paving-a-way toward circular economy for oil and gas industry: a conceptual modelling of re-refining process through solvent extraction and hydrofinishing pathway. **Journal of Cleaner Production**, v.380, p.134839, 2022.

LEPIC, Bojan. **Petrobras plans to decommission 68 platforms and reuse three FPSOs**. Splash247, 9 maio 2025. Disponível em:

<https://splash247.com/petrobras-plans-to-decommission-68-platforms-and-reuse-three-fpsos/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

LEPORINI, M.; MARCHETTI, B.; CORVARO, F.; POLONARA, F. Reconversion of *offshore* oil and gas platforms into renewable energy sites: Assessment of different scenarios. **Renewable Energy**, v.135, p.1121–1132, 2019.

LI, Y.; HU, Z. A review of multi-attributes decision-making models for offshore oil and gas facilities decommissioning. **Journal of Ocean Engineering and Science**, v. 7, n. 1, p. 58-74, 2022.

MANGLA, S. K.; YADAV, G.; BHATTACHARYA, A.; LUTHRA, S. Exploring indicators of circular economy adoption *framework* through a hybrid decision support approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, 124186, 2020.

MARCHETTI, B.; CORVARO, F.; ROSSI, M. Energy implications and environmental analysis of oil rigs decommissioning options using LCA methodology. **Energies**, v. 18, n. 13, art. 3372, 2025.

MARQUES, M.; BLAIR, M.; BITITCI, U. S.; HANIFF, A. P. Reusing & Recycling Decommissioned Materials: Is the Glass Half Full or Half Empty?. **Offshore Engineer Magazine**, Nov./Dec. 2021.

MASTERSON, Victoria. What to do with ageing oil and gas platforms – and why it matters. **World Economic Forum**, 2 abr. 2024. Disponível em: <https://www.weforum.org/stories/2024/04/decommissioning-oil-and-gas-platforms/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

MCDONOUGH, William; BRAUNGART, Michael. **Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things**. 1. ed. New York: North Point Press, 2010.

MONTENEGRO, João. **Descomissionamento offshore: desafios e oportunidades**. Rio de Janeiro: Instituto de Estudos Estratégicos de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – INEEP, 31 jan. 2022. Disponível em: <https://ineep.org.br/descomissionamento-offshore-desafios-e-oportunidades/>. Acesso em: 23 jul. 2025.

MORAGA, G.; HUYSVELD, S.; MATHIEUX, F.; BLENGINI, G. A.; ALAERTS, L.; VAN ACKER, K.; DE MEESTER, S.; DEWULF, J. Circular economy indicators: what do they measure?. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, p. 452-461, 2019. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.03.045.

MURRAY, A.; SKENE, K.; HAYNES, K. The circular economy: an interdisciplinary exploration. **Journal of Business Ethics**, v. 140, n. 3, p. 369-380, 2017.

NAPPO, Alfonso. **Integrating circular economy practices in oil & gas decommissioning: a practical framework**. 2023. Dissertação (Mestrado em Strategic Management) – Libera Università Internazionale degli Studi Sociali Guido Carli (Luiss), Roma, 2023. Disponível em: [https://tesi.luiss.it/38891/1/748891\\_NAPPO\\_ALFONSO.pdf](https://tesi.luiss.it/38891/1/748891_NAPPO_ALFONSO.pdf). Acesso em: 7 ago. 2025.



NEXSTEP. **Re-use & Decommissioning report 2024: responsible decommissioning**. Haia, 2024. Disponível em: <https://www.nexstep.nl/re-use-decommissioning-report-2024-responsible-decommissioning/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

NGO SHIPBREAKING PLATFORM. **Press Release – Platform publishes list of ships dismantled worldwide, in 2016**. Bruxelas, 01 fev. 2017. Disponível em: <https://shipbreakingplatform.org/press-release-platform-publishes-list-of-ships-dismantled-worldwide-in-2016-2/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

NGO SHIPBREAKING PLATFORM. **Press Release – Platform publishes list of ships dismantled worldwide in 2022**. Bruxelas, 01 fev. 2023a. Disponível em: <https://shipbreakingplatform.org/platform-publishes-list-2022/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

NGO SHIPBREAKING PLATFORM. **Press Release – Petrobras to recycle offshore unit in Brazil for the first time**. Bruxelas, 10 jul. 2023b. Disponível em: <https://shipbreakingplatform.org/petrobras-recycling-offthebeach-brazil/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

NGO SHIPBREAKING PLATFORM. **Press Release – Platform publishes list of ships dismantled worldwide in 2024**. Bruxelas, 03 fev. 2025a. Disponível em: <https://shipbreakingplatform.org/platform-publishes-list-2024/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

NICKERSON, Jackson A.; ZENGER, Todd R. **Being efficiently fickle: a dynamic theory of organizational choice**. *Organization Science*, v. 24, n. 4, p. 1083-1101, 2013.

NIKANOROVA, M.; IMONIANA, J. O.; STANKEVICIENE, J. Analysis of social dimension and well-being in the context of circular economy. **International Journal of Global Warming**, v.21, n.3, p.299–315, 2020.

NORTH SEA TRANSITION AUTHORITY – NSTA. **UKCS Decommissioning Cost and Performance Report 2023 e Cost Estimate 2025**. 2025.

NORWEGIAN OIL AND GAS ASSOCIATION - NOROG. **Impact assessment for offshore decommissioning**: decommissioning and final disposal of redundant *offshore* oil and gas facilities. Rev. 1. Sandnes: Norwegian Oil and Gas Association, 2020. 51 p. Disponível em: [https://www.offshorenorge.no/contentassets/d7bfa8b2f6874235a1e0dc0719b7250a/handbook-decom-ia-rev-1-2\\_final.pdf](https://www.offshorenorge.no/contentassets/d7bfa8b2f6874235a1e0dc0719b7250a/handbook-decom-ia-rev-1-2_final.pdf). Acesso em: 30 jul. 2025.

NORWEGIAN PETROLEUM. **Cessation and decommissioning**. Oslo: Ministry of Energy, 2025. Disponível em: <https://www.norskpetroleum.no/en/developments-and-operations/cessation-and-decommissioning/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

OEUK. A decade of decommissioning: **UK offshore industry to spend £16.6 billion recovering 1.2 m tonnes of disused oil and gas installations from the North Sea for reuse and recycling**. *Offshore Energies UK*, 23 nov. 2021a. Disponível em: <https://oeuk.org.uk/a-decade-of->

[decommissioning-uk-offshore-industry-to-spend-16-6-billion-recovering-1-2m-tonnes-of-disused-oil-and-gas-installations-from-the-north-sea-for-reuse-and-recycling/](#). Acesso em: 17 jul. 2025.

OEUK. **Decommissioning Insight 2023**. Aberdeen: *Offshore* Energies UK, 2023. Disponível em: <https://oeuk.org.uk/decommissioning/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

OEUK. **Decommissioning Insight 2021**. London: *Offshore* Energies UK, 2021b. Disponível em: <https://stories.oeuk.org.uk/DecommissioningInsightReport2021/index.html>. Acesso em: 19 jul. 2025.

OEUK. **Offshore Decommissioning Report 2024**. Aberdeen, 2024. Disponível em: <https://oeuk.org.uk/product/decommissioning-report-2024/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

OFFSHORE ENERGY. **The largest single UK decommissioning job to date goes to**. Pioneering Spirit. 2022. Disponível em: <https://www.offshore-energy.biz/the-largest-single-uk-decom-job-to-date-goes-to-pioneering-spirit/>. Acesso em: 24 jul. 2025.

OFFSHORE MAGAZINE. **Yme platform in place at North Sea location**. *Offshore* Magazine, 19 jan. 2021. Disponível em: <https://www.offshore-mag.com/field-development/article/14195786/yme-drilling-and-production-platform-in-place-at-norwegian-north-sea-location>. Acesso em: 29 jul. 2025.

OGUK – *Offshore* Energies UK. **Decommissioning Insight 2021**. Londres, 2021. Disponível em: <https://stories.oeuk.org.uk/DecommissioningInsightReport2021/index.html>. Acesso em: 29 jul. 2025.

OKUMUS, D.; ANDREWS, E.; GUNBEYAZ, S. A. Developing circularity metrics for the maritime industry: a stakeholder-focused study. **Ocean Engineering**, v. 312, Pt. 2, art. 119158, 2024. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.119158.

OLIVEIRA, B. **Desfazendo Mitos sobre a Atuação do Órgão Ambiental**. Seminário IBP “Regulação do Descomissionamento e seus Impactos”, Rio de Janeiro, 2017.

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). **Business Models for the Circular Economy**: Opportunities and Challenges for Policy. Paris: OECD, 2019. DOI: 10.1787/g2g9dd62-en

OSPAR COMMISSION. **Assessment of impacts of the offshore oil and gas industry on the marine environment (QSR 2023)**. Londres: OSPAR, 2023. Disponível em: <https://oap.OSPAR.org>. Acesso em: 24 jul. 2025.

OSPAR COMMISSION. **Decision 98/3 on the disposal of disused offshore installations**. London: OSPAR, 1998.

PARTRIDGE, Tristan; BARANDIARAN, Javiera; TRIOZZI, Nick; VALTIERRA, Vanessa T. Decommissioning: another critical challenge for energy transitions. **Global Social Challenges Journal**, v.2, n.2, p.188–202, 2023.

PETROBRAS. **Petrobras usará descomissionamento de plataformas como modelo de destinação verde**. Agência Petrobras, 26 jan. 2023a. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/petrobras-usara-descomissionamento-de-plataformas-como-modelo-de-destinacao-verde>. Acesso em: 17 jul. 2025.

PETROBRAS. **Programa de Descomissionamento de Instalações – FPSO P-35 (Campo de Marlim)**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2023b. Disponível em: [https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional/arq/ppdi/pdi-fpso-p-35\\_tarjado-parte-1.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional/arq/ppdi/pdi-fpso-p-35_tarjado-parte-1.pdf?utm_source=chatgpt.com). Acesso em: 17 jul. 2025.

PETROBRAS. **Plano Estratégico 2024-2028**. Rio de Janeiro, 2023c. Disponível em: [https://static.poder360.com.br/2023/12/Plano-Estrategico-Petrobras-2024-2028.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://static.poder360.com.br/2023/12/Plano-Estrategico-Petrobras-2024-2028.pdf?utm_source=chatgpt.com). Acesso em: 17 jul. 2025.

PETROBRAS. **Plano de Negócios 2025-2029 (PN 2025-29): visão geral**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2024. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/negocio/petrobras-lanca-plano-de-negocios-2025-2029-com-investimentos-de-us-111-bilhoes>. Acesso em: 7 ago. 2025.

PETROBRAS. **Relatório de Sustentabilidade 2022**. Rio de Janeiro, 2023d. Disponível em: [https://www.petrobras.com.br/documents/2677942/9212067/Relatorio%20de%20Sustentabilidade%20ANSA\\_2023\\_%20ano%20base%202022\\_versao%20DE.pdf](https://www.petrobras.com.br/documents/2677942/9212067/Relatorio%20de%20Sustentabilidade%20ANSA_2023_%20ano%20base%202022_versao%20DE.pdf). Acesso em: 7 ago. 2025.

PETROBRAS. **Relatório de Sustentabilidade 2024 – Gestão de resíduos e descomissionamento sustentável**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2024. Disponível em: <https://sustentabilidade.petrobras.com.br/>. Acesso em: 7 ago. 2025.

PETROBRAS. **Petrobras investe na destinação sustentável de 26 unidades de produção marítimas de Sergipe**. Agência Petrobras, Aracaju, 14 abr. 2025. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/petrobras-investe-na-destinacao-sustentavel-de-26-unidades-de-producao-maritimas-de-sergipe>. Acesso em: 7 ago. 2025.

POSHYDON. **World's first offshore green hydrogen pilot on a working platform**. PosHYdon Official Website, 2025. Disponível em: <https://poshydon.com/en/home-en/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

PROGRAMA DE PARCERIAS DE INVESTIMENTOS – PPI. **Estudo sobre os caminhos para o avanço do licenciamento ambiental de petróleo e gás offshore no Brasil – Volume 4: Diretrizes para estudos ambientais**. Brasília: PPI, 2023. Disponível em: <https://www.ppi.gov.br/wp-content/uploads/2023/01/estudo-sobre-os-caminhos-para-o-avanco-do->

[licenciamento-ambiental-de-petroleo-e-gas-offshore-no-brasil-vol-4.pdf](#). Acesso em: 19 jul. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Resolução A/RES/70/1, adotada em 25 set. 2015. Nova Iorque: ONU, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 19 jul. 2025.

RAHMAN, M. M.; et al. Waste-to-Energy potential of petroleum refinery sludge: statistical optimization, machine learning and life-cycle cost models. **ChemEngineering**, v. 9, n. 3, p. 51, 2024.

REDA, A.; AMAECHI, C. V.; SHAHIN, M. A.; MCKEE, K. K. Field redevelopment and weight shedding for decommissioning of *offshore* facilities. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 12, n. 8, p. 1331, 2024.

REUTERS. **Como uma disputa entre Petrobras e Gerdau atrasa 1º desmonte de plataforma no Brasil**. InfoMoney, 15 abr. 2025. Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/mercados/como-uma-disputa-entre-petrobras-e-gerdau-atrasa-1o-desmonte-de-plataforma-no-brasil/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

SANTOS, S. E. M.; LIMA, A. C.; QUINTÃO, J. *Offshore* structure decommissioning model: a proposal based on costs and risk management in Brazil. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, e08531, 2024.

SÁ-SILVA, Jorge do R.; ALMEIDA, Cristóvão D.; GUINDANI, Joel F. Pesquisa documental: pistas teóricas e metodológicas. **Revista Brasileira de História & Ciências Sociais**, v. 1, n. 1, p. 1-15, 2009.

SCARPELLINI, S.; VALERO-GIL, J.; PORTILLO-TARRAGONA, P.; MÍGUEZ-GONZÁLEZ, M. I. Social impacts of a circular business model: an approach to assess the holistic dimension. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, v. 29, n. 6, p. 1707-1718, 2022.

SCHROEDER, D. M.; LOVE, M. S. Ecological and political issues surrounding decommissioning of *offshore* oil facilities in the Southern California Bight. **Ocean & Coastal Management**, v.47, n.1–2, p.21–48, 2004.

SCOTTISH ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (SEPA). **Regulation of offshore oil and gas waste**. Guidance WST-G-059, version 1. Stirling: SEPA, 2018. Disponível em: <https://www.sepa.org.uk/media/369293/wst-g-059-offshore-og-guidance.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2025.

SENAVIRATHNA, G. R. U.; GALAPPATHTHI, U. I. K.; RANJAN, M. T. T. A review of end-life management options for marine structures: State of the art, industrial voids, research gaps and strategies for sustainability. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 8, 100489, 2022.

SHARMA, M.; JOSHI, S.; PRASAD, M.; BARTWAL, S. Overcoming barriers to circular economy implementation in the oil & gas industry: Environmental and social implications. **Journal of Cleaner Production**, v.391, 2023.

SHIN, Moo Hong. **Waste Management Framework for Decommissioning of Offshore Installations in Malaysia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Tronoh: Universiti Teknologi Petronas, 2014. 112 f.

SHQAIRAT, Ala; SUNDARAKANI, Balan. An empirical study of oil and gas value chain agility in the UAE. Benchmarking: **An International Journal**, **Bradford**, v. 25, n. 9, p. 3541-3569, 2018. DOI: 10.1108/BIJ-05-2017-0090.

SINAVAL. **Momento é crucial para definição de regras para desmantelamento de embarcações e estruturas marítimas**. Rio de Janeiro, 20 set. 2024. Disponível em: <https://sinaval.org.br/2024/09/momento-e-crucial-para-definicao-de-regras-para-desmantelamento-de-embarcacoes-e-estruturas-maritimas/>. Acesso em: 19 jul. 2025.

SOUZA, R. A.; CASTRO, L. M.; PIMENTA, D. F. Offshore Structure Decommissioning Model: A Proposal Based on Costs and Risk Management in Brazil. **Journal of Offshore Engineering and Technology**, v. 18, n. 2, p. 45-58, 2024. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/383370759>. Acesso em: 19 jul. 2025.

SUSTAINABILITY ACCOUNTING STANDARDS BOARD – SASB. **SASB Standards overview: industry-based disclosures for investors**. IFRS Foundation, 2022.

SYRIAC, Robin; PRAKASH, MN Senthil. A review on the reuse possibilities of decommissioned *offshore* fixed platforms for marine renewable energy applications. **Journal of Naval Architecture and Marine Engineering**, v. 19, n. 2, p. 71-82, 2022.

TAN, Z.; PEREDO, O. M.; MISHRA, R. *Offshore* Decommissioning: Forecasting and Economic Analysis. **Journal of Petroleum Technology**, v.73, n.6, p.58–61, 2021.

TEIXEIRA, F.; NOGUEIRA, M. **Dismantling of first oil vessel in Brazil running a year late**. Reuters, Rio de Janeiro, 15 abr. 2025. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/energy/dismantling-first-oil-vessel-brazil-running-year-late-2025-04-15/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

TERPOU, A. **Applying circular economy principles in the oil & gas industry – An LCA study of the decommissioning process of offshore platforms**. Master's Thesis – Chalmers University of Technology, Suécia, 2017.

TN PETRÓLEO. **Aterro Zero: Refinaria de Mataripe conquista certificação**. 06 maio 2025. Redação TN Petróleo/Assessoria Acelen. Disponível em: <https://tnpetroleo.com.br/noticia/aterro-zero-refinaria-de-mataripe-conquista-certificacao/#:~:text=Entre%20os%20principais%20res%C3%ADduos%20que,r eaproveitamento%2C%20reciclagem%20ou%20aproveitamento%20energ%C3%A9tico>. Acesso em: 25 jul. 2025.

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO - TCU. **Acórdão n.º 898/2024 – Plenário: atuações do TCU sobre licenciamento ambiental**. Brasília: TCU, 2024. Disponível em: <https://pesquisa.apps.tcu.gov.br/documento/acordao->



[completo/%2A/NUMACORDAO%253A898%2520ANOACORDAO%253A2024%2520/DTRELEVANCIA%2520desc%252C%2520NUMACORDAOINT%2520desc/0](#). Acesso em: 19 jul. 2025.

UK P&I CLUB. **Risk Focus: Inventory of Hazardous Materials (IHM)**. 2. ed. Londres: Thomas Miller P&I, 2024. 40 p.

UPSTREAM. BW *Offshore* takes bold steps to redeploy at Tortue. **Upstream Online**, 3 jan. 2019. Disponível em: <https://www.upstreamonline.com/weekly/bw-offshore-takes-bold-steps-to-redeploy-at-tortue/2-1-495927>. Acesso em: 29 jul. 2025.

VALENCIA, S.; BOCKEN, N. M. P.; LOAIZA, P. The social contribution of the circular economy: a semisystematic review. **Journal of Cleaner Production**, v. 404, 136788, 2023.

VALEUR, J. Environmental impacts of NORM disposal – With emphasis on discharges to sea. **SPE Projects, Facilities & Construction**, v. 6, n. 3, p. 124–131, 2011.

VELENTURF, A. P. M. **Circular oil & gas decommissioning: the social, economic, technical and environmental values of North Sea oil & gas decommissioning for local communities and companies**. Leeds: University of Leeds, 2020. Relatório técnico. Disponível em: [https://decommission.net/wp-content/uploads/2023/07/circularoilandgasdecommissioningreport\\_final-1.pdf](https://decommission.net/wp-content/uploads/2023/07/circularoilandgasdecommissioningreport_final-1.pdf). Acesso em: 7 ago. 2025.

VIDAL, P. D. C. J.; GONZÁLEZ, M. O. A.; VASCONCELOS, R. M.; MELO, D. C.; FERREIRA, P. O.; SAMPAIO, P. G. V.; SILVA, D. R. Decommissioning of *offshore* oil and gas platforms: a systematic literature review of factors involved in the process. **Ocean Engineering**, v. 255, art. 111428, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111428>. Acesso em: 23 jul. 2025.

WASTE MANAGEMENT WORLD. **Brazilian Oil & Gas Firm Petrobras Underfire for Recycling Ships on Asian Beaches**. 19 jun. 2017. Disponível em: <https://waste-management-world.com/artikel/brazilian-oil-gas-firm-petrobras-underfire-for-recycling-ships-on-asian-beaches/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

WATKINS, Michael D.; PASSOW, Samuel. **Sunk Costs: The Plan to Dump the Brent Spar (A)**. Boston: Harvard Business School, 2002. (Harvard Business School Case, 9-903-010).

WATSON, S. M.; McLEAN, D. L.; BALCOM, B. J. et al. *Offshore* decommissioning horizon scan: research priorities to support decision-making activities for oil and gas infrastructure. **Science of the Total Environment**, 2023.

WEI, X.; ZHOU, J. Multi-Criteria Decision Analysis for Sustainable Oil and Gas Infrastructure Decommissioning: A Systematic Review of Criteria Involved in the Process. **Sustainability**, v. 16, n. 7205, 2024.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **Circular Transition Indicators v4.0: Metrics for business, by business**. 2023. Disponível em: [https://www.wbcsd.org/wp-content/uploads/2023/09/Circular\\_Transition\\_Indicators\\_v4.pdf](https://www.wbcsd.org/wp-content/uploads/2023/09/Circular_Transition_Indicators_v4.pdf). Acesso em: 24 jul. 2025.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. **Circular Transition Indicators Social Impact guide**. Maio, 2025. Disponível em: [https://www.wbcsd.org/resources/circular-transition-indicators-cti-social-impact/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.wbcsd.org/resources/circular-transition-indicators-cti-social-impact/?utm_source=chatgpt.com). Acesso em 07 ago. 2025

YALE UNIVERSITY. **Environmental Performance Index 2024: Waste Recovery Rate**. New Haven: Yale Center for Environmental Law & Policy, 2024. Disponível em: <https://epi.yale.edu/measure/2024/WRR>. Acesso em: 24 jul. 2025.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ZANUTTIGH, B.; DALLAVALLE, E.; ZAGONARI, F. A novel *framework* for sustainable decision-making on reusing Oil & Gas *offshore* platforms with application to the Adriatic Sea. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 2025.