



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

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Gerenciamento de Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (NORM) na Indústria de óleo e gás: uma análise baseada em matriz SWOT

Misael Santini de Freitas

Universidade Federal Fluminense (misaelsantini@id.uff.br)

Maria Eduarda Aguiar Mariano

Universidade Federal Fluminense (mariaeduardamariano@id.uff.br)

Camila Aparecida Maciel da Silveira

Universidade Federal Fluminense (camilasilveira@id.uff.br)

Denise de Castro Bertagnolli

Universidade Federal Fluminense (denisebertagnolli@id.uff.br)

Guilherme Coltri Peres Ramos

Universidade Federal Fluminense (gcpramos@id.uff.br)

Newton Narciso Pereira

Universidade Federal Fluminense (newtonpereira@id.uff.br)

Resumo

Das atividades inerentes à indústria de óleo e gás emergem Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (NORM). O gerenciamento adequado desses materiais é fundamental para evitar a contaminação dos ecossistemas e a saúde humana, muito embora ainda persistam dificuldades técnicas e regulatórias para tal manejo. Este trabalho tem como objetivo propor uma matriz SWOT, identificando forças, fraquezas, oportunidades e ameaças ao gerenciamento de resíduos de NORM no Brasil, construída a partir de um



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

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

levantamento bibliográfico qualitativo e exploratório. Os resultados contemplam as estratégias e alternativas para a gestão de NORM no Brasil, com destaque para a técnica de vitrificação. A matriz proposta identificou os principais desafios, relacionados, principalmente, à falta de local adequado para deposição desses rejeitos, mas possibilidades promissoras, como a presença de regulamentações nacionais específicas. Com esta pesquisa conclui-se que A gestão eficaz dos rejeitos NORM exige controles técnicos, marcos regulatórios sólidos, conscientização e infraestrutura adequada. As políticas nacionais específicas são essenciais diante do aumento dos volumes gerados, especialmente no setor de petróleo e gás. A falta de soluções consolidadas para disposição final reforça a necessidade de pesquisas e alternativas sustentáveis.

Palavras-chave: NORM, matriz SWOT, gestão de resíduos, alternativas, Brasil.

Abstract

From the activities inherent to the oil and gas industry, Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) emerge. Proper management of these materials is essential to prevent contamination of ecosystems and protect human health, although technical and regulatory challenges for such handling still persist. This study aims to propose a SWOT matrix, identifying the strengths, weaknesses, opportunities, and threats associated with NORM waste management in Brazil, based on a qualitative and exploratory literature review. The results include strategies and alternatives for NORM management in Brazil, with emphasis on the vitrification technique. The proposed matrix identified the main challenges, mainly related to the lack of suitable facilities for the disposal of such waste, but also promising opportunities, such as the existence of specific national regulations. This research concludes that effective NORM waste management requires technical controls, strong regulatory frameworks, awareness, and adequate infrastructure. Specific national policies are essential given the increasing waste volumes, especially in the oil and gas sector. The lack of consolidated final disposal solutions reinforces the need for further research and sustainable alternatives.

Keywords: NORM, SWOT matrix, waste management, alternatives, Brazil.

Resumen

De las actividades propias de la industria del petróleo y gas surgen los Materiales Radiactivos de Origen Natural (NORM). La gestión adecuada de estos materiales es esencial para prevenir la contaminación de los ecosistemas y proteger la salud humana, aunque aún persisten dificultades técnicas y regulatorias para su manejo. Este estudio tiene como objetivo proponer una matriz SWOT, identificando las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas en la gestión de residuos NORM en Brasil, a partir de una revisión bibliográfica cualitativa y exploratoria. Los resultados incluyen estrategias y alternativas para la gestión de NORM en Brasil, destacando la técnica de vitrificación. La matriz propuesta identificó los principales desafíos, relacionados principalmente con la falta de lugares adecuados para la disposición final de estos residuos, pero también



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

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

posibilidades prometedoras, como la existencia de reglamentaciones nacionales específicas. Este estudio concluye que la gestión eficaz de los residuos NORM requiere controles técnicos, marcos regulatorios sólidos, concienciación y una infraestructura adecuada. Las políticas nacionales específicas son esenciales ante el aumento de los volúmenes generados, especialmente en el sector del petróleo y gas. La falta de soluciones consolidadas para la disposición final refuerza la necesidad de investigaciones y alternativas sostenibles.

Palabras clave: NORM, matriz SWOT, gestión de residuos, alternativas, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

Os materiais radioativos de ocorrência natural (NORMs) são radionuclídeos amplamente distribuídos na crosta terrestre, presentes em concentrações variáveis nas formações geológicas, inclusive naquelas associadas à produção de petróleo (Le *et al.*, 2024). Do ponto de vista da proteção radiológica, elementos como urânio (U-235 e U-238), tório (Th-232), seus produtos de decaimento e potássio (K-40) são considerados os principais contribuintes para a exposição à radiação (Michalik *et al.*, 2023).

O processamento de recursos naturais pode aumentar a concentração de radionuclídeos, que são liberados no ambiente, sendo que os subprodutos gerados por esse processo, podem representar riscos à saúde humana, e são denominados materiais radioativos de ocorrência natural tecnologicamente aprimorados (TENORMs) (Ali *et al.*, 2019).

Na indústria de óleo e gás, a extração de petróleo e gás natural é frequentemente acompanhada por materiais sólidos e água de formação, que, sob certas condições, podem causar a precipitação de sais radioativos naturais que se acumulam em encanamentos e válvulas, bem como tanques de armazenamento e filtros utilizados nas cadeias produtivas (Aljuwaisri; Elsayed, 2024; IOGP, 2016).

Os resíduos de NORM gerados pela indústria de petróleo e gás podem ser gerenciados por diferentes métodos, classificados em deposição em terra, mar ou por incineração. O descarte desses resíduos deve estar em conformidade com as legislações e acordos nacionais e internacionais (Al Nabhani; Khan; Yang, 2016; Strand, 1999).



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

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Em países desenvolvidos, como Canadá e Estados Unidos, são adotadas diversas formas de gerenciamento, sendo a principal delas o uso de aterros industriais para o descarte de rejeitos NORM “*in natura*”, uma prática recomendada pela *International Atomic Energy Agency* (IAEA) (Lopes; Da Silva; Lopes, 2023).

Esses resíduos são geridos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), conforme estabelecido na norma CNEN NN 8.01/2014, que dispõe sobre a gerência de rejeitos radioativos de baixo e médio nível de radiação e define diretrizes para seu gerenciamento e descarte (CNEN, 2014), e no Brasil, ainda não existem repositórios específicos para o descarte de NORM.

Apesar da ausência de repositórios, o país possui legislação que regulamenta o descarte dos resíduos radioativos, além de estabelecer garantias para a criação desses repositórios em território nacional. Trata-se da Lei nº 10.308/2001, que atribui à CNEN a responsabilidade pela projeção, construção e instalação dos depósitos (Brasil, 2001).

Diante desse cenário, o objetivo deste artigo é mapear, através de uma revisão bibliográfica, as possíveis soluções para o gerenciamento de resíduos radioativos no Brasil, utilizando uma matriz SWOT como ferramenta de análise estratégica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com Varskog e Aamlid (2005), a origem do NORM nessa indústria se dá pela precipitação de sulfatos e carbonatos dentro de tubulações e outros equipamentos associados à produção de óleo. A presença de íons pertencentes aos elementos do Grupo II da Tabela Periódica, incluindo o rádio (Ra-226 e Ra-228), na água produzida, quando associada a variações de pressão e temperatura, pode levar à supersaturação e consequente precipitação de compostos pouco solúveis como sulfatos e carbonatos, resultando na formação de incrustações nas superfícies internas de dutos de produção, válvulas, bombas, separadores, vasos de tratamento de água, unidades de tratamento de gás e tanques de armazenamento de petróleo. A deposição desses sais ocorre preferencialmente em regiões caracterizadas por fluxos turbulentos, presença de força centrípeta e pontos de nucleação (IAEA, 2003).



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

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

As incrustações, o lodo e a areia depositados, bem como os resíduos provenientes do tratamento de água, descontaminação e descomissionamento de plataformas de petróleo são considerados oriundos da manutenção desses sistemas e, em geral, ocorrem em pequenas quantidades (Lopes; Da Silva; Lopes, 2023; Valeur, 2010). Os resíduos contendo NORM podem causar obstrução do fluxo de produção, danificar equipamentos e aumentar os custos de manutenção e substituição (Pilania; Dube, 2023).

Além disso, a mineração e o processamento de matérias-primas (por exemplo na metalurgia extrativa, no beneficiamento e fundição de minérios, nos processos de separação química e física, no tratamento de água e efluentes líquidos, bem como limpeza de gases de combustão) podem levar ao acúmulo de NORM, mesmo quando a matéria-prima ou a matéria-prima explorada não contenha quantidades substanciais de radionuclídeos (Michalik *et al.*, 2023).

A injeção de água do mar para manter a pressão do reservatório pode intensificar esse processo, aumentando a concentração de sulfato e a deposição de sais de rádio (Aljuwaisri; Elsayed, 2024). Assim, os resíduos de NORM podem ser gerados principalmente nos vasos e tubulações dos equipamentos de tratamento, como resultado da precipitação desses sais (Valeur, 2010).

O Quadro 1 sintetiza a ocorrência de NORM na indústria de óleo e gás.

Quadro 1 - Presença de NORM na indústria de óleo e gás.

Tipo	Radionuclídeos	Características	Ocorrência
Incrustações Ra	^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{224}Ra e descendência	Incrustações sólidas com depósitos de Ca, Sr, BaSO_4 e carbonatos	Partes úmidas da produção, instalações, conclusões de poços

Lama Ra	^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{224}Ra e descendências	Areia, argila, parafina e metais pesados	Separadores, tanques skimmer
Depósitos de Pb	^{210}Pb e descendências	Depósitos de chumbo estáveis	Partes molhadas da produção de gás, completação de poços
Filmes de Pb	^{210}Pb	Filmes muito finos	Tratamento e transporte de óleo e gás
Filmes de Po	^{210}Po	Filmes muito finos	Instalações de tratamento de condensados.
Condensado de gás natural	^{210}Po	Não Suportado	Produção de gás
Gás natural	^{222}Rn Pb-210, Po-210	Gás Nobre Depósitos nas superfícies	Domínio dos consumidores. Sistema de tratamento e transporte de gases
Água produzida	^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{224}Ra e/ou ^{210}Pb	Volume de água mais ou menos salina no óleo produzido	Cada instalação de produção

Fonte: IAEA (2003).

As incrustações podem obstruir o sistema de produção, exigindo o uso de inibidores para prevenção, no entanto, esses inibidores podem elevar a radioatividade da água produzida e sua absorção biológica (Aljuwaisri; Elsayed, 2024).

Os radionuclídeos naturais podem ser categorizados em três principais grupos, primordiais, secundários e cosmogênicos (Valeur, 2010). Esses radionuclídeos emitem radiações que são prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente (IOGP, 2016), dentre as principais formas de radiação tem-se:

- Partículas alfa (α): fragmentos subatômicos compostos por dois prótons e dois nêutrons, com alta energia e dupla carga positiva. Em condições operacionais, são absorvidas pelas paredes internas das tubulações, tornando-se não detectáveis por monitoramento externo. Exemplos de emissores alfa incluem o ^{226}Ra -226 e o Pb-210;

- Partículas beta (β): as partículas subatômicas ejetadas do núcleo de átomos radioativos, com carga positiva ou negativa. Em atividades de manutenção, as partículas beta de baixa energia podem não alcançar o detector, enquanto aquelas de alta energia são detectáveis. A detecção beta é, geralmente, a opção mais sensível para identificar uma amostra que está contaminada com NORM. Exemplos de emissores beta incluem produtos de decaimento do Ra-226, Ra-228 e Pb-210;
- Radiação gama (γ): a emissão gama ocorre simultaneamente à emissão de partículas beta e, ocasionalmente, alfa, como resultado do processo de relaxamento do estado excitado do núcleo atômico. Os fótons gama representam um risco de irradiação externa ao corpo humano, devido ao seu elevado poder de penetração e longo alcance no ar. Em condições operacionais, são detectáveis fótons gama com energias superiores a 200 keV.

Essas emissões, α , β e γ , podem ser prejudiciais à saúde humana, uma vez que a energia liberada é depositada no tecido biológico, podendo causar danos celulares e mutações genéticas. O ser humano pode ser exposto a materiais radioativos por duas vias principais: irradiação e contaminação. A irradiação ocorre quando o material emite radiações que atingem o indivíduo externa ou internamente, sem contato direto com o radionuclídeo. A contaminação, por sua vez, ocorre quando há inalação, ingestão ou absorção cutânea de substâncias contendo os radionuclídeos, permitindo sua incorporação ao organismo (IOGP, 2016).

Diante desse cenário, evidencia-se a necessidade de estratégias adequadas para o gerenciamento de resíduos radioativos. Esses resíduos devem ser devidamente categorizados antes da escolha do método de gerenciamento. A *International Association of Oil & Gas Producers* (IOGP) estabelece critérios que devem ser considerados para a definição da disposição final, incluindo a avaliação do risco do local, do risco radiológico



durante a fase de operação no local, do risco radiológico ao longo da vida útil dos rejeitos, bem como da viabilidade técnica e dos custos associados (IOGP, 2016).

Haja vista a necessidade de elaborar estratégias para o gerenciamento adequado desses resíduos, uma matriz SWOT (Benzaghta *et al.*, 2021) configura-se como uma abordagem significativa para organizar os conhecimentos e dados existentes, reconhecendo o panorama ambiental e estratégico no qual se insere a gestão de resíduos.

A matriz SWOT é uma ferramenta que dispõe de forma simples e concisa os fatores que emergem do pensamento estratégico, em termos de suas Forças (S - *strengths*), Fraquezas (W - *weaknesses*), Oportunidades (O - *opportunities*) e Ameaças (T - *threats*) (Fernandes, 2012). No contexto do presente trabalho, essa análise permitirá uma percepção sobre o cenário em que se insere o gerenciamento de resíduos radioativos no Brasil.

3. MÉTODO

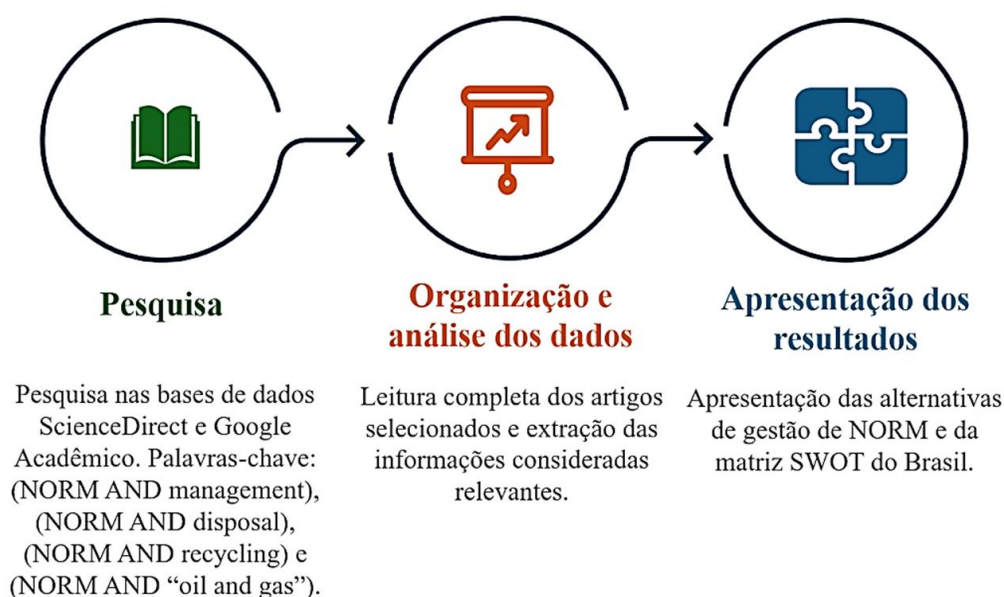
A metodologia de pesquisa empregada neste trabalho caracteriza-se como qualitativa e exploratória, uma vez que se busca explorar um tema ainda pouco difundido e lançar bases para estudos mais aprofundados posteriormente (Hernández Sampieri; Collado; Lucio, 2013).

Inicialmente, foram selecionadas as bases de dados ScienceDirect e Google Acadêmico para pesquisa a partir dos descritores: (NORM AND *management*), (NORM AND *disposal*), (NORM AND *recycling*) e (NORM AND “*oil and gas*”). O objetivo foi identificar, nos estudos sobre NORM, as estratégias de gerenciamento desenvolvidas e as alternativas propostas para o fim de vida desses materiais. Os documentos foram filtrados por meio da leitura de títulos e resumos e, posteriormente, selecionaram-se aqueles que apresentavam relação direta com o tema do gerenciamento de NORM na indústria de óleo e gás.

Na etapa seguinte, os trabalhos selecionados foram analisados na íntegra e as informações relevantes foram sistematizadas para subsidiar a elaboração de uma matriz SWOT,

voltada à avaliação do gerenciamento e das práticas de destinação final de NORM no contexto brasileiro. A Figura 1 apresenta as etapas da pesquisa.

Figura 1 - Esquema da metodologia empregada.



Fonte: Os autores (2025).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As unidades de produção e bases logísticas, que realizam atividades de limpeza, têm maior potencial para gerar volumes substanciais de NORM, diferentemente das unidades de perfuração e instalação/remoção submarina, que manuseiam peças potencialmente contaminadas, mas não realizam atividades de limpeza (Preza; Fortins; Jabarra, 2025).

Em 2023, um projeto de descomissionamento de uma Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência (*Floating Production, Storage and Offloading* - FPSO) gerou cerca de 1.500 tambores com resíduos contendo NORM (lodo e/ou incrustação), e é importante enfatizar que cada tipo de unidade apresenta desafios únicos para a identificação e gestão de NORM. Por exemplo, algumas unidades não manipulam diretamente o NORM, enquanto outras têm atividades rotineiras que envolvem a limpeza de tanques e equipamentos contaminados por NORM (Preza; Fortins; Jabarra, 2025).

4.1 Alternativas para gestão de resíduos contendo NORMs

O gerenciamento dos resíduos contendo NORM demanda soluções que minimizem o volume, a toxicidade e a mobilidade dos radionuclídeos. Dessa forma, alternativas para essa gestão devem ser exploradas, priorizando opções de tratamento, recuperação e vias de disposição controlada (Aljuwaisri; Elsayed, 2024).

- a) ***Armazenamento temporário seguro:*** trata-se de um repositório projetado para proporcionar um local controlado e centralizado para o armazenamento provisório de rejeitos radioativos, reduzindo os riscos ambientais e ocupacionais associados a depósitos dispersos ou mal gerenciados (Aljuwaisri; Elsayed, 2024).
- b) ***Redução, reciclagem, tratamento ou recuperação:*** essa abordagem minimiza os riscos de contaminação do solo e das águas subterrâneas e, além disso, está alinhada às metas globais de sustentabilidade, fortalecendo a imagem do setor quanto à responsabilidade socioambiental (Aljuwaisri; Elsayed, 2024).
- c) ***Injeção ou reinjeção:*** a reinjeção de resíduos em poços profundos consiste na mistura de rejeitos finamente pulverizados a um fluido transportador, que é então bombeado para formações geológicas profundas e confinadas. O processo pode envolver o fraturamento hidráulico controlado, utilizado para induzir fraturas em formações rochosas permeáveis, facilitando a disposição e o confinamento seguro dos rejeitos (Aljuwaisri; Elsayed, 2024).
- d) ***Depósitos e aterros:*** em alguns países, os resíduos contendo NORM podem ser dispostos em depósitos controlados ou aterros sanitários licenciados, desde que suas concentrações radiológicas estejam abaixo dos limites de isenção estabelecidos por órgãos reguladores, como IAEA ou a CIPR (Comissão Internacional de Proteção Radiológica) (Michalik *et al.*, 2023).
- e) ***Descarte no mar (Offshore):*** a liberação controlada de água produzida e de resíduos sólidos contendo NORM em ambientes marinhos é uma prática autorizada em determinadas jurisdições, desde que sejam observados os limites e

critérios estabelecidos por regulamentações ambientais e radiológicas vigentes (IOGP, 2016).

- f) **Vitrificação:** a vitrificação é uma tecnologia avançada de tratamento utilizada para o gerenciamento de rejeitos contendo NORM, no qual os resíduos são incorporados em uma matriz vítrea, resultando em materiais estáveis, densos e quimicamente duráveis. Esse processo promove a imobilização permanente dos radionuclídeos e, em alguns casos, a decomposição de componentes perigosos devido às altas temperaturas envolvidas. Contudo, trata-se de uma técnica de alto custo operacional e energético, exigindo avaliações de viabilidade técnica e econômica antes de sua implementação. Além disso, requer controle rigoroso das variáveis operacionais, como temperatura, taxa de resfriamento e composição da mistura, para garantir a homogeneidade e estabilidade estrutural da matriz vítrea (Pilania, Dube, 2023; Sanito *et al.*, 2022).

4.2 Estratégias para gestão de resíduos contendo NORM

A gestão eficiente de resíduos contendo NORM requer a implementação de um plano de gestão abrangente, estruturado com etapas rigorosas. Inicialmente, deve ser realizado um levantamento radiométrico no local para identificar e quantificar os níveis de radiação, permitindo a sinalização das áreas que excedem a radiação natural de fundo. Após essa etapa pode-se prosseguir com a limpeza dos tanques, dutos e outros equipamentos contaminados. Os rejeitos gerados devem ser caracterizados e segregados para, posteriormente, receberem o tratamento necessário antes do armazenamento temporário e disposição final. É imprescindível que todas as fases de manuseio do material estejam de acordo com o plano de proteção radiológica em vigor (CNEN, 2021).

Ademais, o sucesso do gerenciamento dos rejeitos de NORM demanda a integração de esforços entre governo, indústria e academia. No Brasil, essa integração pode envolver órgãos tais como a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), a Agência Nacional do Petróleo e Biocombustíveis (ANP), assim como é crucial o investimento em educação e capacitação dos trabalhadores do segmento (Pilania; Dube, 2023). Por fim, todas as



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

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

práticas de gestão devem estar alinhadas com os requisitos internacionais de segurança, como os da IAEA *Safety Standards Series* (Michalik *et al.*, 2023).

Estudos demonstram vantagens que determinadas técnicas apresentam vantagens significativas na imobilização de rejeitos radioativos contendo cézio-137 (Cs-137) e estrôncio-90 (Sr-90). Entre essas abordagens, os materiais ativados alcalinamente (AAMs) têm se destacado por reduzirem a geração de hidretos por radiólise e apresentarem elevada capacidade de imobilização de cézio conforme demonstrado por Muzika e colaboradores (2024).

Gamal e colaboradores (2021) destacam a importância da remoção de incrustações em instalações de produção de petróleo e gás, uma vez que a formação dessas deposições está diretamente associada às condições operacionais do sistema. Os autores identificam duas abordagens principais para o controle desse fenômeno: métodos mecânicos e métodos químicos, que podem ser aplicados de forma isolada ou combinada, a fim de maximizar a eficiência do processo de remoção. A utilização de solventes alcalinos (pH elevados) são preferencialmente empregados devido à menor agressividade corrosiva e à potencial redução dos custos operacionais. Em relação ao estudo específico conduzido pelos autores demonstrou a eficácia de uma solução com pH 12,5 composta por etilenodiamina, ácido nitrilotriacético (NTA) e ácido cloroacético na remoção de incrustações formadas por sulfatos e sulfetos. A abordagem integrada proposta no trabalho dos autores enfatiza a importância de considerar simultaneamente os fatores técnicos e econômicos no planejamento e execução das operações de remoção de incrustações.

O processo de vitrificação pode ser utilizado para uma gama de poluentes oriundos da indústria de óleo e gás, incluindo resíduos contendo NORM, bem como resíduos orgânicos e inorgânicos voláteis e semivoláteis. Além disso, os materiais produzidos podem ser destinados à construção civil, para fabricação de tijolos e concreto, e à pavimentação de estradas (Chapman, 1994; Sanito *et al.*, 2022).



Além dos parâmetros térmicos, é essencial a realização de um estudo detalhado sobre o comportamento corrosivo do material e sua suscetibilidade à colonização microbiana, fatores que podem acelerar significativamente sua degradação. Essa avaliação é fundamental para assegurar a integridade e a qualidade dos materiais destinados ao reaproveitamento (Vieira, 2015; Thorpe, 2024).

4.3 Matriz SWOT

A partir dos artigos analisados e dos resultados, criou-se a matriz de SWOT (Figura 2) relacionada ao desenvolvimento da indústria de reciclagem de plataformas no Brasil contaminadas com resíduos de NORM, apresentando as Forças (S), Fraquezas (W), Oportunidades (O) e Ameaças (T) para a gestão e manuseio deste tipo de resíduo no país.

Figura 2 - Matriz SWOT.



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

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

S

FORÇAS

- Regulamentação nacional específica;
- Adoção de embalagens certificadas (IP Type I);
- Segurança radiológica comprovada;
- Métodos seguros para armazenamento e encapsulamento;
- Sistema regulatório robusto;
- Demanda nacional ainda reprimida para ser atendida;
- Apoio de normas internacionais consolidadas.

W

FRAQUEZAS

- Ausência de locais de disposição final;
- Capacidade limitada de armazenamento temporário;
- Falta de padronização entre unidades de gestão;
- Falta de conhecimento sobre custos operacionais e logísticos;
- Alto custo inicial de implementação;
- Falta de políticas específicas.

O

OPORTUNIDADES

- Desenvolvimento de infraestrutura de descarte final;
- Integração com planos de descomissionamento;
- Criação de repositórios nacionais;
- Avanços tecnológicos;
- Parcerias internacionais;
- Expansão de políticas nacionais específicas;
- Identificação de locais ainda não avaliados para depósito definitivo;
- Desenvolvimento de mercado nacional.

T

AMEAÇAS

- Riscos à saúde e ao meio ambiente;
- Danos a reputações corporativas;
- Desinformação ou falta de engajamento de operadores;
- Descarte inadequado ou ilegal;
- Riscos de transporte transfronteiriço de rejeitos (Convenção de Basileia);
- Persistência radiológica no ambiente;

Fonte: Os autores (2025).

4.3.1 Forças

O Brasil possui a Resolução CNEN nº 288/2021, que regulamenta os requisitos para o registro de instalações de limpeza e acondicionamento de rejeitos contendo radionuclídeos naturais, complementada por outras normas CNEN (como NN 3.01, 3.02 e 5.01) que dão suporte ao armazenamento seguro. A ausência de locais de disposição final em território nacional representa uma demanda reprimida para ainda ser atendida, tendo em vista o robusto sistema regulatório mencionado.

A utilização de tambores com embalagens em conformidade com os padrões da CNEN e AIEA aumenta a segurança no armazenamento (Preza; Fortins; Jabarra, 2025). Nos casos das alternativas de injeção e reinjeção, as descargas ambientais e as doses de radiação para o público são quase insignificantes (Aljuwaisri; Elsayed, 2024).



4.3.2 Fraquezas

Os tambores contendo rejeitos NORM permanecem armazenados aguardando autorização para exportação, o que gera desafios e riscos logísticos significativos. As unidades *offshore* frequentemente não dispõem de infraestrutura adequada para o armazenamento prolongado, o que pode comprometer a segurança operacional e ambiental. Além disso, observa-se grande heterogeneidade nos procedimentos de gestão de NORM entre diferentes instalações, o que dificulta o controle regulatório e acompanhamento operacional (Preza; Fortins; Jabarra, 2025).

A implantação de um repositório centralizado poderia assegurar a conformidade com normas e marcos regulatórios internacionais, reforçando a credibilidade do país no mercado global de petróleo e gás, ainda que envolva custos elevados de implementação e manutenção. Além disso, essa iniciativa fortaleceria as atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação, ao proporcionar um ambiente controlado para o estudo e aprimoramento de práticas de gestão de rejeitos radioativos, contribuindo para a capacitação técnica do e institucional do setor (Aljuwaisri; Elsayed, 2024).

4.3.3 Oportunidades

A crescente necessidade de desmantelamento de plataformas *offshore* representa uma oportunidade estratégica para o aprimoramento das práticas de armazenamento e gestão de rejeitos NORM. A implantação de repositórios centrais em âmbito nacional pode estimular a inovação tecnológica, fomentar a pesquisa científica e fortalecer a capacidade técnica do país. Além disso, avanços em tecnologias de monitoramento, contenção e tratamento de rejeitos radioativos tendem a tornar os métodos de gerenciamento mais eficientes e economicamente viáveis (Aljuwaisri; Elsayed, 2024), abrindo caminho para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis de disposição final, como a vitrificação.

A identificação de locais ainda não avaliados para depósito definitivo dos rejeitos (como minas, cavernas, poços terrestres e marinhos) representa uma grande oportunidade para o



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

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

desenvolvimento de um mercado nacional de tratamento de resíduos e destinação final, suscitando a necessidade de incentivos e novas tecnologias.

4.3.4 Ameaças

A gestão de materiais contendo NORM está sujeita a falhas que podem comprometer diretamente as esferas de segurança operacional, ambiental e de governança corporativa. O armazenamento inadequado de rejeitos radioativos, por exemplo, pode resultar em contaminação ambiental e exposição ocupacional, sobretudo durante atividades de limpeza, inspeção e manutenção. Além dos impactos técnicos e ambientais, deficiências na gestão de NORM podem ocasionar danos significativos à reputação corporativa das empresas envolvidas, desencadeando rejeição pública, perda da credibilidade institucional e potenciais litígios futuros.

Outro fator de risco relevante refere-se ao envio de resíduos contendo NORM para o exterior, prática que pode configurar descumprimento da Convenção da Basileia, instrumento internacional que estabelece o controle dos movimentos transfronteiriços de resíduos perigosos e promove o seu gerenciamento ambientalmente adequado.

Além da Convenção da Basileia, outros instrumentos internacionais, como a Convenção Conjunta da AIEA, Convenção de Roterdã (1998), a Convenção de Bamako (1991), Diretiva 2013/59/Euratom (BSS) e Convenção de Londres (1972) & Protocolo de 1996 também estabelecem obrigações quanto à segurança, rastreabilidade e destino de resíduos perigosos, incluindo materiais com NORM. O descumprimento dessas normas pode gerar sanções internacionais e riscos reputacionais significativos para as instituições envolvidas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo analisou alternativas para o gerenciamento de resíduos contendo NORM na indústria de petróleo e gás, utilizando uma matriz SWOT como ferramenta



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

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

estratégica para avaliar o cenário atual. A análise revelou que o principal desafio da gestão de NORM no Brasil é a falta de uma solução definitiva para a destinação final.

A crescente demanda por reciclagem de embarcações no Brasil, impulsionada pelo descomissionamento de plataformas de exploração de petróleo e gás, levanta preocupações ambientais significativas relacionadas à presença de materiais perigosos, em especial os Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (NORM), que apresentam radiação nuclear de baixo nível.

Atualmente, o Brasil dispõe apenas de instalações de armazenamento temporário, que, com o tempo, podem acumular grandes volumes de rejeitos, aumentar o risco de vazamentos e causar diversos impactos ambientais.

A gestão eficaz dos rejeitos NORM exige uma abordagem integrada, que combine controles técnicos, marcos regulatórios robustos, conscientização dos atores envolvidos e infraestrutura adequada. É imperativo que os países desenvolvam políticas nacionais específicas para tratar dos rejeitos NORM, especialmente diante do aumento dos volumes gerados em diversos setores industriais, sendo o setor de petróleo e gás um dos principais contribuintes.

A ausência de soluções consolidadas de disposição final representa uma das ameaças e fragilidades mais críticas do sistema atual de gerenciamento de NORM no Brasil.

Este estudo demonstra que existem alternativas viáveis, cada uma com vantagens e limitações específicas, ressaltando a necessidade de pesquisas científicas adicionais para garantir a destinação sustentável dos materiais provenientes da indústria de petróleo e gás potencialmente contaminados com espécies radioativas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Estudos para Sistemas Sustentáveis (CESS/UFF) pelo apoio e infraestrutura fornecidos para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS



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

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

AL NABHANI, K.; KHAN, F.; YANG, M. Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials in oil and gas production: A silent killer. **Process Safety and Environmental Protection**, Amsterdam, v. 99, p. 237–247, 2016.

ALI, M. M. M. *et al.* Concentrations of TENORMs in the petroleum industry and their environmental and health effects. **RSC Advances**, Cambridge, v. 9, n. 67, p. 39201–39229, 2019.

ALJUWAISRI, N.; ELSAYED, M. A Methodology for Handling, Disposal and Management of Norm Waste in Oil and Gas Industry. **Sarcouncil Journal of Applied Sciences**, London, v. 4, n. 10, p. 15–21, 2024.

BENZAGHTA, M. A. *et al.* SWOT analysis applications: An integrative literature review. **Journal of Global Business Insights**, Tampa, Flórida, Estados Unidos, v. 6, n. 1, p. 55–73, 2021.

BRASIL. **Lei nº 10.308, de 20 de novembro de 2001**. 20 nov. 2001. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110308.htm. Acesso em: 20 out. 2025.

CHAPMAN, C. C. Vitrification of NORM Wastes. *In*: ENVIRONMENTAL ISSUES AND SOLUTIONS IN EXPLORATION, PRODUCTION AND REFINING CONFERENCE, 1994, Houston, Texas. **Anais [...]**. Houston, Texas: U. S. Department of Energy, 1994.

CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Gerência de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação**. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2014.

CNEN. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Resolução nº 288, de 20 de dezembro de 2021**: dispõe sobre os requisitos necessários para que instalações obtenham o registro para a realização de atividades de limpeza e acondicionamento de rejeitos contendo radionuclídeos de ocorrência natural da área de exploração e produção de óleo e gás. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/acao-rapido/normas/grupo-8/grupo8-resolucao288.pdf>.

COWIE, M. *et al.* NORM Management in the oil and gas industry. **Annals of the ICRP**, London, v. 41, n. 3–4, p. 318–331, 2012.

FERNANDES, D. R. Uma Visão Sobre a Análise da Matriz SWOT como Ferramenta para Elaboração da Estratégia. **Revista de Ciências Jurídicas e Empresariais**, Vitória da Conquista, v. 13, n. 2, 2012.

GAMAL, H. *et al.* Barium Sulfate Scale Removal at Low-Temperature. **Geofluids**, London, v. 2021, p. 1–12, 2021.



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

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

HERNÁNDEZ SAMPIERI, R.; COLLADO, C. F.; LUCIO, M. D. P. B. **Metodologia de Pesquisa**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2013.

IAEA. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Radiation protection and the management of radioactive waste in the oil and gas industry**. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2003.

IOGP. INTERNATIONAL ASSOCIATION OF OIL & GAS PRODUCERS. **Managing Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in the oil and gas industry**. [S. l.]: International Association of Oil & Gas Producers, 2016.

IZZATI RUZALI, N. S.; FADZIL, S. M.; BAAN, R. Evaluation of glass waste formed containing NORM. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Bristol, v. 785, n. 1, p. 012016, 2020.

LE, H. T. *et al.* Naturally Occurring Radioactive Material Waste Management in the ASEAN Oil and Gas Industry: A Review. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, Reston, Virgínia, Estados Unidos, v. 28, n. 1, 2024.

LOPES, A. G.; DA SILVA, F. C. A.; LOPES, R. T. Radiological assessment of the disposal of bulk oil NORM waste: Case study from Brazil. **Journal of Environmental Radioactivity**, Amsterdam, v. 261, p. 107139, 2023.

MICHALIK, B. *et al.* A methodology for the systematic identification of naturally occurring radioactive materials (NORM). **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 881, p. 163324, 2023.

MUKIZA, E. *et al.* Recent advances in immobilization of radioactive cesium and strontium-bearing wastes in alkali activated materials – A review. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 370, p. 122746, 2024.

PILANIA, R. K.; DUBE, C. L. Matrices for radioactive waste immobilization: a review. **Frontiers in Materials**, Lausanne, Suíça, v. 10, 2023.

PREZA, P.; FORTINS, G.; JABARRA, G. NORM Management in the Oil and Gas Industry: From Production to Decommissioning. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 3A (Suppl.), p. e2448–e2448, 2024.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, M. D. P. B. **Metodologia de pesquisa**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2013.

SANITO, R. C. *et al.* A review on vitrification technologies of hazardous waste. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 316, p. 115243, 2022.

STRAND, T. Handling and disposal of NORM in the oil and gas industry. *In*: WASTE MANAGEMENT CONFERENCE 99, 1999, Tucson, Arizona. **Anais [...]**. Tucson, Arizona: Proceedings of the Waste Management Conference, WM'99, 1999.



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

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

THORPE, C. L. *et al.* Microbial interactions with phosphorus containing glasses representative of vitrified radioactive waste. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 462, p. 132667, 2024.

VALEUR, J. R. Environmental Impacts of Different NORM Disposal Methods. *In*: MIDDLE EAST HEALTH, SAFETY, SECURITY, AND ENVIRONMENT CONFERENCE AND EXHIBITION, 2010, Manama, Bahrain. **Middle East Health, Safety, Security, and Environment Conference and Exhibition**. Manama, Bahrain: SPE, 2010. p. SPE-136312-MS.

VARSKOG, P.; AAMLID, H. **Assessment, Treatment and Management of NORM in the Norwegian Oil and Gas Industry**. Augsburg, Germany. 2005.

VIEIRA, H. **Obtenção e caracterização de vidros a base de lama vermelha visando a imobilização de rejeitos nucleares**. 2013. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.