

ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA O TRATAMENTO E ARMAZENAMENTO DO MATERIAL RADIOATIVO DE ORIGEM NATURAL (NORM) DA INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS NO BRASIL

CLÉDOLA CÁSSIA OLIVEIRA DE TELLO

GISELE BIRMAN TONIETTO

JOSÉ MARCUS DE OLIVEIRA GODOY

MANOEL MATTOS OLIVEIRA RAMOS

ROGÉRIO PIMENTA MOURÃO

VALERIA CUCCIA



Destinação de
Resíduos NORM
do Petróleo e Gás





**ALTERNATIVAS
TECNOLÓGICAS PARA
O TRATAMENTO E
ARMAZENAMENTO DO
MATERIAL RADIOATIVO
DE ORIGEM NATURAL
(NORM) DA INDÚSTRIA DE
ÓLEO E GÁS NO BRASIL**



ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA O TRATAMENTO E ARMAZENAMENTO DO MATERIAL RADIOATIVO DE ORIGEM NATURAL (NORM) DA INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS NO BRASIL

CLÉDOLA CÁSSIA OLIVEIRA DE TELLO

GISELE BIRMAN TONNETTO

JOSÉ MARCUS DE OLIVEIRA GODOY

MANOEL MATTOS OLIVEIRA RAMOS

ROGÉRIO PIMENTA MOURÃO

VALERIA CUCCIA

INTER
SIS
COES

EDITORA
PUC
RIO



Destinação de
Resíduos NORM
do Petróleo e Gás

DEPARTAMENTO
DE QUÍMICA
PUC-RIO

©**Selo Interseções, Editora PUC-Rio**

Em parceria com o Departamento de Química da PUC-Rio
Relatório de projeto técnico com a ANP

©Editora PUC-Rio

Rua Marquês de São Vicente, 225,
7º andar do prédio Kennedy
Campus Gávea/PUC-Rio
Rio de Janeiro, RJ – CEP: 22451-900
Tel.: +55 21 3736 1838
edpucrio@puc-rio.br
www.editora.puc-rio.br

Edição da obra

Tatiana Helich

Revisão de texto

Fernanda Lutfi

Projeto gráfico

Flávia da Matta Design

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra pode ser re-
produzida, transmitida ou arquivada por qualquer forma e/ou em
quaisquer meios sem permissão escrita da Editora PUC-Rio.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Alternativas tecnológicas para o tratamento e armazenamento do Material Radioativo de Origem Natural (NORM) da indústria de óleo e gás no Brasil [recurso eletrônico] / José Marcus de Oliveira Godoy, Rogério Pimenta Mourão, coordenação. – Rio de Janeiro: Ed. PUC-Rio, 2024.
1 recurso eletrônico (146 p.)

Obra publicada através do Selo Interseções da Ed. PUC-Rio, em parceria com o Departamento de Química da PUC-Rio.

Descrição baseada na consulta ao recurso eletrônico em 22 de Novembro de 2024-¹¹.

Inclui anexos.

Inclui bibliografias.

Exigências do sistema: conexão com a Internet, World Wide Web browser e Adobe Acrobat Reader.

Disponível em: <https://www.editora.puc-rio.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infolid=1325&sid=3>

ISBN (e-book): 978-85-8006-334-9

1. Resíduos radioativos – Eliminação – Brasil. 2. Indústria petrolífera – Regulamentos de segurança – Brasil. 3. Indústria petrolífera – Aspectos ambientais – Brasil. I. Godoy, José Marcus de Oliveira. II. Mourão, Rogério Pimenta.



SUMÁRIO

SOBRE OS AUTORES	7
ÍNDICE DE TABELAS	11
ÍNDICE DE FIGURAS	13
<hr/>	
CAPÍTULO 1	
AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES PARA A DESTINAÇÃO FINAL DE REJEITOS NORM DO PETRÓLEO E GÁS	15
CAPÍTULO 2	
GERAÇÃO DE NORM DA INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS	19
CAPÍTULO 3	
LEGISLAÇÃO BRASILEIRA	41
CAPÍTULO 4	
PRINCIPAIS MELHORIAS NA LEGISLAÇÃO NUCLEAR NACIONAL	61
CAPÍTULO 5	
LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL	67
CAPÍTULO 6	
MAPEAMENTO DE POTENCIAIS PARCEIROS E FORNECEDORES	83
CAPÍTULO 7	
OPÇÕES DE TRATAMENTO E DEPOSIÇÃO PARA O BRASIL	101
CAPÍTULO 8	
MATURIDADE TECNOLÓGICA	111
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	139
ANEXOS	143

SOBRE OS AUTORES



Rogério
Pimenta Mourão
(coordenador
do projeto)

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Minas Gerais e doutorado em Tecnologia Nuclear pela USP. Rogério é tecnologista sênior da Comissão Nacional de Energia Nuclear, lotado no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, em Belo Horizonte. Tem experiência na área de Engenharia Nuclear, com ênfase em gerência de rejeitos radioativos (CDTN), atuando principalmente nos temas transporte de produtos perigosos e deposição de rejeitos radioativos. Rogério ocupa o cargo de chefe do Serviço de Gerência de Rejeitos e é coordenador técnico do projeto para implantação do repositório nacional de rejeitos radioativos e do Laboratório de Ensaio de Embalagens de Transporte. É professor do Curso de Especialização em Gerenciamento de Rejeitos Radioativos do CDTN.



José Marcus de
Oliveira Godoy
(coordenador
do projeto)

Possui bacharelado em Química Industrial pela PUC-Rio, mestrado em Engenharia Nuclear pela COPPE/UFRJ e doutorado em Radioquímica pela Universidade Técnica de Munique/Alemanha. Pesquisador sênior aposentado do Instituto de Radioproteção e Dosimetria/ Comissão Nacional de Energia Nuclear, do qual foi diretor. Pesquisador do 1-B do CNPq, Cientista do Nosso Estado da FAPERJ. Ex-presidente da Sociedade Brasileira de Proteção Radiológica e ex-membro do conselho diretor da União Internacional de Radioecologia. Consultor da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) para aspectos da caracterização de resíduos tipo NORM. É professor titular do Departamento de Química e vice-decano de desenvolvimento do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.



Clédola Cássia
Oliveira de Tello

É engenheira química e mestre em Engenharia Nuclear pela UFMG e doutora em Engenharia Química pela UNICAMP, com treinamento e estudo na França, na Alemanha, nos EUA e na Espanha. Atualmente é pesquisadora do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN) da CNEN. Coordenadora do projeto CENTENA, Centro Tecnológico Nuclear e Ambiental, no qual serão armazenados os rejeitos radioativos do uso da energia nuclear no Brasil e serão realizadas atividades de PD&I em gerência de RR. Professora e orientadora da Pós-graduação do CDTN/CNEN, *stricto* e *lato sensu*. Responsável pelo LABCIM, atua nos temas: cimentação, rejeitos radioativos e perigosos, gerência de rejeitos, avaliação do produto solidificado e repositório. Especialista convidada para projetos da Agência Internacional de Energia Atômica na área de rejeitos radioativos. Membro do Conselho Curador da ABDAN.



Gisele Birman
Tonietto

Possui graduação em Química Industrial pela UFF, mestrado e doutorado em Química Analítica pela PUC-Rio e MBA em Gestão de Projetos pela FGV-RJ. Trabalha na PUC-Rio, onde atua como Coordenadora de Projetos de Desenvolvimento na Coordenação Central de Parcerias e Inovação (CCPIN), no Centro Técnico Científico (CTC) e no Laboratório de Humanidades Digitais (DHLab). Tem experiência na área de Química, com ênfase em Química Analítica, atuando principalmente nos seguintes temas: cromatografia de íons, micro-ondas, especiação de arsênio e selênio, análise isotópica de carbono, hidrogênio e oxigênio. Participa de diversos projetos no âmbito da indústria de óleo e gás, atua divulgando ciência e tecnologia, elaborando conteúdo digital, promovendo entrevistas, mesas redondas, treinamentos e sobretudo na conexão entre empresas, indústrias e a universidade.

Recebeu o Diploma de Mérito Universitário em 2016 e 2021. É membro das Câmaras Técnicas de Petróleo e Gás e de Tecnologia Inovação e Competitividade do Conselho Regional de Química – CRQ-RJ.



Manoel Mattos
Oliveira Ramos

É engenheiro eletricitista com mestrado em Engenharia Nuclear pelo Instituto Militar de Engenharia (IME) e doutorado em Engenharia Nuclear pela COPPE da UFRJ. Trabalhou por 25 anos no Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN) na área de Metrologia das Radiações Ionizantes, tornando-se especialista em instrumentação nuclear para radioproteção. Em 2009 foi transferido para a CNEN/Sede, onde ingressou na área regulatória de gerência de rejeitos, vindo a se dedicar à inspeção de instalações petrolíferas com ocorrência de NORM.



Valeria Cuccia

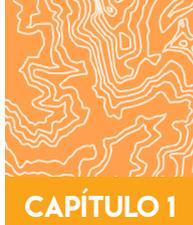
É engenheira química com mestrado e doutorado em Ciências Nucleares. Trabalha no Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear, com o gerenciamento de fontes seladas fora de uso e rejeitos radioativos (CDTN). Conduz e participa de projetos de pesquisa relacionados ao tratamento e à deposição de rejeitos radioativos, especialmente orgânicos e NORM, imobilização em geopolímero, análise de segurança e análise de ciclo de vida aplicada a gerência de rejeitos radioativos.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1	Principais radionuclídeos de ocorrência natural (NORM) na indústria de petróleo e gás natural	28
Tabela 2	Principais radionuclídeos de ocorrência natural (NORM) na indústria de petróleo e gás natural	68
Tabela 3	Concentração de elementos radioativos naturais em solo na Bélgica	70
Tabela 4	Opções de deposição de rejeitos radioativos de muito baixo nível na França	78
Tabela 5	Parceiros potenciais no Brasil para gerência de rejeitos NORM O&G	84
Tabela 6	Empresas no Brasil com aterros licenciados para resíduos classe	85
Tabela 7	Instalações autorizadas no Colorado (EUA) para deposição de NORM (CDPHE, 2021)	95
Tabela 8	Métodos de deposição propostos para o Brasil	102
Tabela 9	Produção de petróleo por campo em 2020	108
Tabela 10	Compactos regionais de campos petrolíferos	108
Tabela 11	Compactos regionais de campos petrolíferos	109
Tabela 12	Opções para deposição de NORM. (Adaptado da AIEA, 2017)	124
Tabela 13	Dimensões e critérios selecionados preliminarmente para avaliar a maturidade tecnológica das opções de gerência de NORM da indústria de petróleo e gás no Brasil	132
Tabela 14	Resultados do estudo de opções para a deposição de NORM da indústria de petróleo e gás	135
Tabela 15	Resultados do estudo de opções para o tratamento do NORM da indústria de petróleo e gás	136
Tabela 16	Videoconferências organizadas pela equipe	143
Tabela 17	Lista de parceiros potenciais e exemplos de boas práticas para tratamento e deposição de rejeito NORM O&G	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Mapa de produtores de petróleo e gás natural no Brasil em 2021	21
Figura 2	Campos de produção de petróleo da Equinor e parceiros no Brasil em 2021	22
Figura 3	Detalhe de uma tubulação de produção de petróleo contendo incrustações de BaSO ₄ ricas em rádio	26
Figura 4	Composição química média das amostras de pó preto de gasodutos da Bacia de Campos	34
Figura 5	Valores previstos de ²¹⁰ Pb versus valores de ²¹⁰ Pb observados	34
Figura 6	Fluxograma da gerência de resíduos NORM	79
Figura 7	Vista esquemática do depósito final Stangeneset, com dimensões e capacidade de cada túnel	90
Figura 8	Tambores de rejeitos NORM alocados para imobilização	91
Figura 9	Injeção anular (1) e tubular (2 e 3)	104
Figura 10	Esquema para injeção de resíduos NORM O&G proposto pelo Grupo Vitória Ambiental	105
Figura 11	Esquema da deposição de resíduos usando a técnica de injeção em rochas fraturadas do tipo arenito	106
Figura 12	Campos petrolíferos com maior produção no Brasil em 2020	107
Figura 13	Níveis de maturidade tecnológica	114
Figura 14	Escala TRL recomendada pela API RP 17Q em conjunto com a ISSO 20815	115
Figura 15	Adaptação da escala TRL para o desenvolvimento de farmacêuticos	116
Figura 16	Relação entre o nível de maturidade e o ciclo de vida de um projeto	118
Figura 17	Representação dos possíveis riscos associados às opções de gerenciamento de resíduos NORM provenientes das práticas da indústria de óleo e gás	120
Figura 18	Fases e estado da técnica em relação aos níveis de maturidade	121
Figura 19	Fluxograma do processo de seleção de uma opção para GR	124
Figura 20	Exemplo de planilha preparada para avaliação de NMT de opções de gerência para NORM da indústria de petróleo e gás no Brasil	133



AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES PARA A DESTINAÇÃO FINAL DE REJEITOS NORM DO PETRÓLEO E GÁS

Introdução e antecedentes

Bases do projeto

A gerência adequada do Material Radioativo de Ocorrência Natural – ou NORM (Naturally Occurring Radioactive Material) – gerado na exploração de petróleo e gás é uma grande preocupação para este importante segmento industrial no Brasil.

Embora a primeira ocorrência de formação de escaras NORM tenha sido relatada em 1988, no campo offshore em Campos, cerca de dez anos desde o início da produção (Matta et al., 2002), seu descarte não foi considerado um problema. No final da década de 1990, porém, com a instalação de portais de detecção de radiação nos portões das siderúrgicas de reciclagem, a contaminação radioativa do tubo tornou-se uma ocorrência frequente. Como consequência, o material contaminado, enviado de volta à origem, começou a acumular-se nas instalações das companhias petrolíferas em terra. Matta et al. (2002) publicaram os primeiros resultados de ^{226}Ra e ^{228}Ra em lamas e escamas, geradas em plataformas no campo de Campos, e concluíram que, devido às concentrações encontradas, o material não poderia ser desclassificado como material radioativo.

Em 2004, o órgão regulador nuclear estendeu a aplicabilidade das normas nucleares às instalações produtoras de petróleo e gás.

Desde então, as empresas produtoras de petróleo instaladas no Brasil vêm buscando soluções para a deposição desse material contendo basicamente ^{226}Ra e ^{228}Ra .

Esta publicação tem como objetivo elaborar estratégias claras para o destino final, o tratamento e a deposição do NORM gerado pela indústria de petróleo e gás no Brasil, de forma segura para a sociedade, o meio ambiente e as gerações futuras.

Os principais resultados do projeto são a revisão do marco legal brasileiro relacionado à deposição de rejeitos perigosos, incluindo materiais radioativos, e a compilação das melhores práticas em todo o mundo para o fechamento do ciclo da geração de NORM e a legislação correspondente nos países estudados.

Outro objetivo do projeto é identificar parceiros do setor privado brasileiro capazes e interessados em implementar as soluções propostas.

As atividades realizadas para atingir esses objetivos foram um levantamento bibliográfico minucioso e uma compilação das legislações nacional e internacional direta ou indiretamente relacionadas à gestão de NORM, videoconferências com reguladores e operadores de instalações ativas em diferentes países, além de entrevistas e reuniões técnicas online, participação em conferências, análise de dados e entrevistas com operadores nacionais com potencial interesse e capacidade para implementar as soluções a serem propostas.

O projeto descrito neste relatório foi contratado pela Equinor e executado pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e pelo Centro de Desenvolvimento de Energia Nuclear (CDTN).

A Equinor é uma empresa internacional de energia, com sede na Noruega, com operações em mais de 30 países. A Equinor está presente no Brasil há quase 20 anos, com foco na exploração e na produção de petróleo e gás, com produção diária de 100 mil barris de petróleo, atuando nas Bacias de Campos, de Santos e do Espírito

Santo. No campo da energia renovável, a Equinor opera uma usina de energia solar no estado do Ceará, com capacidade de geração equivalente ao consumo de 200 mil famílias brasileiras.

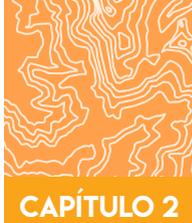
A PUC-Rio foi fundada em 1940, é uma instituição comunitária de Ensino Superior, de acordo com a Portaria 679, de 12/11/2014, da Secretaria de Regulação e Supervisão da Educação Superior, filantrópica e sem fins lucrativos, que visa produzir e propagar o saber a partir das atividades de ensino, pesquisa e extensão, tendo por base o pluralismo e os debates democráticos, visando, sobretudo, à reflexão, ao crescimento e ao enriquecimento da sociedade.

Os estudos sobre radioatividade natural na PUC-Rio remontam à fundação dos Departamentos de Química e Física nas décadas de 1950 e 1960, com o trabalho pioneiro dos Padres Roser e Cullen em regiões de alta radioatividade natural, como Araxá, Poços de Caldas e Guarapari. A tradição da universidade em estudos relacionados à radioatividade continua por meio de estudos envolvendo NORM da indústria petrolífera nas décadas de 1990 e 2000 e, mais recentemente, radioatividade nas águas subterrâneas da região montanhosa do estado do Rio de Janeiro.

O CDTN foi fundado em 1952 por um grupo de docentes da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Suas atividades iniciais incluíram pesquisas sobre ocorrências minerais radioativas e estudos em física e química nuclear, metalurgia e materiais de interesse nuclear. Seu reator de pesquisa TRIGA (Training Research Isotope General Atomic) Mark 1, dedicado à pesquisa, à produção de radioisótopos e ao treinamento de pessoal, foi inaugurado em 1960 e ainda está em operação.

O CDTN é um dos institutos de pesquisa da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Localizado no campus universitário de Belo Horizonte, o CDTN é dedicado à pesquisa e ao desenvolvimento, à educação especializada e aos serviços no campo nuclear e em áreas correlatas.

O projeto foi realizado de outubro de 2020 a setembro de 2021.



CAPÍTULO 2

GERAÇÃO DE NORMA DA INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS

Informações gerais sobre exploração e produção de petróleo no Brasil

A importância do petróleo na economia mundial é inegável. Devido à sua diversidade de aplicações, o petróleo é uma das matérias-primas que impulsiona a economia mundial. O Brasil é um dos países que possui esse recurso estratégico, com a 15ª maior reserva do mundo, incluindo a camada pré-sal, uma reserva petrolífera profunda. No entanto, embora o país tenha uma reserva considerável, a sua capacidade de refino é bastante limitada, sendo inferior à de países não produtores, como a Coreia do Sul e o Japão. A capacidade de refino brasileira em 2019 era de 2,3 milhões de barris/dia (2,3% da capacidade mundial) (ANP, 2020).

Para além da capacidade de refino, um ponto de atenção é o consumo. Como o petróleo é utilizado em uma vasta gama de setores, a quantidade utilizada pode ser uma indicação da situação da indústria nacional. Em 2019, o consumo dessa matéria-prima no Brasil foi de 2,398 milhões de barris por dia, ligeiramente superior ao de 2018. O aumento foi de 0,88%, o que pode indicar uma pequena recuperação face às crises econômicas dos anos anteriores. No entanto, esse valor permanece abaixo do máximo registrado, o que ocorreu em 2014 (ANP, 2020).

No final de 2019, o Brasil tinha 272 campos em fase de exploração, 77 em desenvolvimento de produção e 380 em fase de

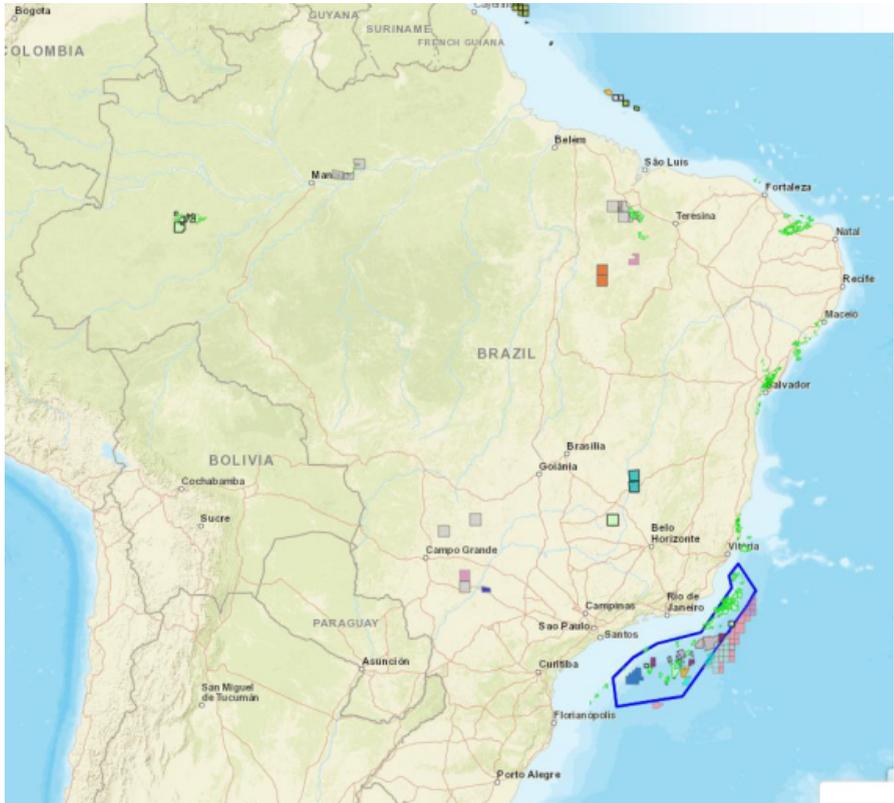
produção. O quadro jurídico nacional estabelece que o governo é o proprietário exclusivo da riqueza mineral e do subsolo, que inclui petróleo e gás. No entanto, são permitidas concessões a outras empresas para explorar essas mercadorias. No ano de 2019, as reservas totais brasileiras (todas as reservas encontradas) diminuíram em 10,3%. As reservas provadas, ou seja, as que por estudos geológicos e econômicos certamente terão recuperação econômica por meio da comercialização, foram de 12,7 bilhões de barris, um decréscimo de aproximadamente 5,4%. Em 2014, o país tinha uma estimativa de 31.106,6 milhões de barris em reservas. Em 2019, esse número era de 21.813,8 milhões de barris (ANP, 2020).

Relativamente aos estados produtores, os que têm mais reservas provadas são o Rio de Janeiro, com 85% das reservas nacionais, seguido pelo Espírito Santo, com 6,9%, e São Paulo, com 3,6%. No entanto, embora detenha apenas 1,6% das reservas comprovadas, o Rio Grande do Norte é o estado que mais tem crescido em reservas. (ANP, 2020).

Em 2019, a produção offshore foi responsável por 96,3% da produção nacional total; o Rio de Janeiro foi responsável por 75,3% da produção total, ou 2,1 milhões de barris/dia, seguido de São Paulo – 294,4 mil barris/dia – e Espírito Santo – 287,6 mil barris/dia. O Brasil ocupa a 10ª posição no ranking dos produtores mundiais de petróleo (ANP, 2020).

O mapa da Figura 1 mostra a localização das principais áreas de exploração de petróleo e gás natural no Brasil. A área realçada de azul corresponde às bacias de Campos (RJ e ES) e Santos (RJ, SP, PR e SC), responsáveis por mais de 90% da produção nacional.

Figura 1. Mapa de produtores de petróleo e gás natural no Brasil em 2021



Fonte: ANP, 2021.

Quanto às atividades da Equinor, a Figura 2 mostra as localizações das reservas próprias da empresa e dos parceiros, localizadas em Campos, em Santos e nas bacias do Espírito Santo. A partir de 2022, cinco reservas de alto impacto serão perfuradas na área do pré-sal (Equinor, 2021).

Figura 2. Campos de produção de petróleo da Equinor e parceiros no Brasil em 2021



Fonte: EQUINOR, 2021.

Em 2019, relativamente à capacidade nacional de refino, o país tinha 17 refinarias de petróleo, com uma capacidade de refino de 2,4 milhões de barris/dia. Uma parte de 89% do petróleo processado nessas instalações foi extraída de campos brasileiros, demonstrando a capacidade do país para se tornar autossuficiente no setor, especialmente se houver expansão na exploração nos estados da região nordeste e no Espírito Santo (ANP, 2020). A localização dessas refinarias, ao contrário dos pontos de exploração, está bem distribuída pelo território nacional, de modo que todas as regiões do país tenham pelo menos uma unidade de refino, suficiente para atender à demanda das indústrias locais.

A pandemia do coronavírus nos anos 2020/2021 não pode ser ignorada nesse cenário. As várias restrições impostas pelos

governos causaram uma grave recessão na economia mundial. Como resultado, a procura por petróleo diminuiu significativamente. Normalmente, a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) regula o fornecimento para controlar o setor. Contudo, devido a impasses com a Rússia, um dos principais produtores, a oferta não diminuiu, o que provocou a queda dos preços e afetou todos os países produtores (SANCHES, 2020).

O Brasil, como um dos países mais afetados pela crise, também sofreu as suas consequências. Para além da queda dos preços, a pandemia fez com que a indústria nacional sofresse uma queda abrupta na produção, o que diminuiu consideravelmente a produção e o consumo de mercadorias. Portanto, os dados relativos à indústria petrolífera do país podem ser muito diferentes das tendências observadas em anos anteriores. No entanto, a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) ainda está compilando as perdas enfrentadas pelo país e não é possível realizar uma análise mais aprofundada do setor no ano de 2020 até que estejam disponíveis dados mais confiáveis.

Características do NORM de petróleo

Principais radionuclídeos

Alguns radionuclídeos estão naturalmente presentes em depósitos de formação geológica e, sob certas condições, acumulam-se dentro de instalações de produção ou de tratamento de petróleo sob a forma de incrustações ou lamas, fazendo com que essas estruturas se tornem radioativas (AIEA, 2003). O nível desse acúmulo pode variar substancialmente de uma instalação para outra, dependendo das características da formação geológica de origem e das condições operacionais prevalentes, que podem mudar ao longo da vida útil de determinado poço (IOGP, 2016).

Os radionuclídeos naturais ^{232}Th , ^{235}U e ^{238}U são ponto de partida de três séries diferentes de decaimento radioativo natural. O isótopo ^{235}U e os produtos da sua cadeia de decaimento raramente são encontrados na prática, devido à sua baixa abundância natural.

As cadeias ^{232}Th e ^{238}U são as mais significativas no que diz respeito aos campos petrolíferos. Os elementos passam por um decaimento radioativo e cada transformação origina um novo filho radioativo, até o último passo, quando se atinge um isótopo estável de Pb (IOGP, 2016).

Quando um progenitor de longa duração decai através de um ou mais filhos de vida mais curta, o equilíbrio secular é estabelecido. Essa é uma situação em que as quantidades de todos os filhos permanecem constantes e idênticas a ^{232}Th ou ^{238}U , porque a sua taxa de produção devido ao decaimento do progenitor imediato é igual à sua própria taxa de decaimento. Assumindo que a concentração inicial de todos os membros da cadeia de decaimento é zero, o equilíbrio total só é estabelecido após várias meias-vidas do radionuclídeo de meia-vida mais longa envolvido: para a série ^{232}Th após cerca de 30 anos, mas, para a série ^{238}U , após cerca de um milhão de anos. A meia-vida extremamente longa das séries ^{232}Th e ^{238}U significa que ambas estão em equilíbrio secular em uma escala temporal geológica (IOGP, 2016).

Em um reservatório de gás/petróleo que não foi explorado, ambas as séries ^{232}Th e ^{238}U estão em equilíbrio secular com os filhos. Para os reservatórios em produção, o equilíbrio de partição química entre os radionuclídeos presentes na rocha do reservatório e os fluidos do reservatório dependerá das propriedades elementares, pois, sendo um reservatório de gás/petróleo um ambiente redutor, tanto Th como U preferem a fase de rocha sólida e não se dissolvem na fase aquosa ou oleosa (IOGP, 2016).

Por essa razão, análises de NORM de muitos campos diferentes de petróleo e gás mostram que os sólidos encontrados no fundo e nas estruturas de superfície das instalações de produção de petróleo e gás não incluem ^{238}U e ^{232}Th . Como resultado da sua interação com a rocha-mãe, a água de formação contém cátions de cálcio, estrôncio, bário e rádio, elementos pertencentes ao Grupo II da Tabela Periódica, dissolvidos a partir da rocha do reservatório. Como consequência, a água de formação contém os isótopos de rádio ^{226}Ra da série ^{238}U e ^{228}Ra e ^{224}Ra da série ^{232}Th . Os três isótopos

de rádio aparecem na água coproduzida com o petróleo ou gás sem os seus progenitores. O isótopo ^{228}Th é por vezes detectado em lamas e escamas envelhecidas e é provável que esteja presente como produto do decaimento do ^{228}Ra mobilizado (IAEA, 2003).

A presença desses radionuclídeos nas águas de produção das plataformas da Bacia de Campos foi publicada por Vegueria et al. (2002), com base em amostras recolhidas em 1997/1998, e a sua monitoração nos efluentes líquidos das plataformas petrolíferas, numa base semestral, foi incluída na resolução CONAMA 393/2007.

O rádio, inicialmente dissolvido na água de formação, seja por meio da injeção de água do mar ou da diminuição da pressão de CO_2 , é incorporado aos compostos insolúveis formados, sulfatos metálicos alcalinos terrosos e carbonatos, como mostrado por Godoy e Cruz (2003). Esses compostos são então encontrados distribuídos ao longo do caminho percorrido pelo petróleo numa plataforma, tais como as tubulações dos poços (Figura 3), as unidades de separação água-óleo e as válvulas.

Os principais filhos do rádio (^{226}Ra e ^{228}Ra) são os isótopos de radônio (Rn). O radônio é um gás nobre e prefere a fase do gás natural para o transporte do subsolo para a superfície. Como o ^{220}Rn (também conhecido como torônio, deriva do ^{228}Ra) tem meia-vida de apenas alguns minutos, terá decaído no momento em que atingir a superfície. Já o ^{222}Rn , filho do ^{226}Ra com meia-vida de cerca de quatro dias, pode aparecer em instalações de processamento de Gás Natural Liquefeito (GNL), na tampa de tanques de armazenamento de petróleo (com gás associado) ou em linhas de transporte de gás natural. Em última análise, decairá para ^{210}Pb , mas, como o ^{222}Rn tem uma vida curta em relação ao ^{210}Pb , não será alcançado nenhum estado de equilíbrio (IOGP, 2016).

Figura 3. Detalhe de uma tubulação de produção de petróleo contendo incrustações de BaSO₄ ricas em rádio



Concentrações de ²²⁶Ra e ²²⁸Ra também podem ocorrer no lodo que se acumula em poços de petróleo e tanques. Nas atividades de processamento de gás, o NORM geralmente ocorre como gás radônio no fluxo de gás natural. O radônio decai para ²¹⁰Pb, depois para ²¹⁰Bi, ²¹⁰Po, e finalmente para o estável ²⁰⁶Pb. Os elementos de decaimento do radônio ocorrem como um filme na superfície interna das linhas de entrada, unidades de tratamento, bombas e válvulas, principalmente associados aos fluxos de processamento de propileno, etano e propano (ABDEL-SABOUR, 2015).

O fluxo misto de petróleo, gás e água também transporta o gás nobre ²²²Rn, gerado na rocha do reservatório. Esse gás radioativo da zona de produção viaja com o fluxo de gás-água e depois segue, preferencialmente, os gases secos de exportação. Por essa razão,

equipamentos de instalações de tratamento e transporte de gás podem acumular uma película muito fina de ^{210}Pb formada pela decomposição da progênie de curta duração do ^{222}Rn aderindo às superfícies internas das linhas de gás. A mobilização de chumbo estável que contém concentrações relativamente altas do radionuclídeo ^{210}Pb da rocha do reservatório foi observada em vários campos de produção de gás e resulta na deposição de películas finas e ativas de chumbo nas superfícies internas dos equipamentos de produção e no aparecimento de chumbo estável e ^{210}Pb no lodo. Os condensados, extraídos do gás natural, podem conter níveis relativamente altos de ^{222}Rn e ^{210}Pb não suportados. Além disso, o ^{210}Po é observado em níveis superiores aos do seu avô ^{210}Pb , indicando emissão direta do reservatório (IAEA, 2003).

Em relação ao Pb, nos campos de gás ou petróleo, onde o Pb estável está presente nas águas produzidas, ^{210}Pb pode ser incorporado em qualquer depósito formado. As concentrações de atividade de ^{210}Pb serão substancialmente maiores do que as de ^{226}Ra , indicando que um mecanismo separado e independente para o transporte de Pb está presente (^{210}Pb não suportado) (IAEA, 2003).

Os principais radionuclídeos presentes no NORM da indústria petrolífera e suas respectivas propriedades são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Principais radionuclídeos de ocorrência natural (NORM) na indústria de petróleo e gás natural

Radionuclídeo	Tempo de meia-vida	Tipo de decaimento	Considerações sobre a cadeia de decaimento e equilíbrio
^{228}Ra	5,75 anos	Beta	Equilíbrio secular com ^{228}Ac em 2 dias, após 10 anos gera ^{228}Th , que originalmente está ausente no depósito. Após, o ^{208}Pb aparece em duas semanas.
^{226}Ra	1,600 anos	Alfa	^{226}Ra inicia o equilíbrio secular (em duas semanas) com os filhos de meia-vida mais curta: ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po . O equilíbrio secular ocorre após cerca de 100 anos.
^{224}Ra	3,66 dias	Alfa	^{224}Ra aparece em amostras novas de água produzida. Com o reaparecimento de ^{228}Th , ^{224}Ra também reaparece em amostras mais antigas.
^{222}Rn	3,8235 dias	Alfa	Elemento gasoso que prefere o fluxo de gás natural. Não atinge equilíbrio com ^{210}Pb .
^{228}Th	1,9116 anos	Alfa	Detectado em amostras mais antigas de sludge e scale, ^{228}Th é provavelmente produto de decaimento de ^{228}Ra . Produz ^{224}Ra .
^{210}Pb	22,30 anos	Beta	Principal produto de decaimento é ^{210}Po .
^{210}Po	138,40 dias	Alfa	Filho do ^{210}Pb , decai para ^{206}Pb estável.

Fonte: Adaptado de IAEA, 2003.

O fluxo de resíduos líquidos mais importante é a água produzida, ou seja, a água bombeada dos poços e separada do óleo e do gás produzidos. Os níveis de radioatividade nas águas produzidas podem ser significativos e os volumes são grandes. A relação entre a água produzida e o petróleo nos poços convencionais é de aproximadamente 10 barris de água produzida por barril de petróleo (EPA, 2021).

A água produzida é o maior fluxo de resíduos gerados nas indústrias de petróleo e gás. Essa água está contaminada com poluentes, tais como metais, sólidos dissolvidos ou em suspensão e compostos orgânicos. As consequências da descarga da água produzida no meio ambiente se tornaram uma preocupação ambiental significativa devido ao crescente volume de resíduos (ABDEL-SABOUR, 2015).

A água produzida contém níveis detectáveis de rádio e filhos, mas as concentrações variam de local para local (EPA, 2021). A água produzida é tratada convencionalmente por meio de diferentes métodos físicos, químicos e biológicos. Em plataformas offshore, devido a restrições de espaço, são utilizados sistemas físicos e químicos compactos (ABDEL-SABOUR, 2015).

Estão sendo desenvolvidos esforços de pesquisa com tecnologias inovadoras para tratar a água produzida, a fim de cumprir com os limites de reutilização e descarga (ABDEL-SABOUR, 2015). No entanto, esse fluxo de resíduos líquidos está fora do escopo deste trabalho, que tem como objetivo abordar soluções para os fluxos de rejeitos sólidos.

Incrustações (*scales*) e lodos (*sludges*) são os principais fluxos de rejeitos sólidos NORM. Os principais tipos de incrustações são as de sulfato e carbonato. As lamas são geralmente acumuladas em fundos de tanques e outros equipamentos, com alto teor de hidrocarbonetos e outros contaminantes, como o mercúrio (IOGP, 2016). Geralmente, as concentrações de atividade dos isótopos de rádio são mais baixas no lodo do que nas incrustações. O contrário se aplica a ^{210}Pb , que geralmente tem uma concentração relativamente baixa em incrustações duras, mas que pode atingir uma concentração de mais de 1000 Bq/g em depósitos de chumbo e lodo (IAEA, 2003). Esses fluxos de resíduos sólidos são descritos na seção seguinte.

Principais rejeitos sólidos NORM

Scales (*incrustações*)

Scales são formadas quando os íons dos elementos do Grupo II, incluindo o rádio, estão presentes na água produzida. Em situações

em que a pressão e a temperatura caem abaixo de certos valores, a solubilidade dos sulfatos e carbonatos misturados na água é superada, o que provoca sua precipitação como incrustações de sulfato e carbonato nas paredes internas dos tubos de produção, cabeças de poço, válvulas, bombas, separadores, vasos de tratamento de água e de gás e tanques de armazenamento de óleo. A deposição ocorre onde o fluxo turbulento, as forças centrípetas e os locais de nucleação proporcionam as oportunidades. Partículas de argila ou areia coproduzidas do reservatório também podem atuar como superfícies que permitem o início da deposição ou podem adsorver os cátions. Se a água do mar, utilizada para melhorar a recuperação de óleo, se misturar com a água de formação, aumentará a concentração de sulfato da água produzida e aumentará a deposição de calcário (IAEA, 2003).

O rádio – ^{224}Ra , ^{226}Ra , e ^{228}Ra – prefere a fase aquosa, levando a concentrações naturalmente aumentadas. Portanto, o rádio seguirá o fluxo de água produzida. O rádio é quimicamente semelhante ao bário (Ba), ao estrôncio (Sr), ao cálcio (Ca) e ao magnésio (Mg) e se incorpora aos depósitos e às incrustações de sulfato ou carbonato do Grupo II (IOGP, 2016).

A deposição de *scales* interfere no processo de produção, de modo que os inibidores de incrustações químicas são comumente usados pelos operadores para evitá-las. Esses produtos químicos impedem que os *scales* de sulfato e carbonato, e também isótopos de rádio, passem pelo sistema de produção e sejam liberados com a água produzida (IAEA, 2003). Assim, o uso de inibidores de incrustações desempenha um papel fundamental na redução da geração de rejeitos NORM.

A extensão da mobilização dos radionuclídeos dos reservatórios e seu aparecimento na água produzida e nos equipamentos de produção varia muito entre as instalações e entre os poços individuais. Em geral, uma maior produção de *scales* é encontrada com maior frequência em instalações produtoras de petróleo do que em instalações de produção de gás (IAEA, 2003).

Por essa razão, não há concentrações típicas de radionuclídeos em NORM O&G, nem quantidades típicas de *scales* sendo produzidos anualmente ou durante a vida útil de um poço (IAEA, 2003). No entanto, há uma estimativa de que aproximadamente 100 toneladas de *scales* por poço de petróleo são geradas anualmente nos Estados Unidos. Como o petróleo em um reservatório sendo explorado diminui, mais água é bombeada com o petróleo e a quantidade de *scales* aumenta (EPA, 2021).

Sludge (lodos) e equipamentos contaminados

Os lodos, conhecidos como *sludge*, são produzidos em fundos de tanques, separadores de gás/óleo, vasos de desidratação, tanques de armazenamento e de resíduos, bem como em raspas de oleodutos de petróleo bruto ou resíduos de limpeza de tubos (IOGP, 2016). O *sludge* geralmente consiste de material oleoso e solto, muitas vezes contendo compostos de sílica, mas também pode conter grandes quantidades de bário. O lodo seco, com baixo teor de óleo, tem uma aparência semelhante à do solo (IAEA, 2013). *Sludge* e equipamentos contaminados também podem conter radionuclídeos que ocorrem dentro de grãos minerais finos de sulfatos e carbonatos que têm sua origem nos mesmos processos que levam a incrustações (IOGP, 2016). Os principais radionuclídeos de interesse são ^{226}Ra , ^{210}Po , ^{210}Pb e ^{228}Ra (IAEA, 2013).

Além da presença de NORM e de hidrocarbonetos pesados nas lamas, observam-se frequentemente níveis elevados de outros poluentes – por exemplo, o mercúrio – associados a riscos ambientais e sanitários próprios. Portanto, as questões relacionadas à radioatividade na gestão de NORM não devem ser consideradas isoladamente (IOGP, 2016). Para o *sludge* em particular, as restrições à disposição de resíduos ou opções de processamento impostas por contaminantes não radioativos serão em muitos casos maiores do que as impostas pelos componentes radioativos (IAEA, 2003).

Em relação às substâncias perigosas não radioativas, a concentração estável de chumbo é alta em todo *sludge* no qual ^{210}Pb é o radionuclídeo dominante. Essas lamas também contêm hidrocarbonetos

não voláteis, incluindo ceras; hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, xileno, tolueno e benzeno; concentrações variáveis e às vezes altas dos metais Pb, Zn e Hg. Em *sludges* de determinados campos de gás na Europa Ocidental, concentrações de mercúrio superiores a 3% (peso seco) não são incomuns (IAEA, 2003).

Devido às variações entre reservatórios na medida em que o *sludge* é produzido e às diferenças nas condições de produção, não há valores de concentrações típicas de radionuclídeos, nem quantidades típicas de *sludge* sendo produzidas anualmente ou durante a vida útil de um poço (IAEA, 2003). Apesar disso, estima-se nos EUA que os processos de produção de petróleo utilizados na perfuração convencional geram 230.000 MT ou 141 m³ de *sludge* com NORM a cada ano. A maior parte permanece no estoque de petróleo e tanques de armazenamento de água (EPA, 2021).

Pó-preto

A primeira menção à radioatividade associada ao gás natural foi feita já em 1904 por McLennan (1904), que analisou o gás natural de várias províncias canadenses e estimou seu conteúdo de radônio. Entretanto, foi somente em 1971 que se descobriu que o radônio se concentrava nos líquidos mais leves de gás natural durante o processamento e representaria um sério risco à saúde do pessoal da indústria, em particular aos funcionários de manutenção (GRAY, 1990). Quando o gás natural é processado para produzir o gás natural liquefeito, grande parte do radônio é removido, porque seu ponto de ebulição fica entre os pontos de ebulição do etano e do propileno (GRAY, 1990 e 1993).

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos alifáticos leves, principalmente metano, e alguns gases inorgânicos. O gás natural pode ser classificado em dois grupos de acordo com o reservatório. O chamado gás associado é dissolvido no petróleo ou mantido sob uma manta de gás; nesse caso, a produção de gás é determinada diretamente pela produção de petróleo. Composto as maiores ocorrências de gás no mundo, o gás não associado é aquele que, enquanto ainda em reservatórios, permanece livre ou junto com

pequenas quantidades de petróleo. Normalmente, o gás natural é processado antes de seu uso e, a princípio, os contaminantes como água e compostos de enxofre são removidos. Nas instalações de processamento de gás natural, o gás é fracionado em três correntes principais: metano+etano (gás processado ou residual), propano+butano (gás liquefeito de petróleo ou gás de cozinha) e um produto chamado gasolina natural.

Devido às características intrínsecas de exploração e produção de cada planta de produção de gás natural, quantidades variáveis de ^{210}Pb são acumuladas em tubos, válvulas e tanques, onde foram encontradas concentrações de 32 kBq/kg até 1,6 MBq/kg (BLAND e CHIU, 1996; HARTOG et al., 1998 e 2002; GRAY, 1990 e 1993; SCHMIDT, 1998). Pelas mesmas razões, os depósitos de ^{210}Pb têm composições químicas diferentes. Os depósitos de material em gasodutos de gás natural são genericamente chamados de pó preto, devido à presença de sulfeto de ferro e sua subsequente oxidação, ou oxidação direta do tubo, criando óxidos de ferro (Baldwin, 1998). Entretanto, outros compostos químicos também foram relacionados, como chumbo metálico, óxidos de chumbo, sulfeto de chumbo (galena), sulfeto de zinco (esfalerita), sulfato de bário (barita) e carbonato de cálcio (calcita), entre outros (HARTOG et al., 1998; SCHMIDT, 1998). ^{210}Pb é frequentemente não suportado e ^{226}Ra parece estar relacionado tanto à água produzida quanto à distância do poço produtor (HARTOG et al., 1998; SCHMIDT, 1998).

Nowak et al. (2020) estudaram o conteúdo de ^{210}Pb em um gasoduto na Polônia e concluíram que as maiores concentrações de radionuclídeos foram observadas no pó preto acumulado no cartucho do filtro das unidades compressoras de gás, valores de até 16,7 kBq/kg foram medidos. Por outro lado, o pó preto resultante da limpeza de *pig* mostrou concentrações muito mais baixas, 3,4 kBq/kg.

No Brasil, Godoy et al. (2005) realizaram um estudo envolvendo amostras de pó preto do gasoduto da Bacia de Campos. As amostras foram analisadas por difração de raios X, e os resultados indicaram a presença de Fe_2O_3 (magnetita) e SiO_2 (sílica) e, em uma extensão inferior, FeCO_3 (siderita) e CaCO_3 (calcita). Com base na

análise química, a composição média de pó preto foi calculada e é representada na Figura 4. Durante este trabalho, foi identificada uma grande variabilidade no conteúdo de ^{210}Pb (0,04 – 8,75 kBq/kg), que poderia ser atribuída à frequência da operação de *pigging* dos tubos. Os radionuclídeos ^{226}Ra e ^{228}Ra também foram medidos e concluiu-se que seu conteúdo decresce com a distância até a plataforma. Durante este trabalho, foi observada uma estreita correlação entre ^{210}Pb e Zn (Figura 5): $^{210}\text{Pb} = (7,80 \pm 0,90) * \text{Zn} - (0,55 \pm 0,10) * \text{Ba}$, $R^2 = 0,932$, $N = 14$.

Figura 4. Composição química média das amostras de pó preto de gasodutos da Bacia de Campos

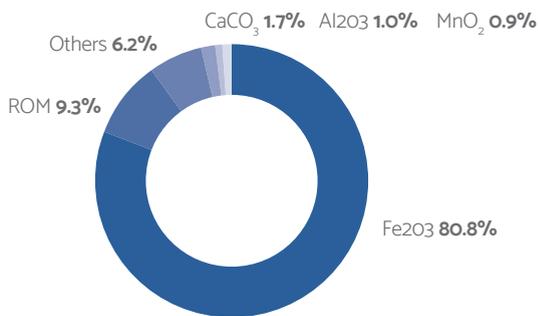
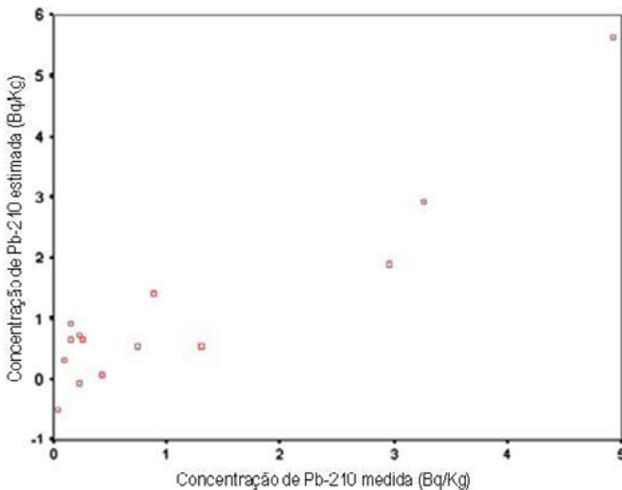


Figura 5. Valores previstos de ^{210}Pb versus valores de ^{210}Pb observados



Riscos do NORM para a saúde humana e o meio ambiente

A indústria de petróleo e gás é continuamente desafiada a atingir alta eficiência de operação mantendo um alto padrão de segurança, incluindo a necessidade de manter o controle sobre as exposições ocupacionais à radiação, bem como de proteger o público e o meio ambiente por meio do gerenciamento adequado de resíduos que podem ser radiologicamente e quimicamente perigosos (IAEA, 2003).

Exposições ocupacionais

Na ausência de medidas adequadas de proteção contra radiação, o NORM na indústria de petróleo e gás poderia causar exposição externa durante a produção, devido ao acúmulo de radionuclídeos emissores de radiação gama, e exposições internas de trabalhadores e outras pessoas, particularmente durante a manutenção, o transporte de resíduos e equipamentos contaminados, a descontaminação de equipamentos e o processamento e a disposição de resíduos. Exposições de natureza similar também podem surgir durante o descomissionamento de instalações de produção de petróleo e gás e de suas instalações associadas de gerenciamento de resíduos (IAEA, 2003).

Exposição externa

A deposição de incrustações e lodos contaminados em tubos e vasos pode produzir taxas de dose significativas dentro e fora desses componentes. A geração dos isótopos de vida curta de rádio, em particular ^{226}Ra , emite radiação gama capaz de penetrar nas paredes desses componentes, e o fóton de alta energia emitido por ^{208}Tl (uma das descendências do ^{228}Th) pode contribuir significativamente para a taxa de dose em superfícies externas quando a incrustação tem se acumulado durante um período de vários meses (IAEA, 2003).

As taxas de dose dependem da quantidade e das concentrações de atividade dos radionuclídeos presentes no interior dos tubos ou dos vasos e da blindagem fornecida pelas paredes dos mesmos. As taxas de dose máximas estão geralmente na faixa de até alguns

microsieverts por hora. Em casos excepcionais, as taxas de dose medidas diretamente nas superfícies externas do equipamento de produção atingiram várias centenas de microsievverts por hora, o que é cerca de mil vezes maior do que os valores de background normais. Por essa razão, o acúmulo de incrustações de rádio pode ser monitorado sem abrir a planta ou o equipamento. Onde houver incrustações, a exposição externa pode ser restringida apenas pela maximização da distância dos componentes envolvidos e pela minimização da duração da exposição. Na prática, as restrições de acesso e tempo de ocupação são consideradas eficazes para limitar as doses anuais a valores baixos (IAEA, 2003).

Os depósitos compostos quase exclusivamente de ^{210}Pb não podem ser avaliados por medidas fora de uma planta ou equipamento fechados. Nem as baixas emissões gama de energia do ^{210}Pb nem as partículas beta emitidas penetram nas paredes de aço. Portanto, ^{210}Pb não contribui significativamente para a dose externa e sua presença só pode ser avaliada quando os componentes são abertos (IAEA, 2003).

Exposição interna

A exposição interna ao NORM pode resultar da ingestão ou inalação de radionuclídeos. Isso pode ocorrer durante o trabalho em uma planta ou equipamento abertos, durante o manuseio de materiais residuais e objetos contaminados na superfície, e durante a limpeza de equipamentos contaminados. A ingestão também pode ocorrer se não forem tomadas precauções antes de comer, beber, fumar etc. (IAEA, 2003).

São necessárias precauções efetivas durante as operações anteriormente mencionadas para conter a contaminação radioativa e impedir sua transferência para áreas onde outras pessoas também possam estar expostas. As características não radioativas das incrustações e da lama também exigem medidas de segurança convencionais e, portanto, o risco de ingestão de NORM provavelmente será muito baixo. Entretanto, a limpeza de superfícies

contaminadas durante reparos, substituições, reformas ou outros trabalhos pode gerar material radioativo transmitido pelo ar, particularmente se forem usadas técnicas abrasivas secas. A exposição por inalação pode tornar-se significativa se não forem utilizados equipamentos de proteção pessoais eficazes (incluindo proteção respiratória) e/ou controles de engenharia (IAEA, 2003).

Exposição pública geral e ambiental

Um elemento-chave relacionado ao NORM é que as exposições são geralmente bastante baixas e abaixo dos níveis de ação estabelecidos pela regulamentação. Em algumas situações, a exposição à radiação ionizante de baixo nível pode não resultar em efeitos adversos à saúde, daí a base para o desenvolvimento de regulamentos de saúde baseados em níveis de ação (ALVES, 2012).

Os efeitos determinísticos ocorrem em doses superiores a 0,5 - 1 Gy. Esses limites variam com a taxa de dose e com a energia. A intensidade do efeito aumenta com o aumento da dose e da taxa de dose. Embora, mesmo nos piores cenários envolvendo o NORM na indústria petrolífera, os efeitos determinísticos nunca sejam encontrados, devido à abundância relativamente baixa do material radioativo e à tendência de muitos tipos de NORM se autoabsorverem (IOGP, 2016). A exposição ao NORM não terá efeitos agudos ou severos similares aos efeitos associados à exposição a níveis mais elevados de radiação de fontes artificiais (ALVES, 2012). A proteção contra radiação no campo do NORM diz respeito exclusivamente a um controle adequado da exposição a baixas doses, uma situação em que somente efeitos estocásticos podem ocorrer. Os efeitos estocásticos são uma consequência da exposição à radiação ionizante, mesmo em baixas doses, que pode causar danos ao material nuclear (genético) nas células. Essa exposição pode resultar (ou não) no desenvolvimento de câncer induzido por radiação muitos anos depois (efeitos somáticos) ou doença hereditária nas gerações futuras, se ocorrer mutação das células reprodutivas (IOGP, 2016).

Os materiais NORM são frequentemente gerados em grandes volumes, com baixa atividade, e necessitam de manejo adequado

e seguro. O manuseio, o armazenamento, o transporte e o uso de equipamentos contaminados ou com resíduos de NORM podem levar à disseminação da contaminação e provocar a contaminação de áreas terrestres, resultando em exposição potencial para o público (ALVES, 2012).

A disposição inadequada, a reutilização e a reciclagem do NORM têm causado situações que resultam em eventos de contaminação e exposições desnecessárias dos trabalhadores e da população em geral (IAEA, 2003).

Controle de instalações com presença do NORM

Os procedimentos básicos de controle devem ser praticados ao operar em ou ao redor de potenciais locais do NORM. O principal procedimento é identificar uma pessoa adequadamente treinada e qualificada, responsável pela gestão do risco, e assegurar que ela opere dentro de um sistema de gestão e controle de trabalho mais amplo do NORM.

Além disso, é importante estabelecer um limite ao redor da área de trabalho e colocar sinais de alerta de radiação. Isso deve ser proporcional ao nível de contaminação e reavaliado sempre que o nível de informação específica do local mudar.

O limite deve ser tão pequeno quanto razoavelmente praticável, mas grande o suficiente para permitir o acesso de pessoal e de equipamentos a partir da área de trabalho. Uma barreira eficaz define a extensão da área contaminada e controla a exposição aos limites regulamentares para os membros do público (IOGP, 2016).

Referências

- ABDEL-SABOUR, M. NORM in Waste Derived From Oil and Gas Production. *Middle East Waste Management Summit*, December, p. 25, 2015.
- ALVES, M. R. F. *Opções tecnológicas para deposição de TENORM da indústria de exploração e produção de petróleo no Brasil*. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Sergipe, 2012.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Combustíveis 2020*. Rio de Janeiro: 2020.
- BALDWIN, R. M.. *Here are procedures for handling persistent black powder contamination*. Oil and Gas Journal 96, 51–58 Oct. 26, 1998.
- BLAND, C. J., CHIU, N. W., . *Accumulation of Pb-210 activity on particulate matter in LPG rail cars*. Applied Radiation and Isotopes 47, 925–926, 1996.
- EPA – United States Environmental Protection Agency. *TENORM: Oil and Gas Production Wastes (2021)*..
- EQUINOR. *Equinor: o que fazemos (2021)*.
- GODOY, J. M. e CRUZ, R. P. ^{226}Ra and ^{228}Ra in scale and sludge samples and their correlation with the chemical composition. *J Environ. Radioact.*; 70(3):199–206. 2003.
- GODOY, J. M. et al. ^{210}Pb content in natural gas pipeline residues (“black-powder”) and its correlation with the chemical composition. *Journal of Environmental Radioactivity* 83, 101–110, 2005.
- GRAY, P.. *Radioactive materials could pose problems for the gas industry*. Oil and Gas Journal, 45–48. June 26, 1990.
- GRAY, P.. *Norm contamination in the petroleum industry*. *Journal of Petroleum Technology* 45, 12–16, 1993.
- HARTOG, F. A. et al. *Origin and encounter of Pb-210 in E&P facilities*. In: *Proceedings of 2nd NORM Symposium*, Krefeld, pp. 53–57, 1998.
- HARTOG et al.. *Lead deposits in Dutch gas systems*. *SPE Production and Facilities* 17 (2), 122–128, 2002.
- IAEA. *Management of NORM Residues - IAEA-TECDOC-1712*. Vienna: IAEA, 2013
- IAEA. *Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry. Safety Reports Series N° 34*. Vienna: IAEA, 2003.
- IOGP – International Association of Oil & Gas Producers. *Guidelines for the Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in the Oil and Gas Industry. Report 412 (Version 2.0)*. [S.l: s.n.], 2016.
- MATTA, L. E. et al. ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{228}Th in scale and sludge samples from the Campos Basin oilfield and E&P activities. *Rad. Prot. Dos.* 102, 175–178, 2002.
- MCLENNAN, J. C.. *On the radioactivity of mineral oils and natural gases*. In: *Proceedings of the International Electrical Congress*, Saint Louis, Canada, pp. 398–422, 1904.

- MILANI, E. J. et al. *Petróleo na Margem Continental Brasileira*. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 18, n. 3, p. 351–396, 2000.
- NOWAK, J. et al.. *Radioactivity of the gas pipeline network in Poland*. *Journal of Environmental Radioactivity* 213, 106143, 2020.
- SANCHES, M. *Por que o preço do petróleo americano caiu abaixo de zero e como isso afeta o mundo?* BBC, 2020.
- SCHMIDT, A. P.. *Lead precipitates from natural gas production installations*. *Journal of Geochemical Exploration* 62, 193–200, 1998.
- VEGUERIA, S. F. J. et al. *Environmental impact studies of barium and radium discharges by produced waters from the “Bacia de Campos” oil-field offshore platforms, Brazil*. *J. Environ. Rad.* 62, 28–38, 2002.



LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

Legislação ambiental

Licenciamento ambiental

Competência para o licenciamento ambiental

As licenças ambientais, conforme definido pela Resolução CONAMA nº 237/1997, são o ato administrativo pelo qual o órgão ambiental competente (federal, estadual ou municipal) estabelece as condições, as restrições e as medidas de controle ambiental que deverão ser obedecidas pelo empreendedor, pessoa física ou jurídica, para localizar, instalar, ampliar e operar empreendimentos ou atividades utilizadoras dos recursos ambientais consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou aquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental (BRASIL, 1997).

Com a promulgação da Lei Complementar Federal nº 140/2011, foi regulamentada a competência comum entre os entes federativos (União, Estado, Distrito Federal e municípios). Além disso, foram fixadas normas de cooperação entre eles, reduzindo assim as superposições e os conflitos de atuação (BRASIL, 2011).

A referida lei estabelece (art. 13) a obrigatoriedade do licenciamento ambiental em um único nível de competência, ou seja, os empreendimentos e as atividades são licenciados ou autorizados, ambientalmente, por um único ente federativo. Os demais entes federativos interessados podem manifestar-se ao órgão responsável

pela licença ou autorização, de maneira não vinculante, respeitados os prazos e os procedimentos do licenciamento ambiental (BRASIL, 2011).

Os processos de licenciamento ambiental que vão além da competência e da qualificação municipais, mas não são aplicáveis à União, são de responsabilidade dos órgãos ambientais estaduais e do Distrito Federal. Foi definido que caberia aos municípios o licenciamento de atividades e empreendimentos que causem ou possam causar impacto ambiental de âmbito local, bem como os localizados em unidades de conservação instituídas pelo município, exceto em Áreas de Proteção Ambiental (APAs) e naquelas delegadas pelo Estado por instrumento legal ou convênio (BRASIL, 2011).

Na ausência de um órgão ambiental qualificado ou conselho ambiental no município, a entidade estadual deve realizar ações administrativas municipais até a sua criação. Por sua vez, na ausência de um órgão ambiental qualificado ou conselho ambiental no estado ou no município, a Federação deve realizar ações administrativas até a criação do conselho em um desses entes federativos (MMA, 2020).

As atribuições do IBAMA (Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, órgão ambiental federal), determinadas pela Resolução CONAMA nº 237/1997 e fundamentadas no conceito de significância e abrangência do impacto ambiental direto decorrente do empreendimento ou da atividade (BRASIL, 1997), foram complementadas e acrescidas da competência de novas ações administrativas (BRASIL, 2011).

Dentre essas ações administrativas estão a promoção do licenciamento ambiental de projetos e atividades destinadas à pesquisa, mineração, produção, processamento, transporte, *armazenamento e disposição de material radioativo em qualquer estágio* (grifo nosso), ou aquelas que utilizam energia nuclear em qualquer uma de suas formas e aplicações, seguindo a orientação da Comissão Nacional de Energia Nuclear (BRASIL, 1997 e BRASIL, 2011).

Além disso, a presente publicação sobre a legislação foi feita por meio de consulta direta aos órgãos estaduais do Rio de Janeiro

– Instituto Estadual de Meio Ambiente (INEA); do Espírito Santo – Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA); e de São Paulo – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) – quanto ao seu mandato de licenciamento de atividades com materiais radioativos. Os três órgãos confirmaram que o licenciamento dessas atividades é de âmbito federal, exceto, pelo menos no caso do Rio de Janeiro, para o transporte de material radioativo, que deve ser regulamentado em nível estadual (detalhes sobre o transporte podem ser encontrados na seção “Regulamentação do transporte de materiais radioativos”).

Pode-se concluir que as atividades relacionadas ao gerenciamento de resíduos NORM no Brasil serão licenciadas pelo órgão ambiental federal. Essas atividades incluem armazenamento, disposição final e tratamento, tais como tratamento térmico ou outros, classificados como processamento de material radioativo.

Legislação referente ao licenciamento ambiental em nível federal

Os principais instrumentos legais que regem o licenciamento ambiental no Brasil são a Lei Federal nº 6.938/1981 (BRASIL, 1981), a Resolução CONAMA nº 1/1986 (BRASIL, 1986), a Resolução CONAMA nº 237/1997 (BRASIL, 1997) e a Lei Complementar Federal nº 140/2011 (BRASIL, 2011). A Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), Lei Federal nº 6.938/1981 (BRASIL, 1981), consolidou no Brasil a necessidade de realização de licenciamento ambiental para atividades potencialmente poluidoras.

Em 1986, com a publicação da Resolução CONAMA nº 1/1986 (BRASIL, 1986), foram estabelecidos os critérios básicos e as diretrizes gerais para a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA). Por meio da Resolução CONAMA nº 1/1986 (BRASIL, 1986), foram determinadas as principais atividades modificadoras do meio ambiente que dependem da elaboração de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e seu respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA).

O licenciamento ambiental de um novo projeto ou atividade é realizado com a emissão das seguintes licenças (BRASIL, 1997):

I – Licença Prévia (LP) – concedida na fase preliminar do planejamento do empreendimento ou atividade, aprovando sua localização e sua concepção, atestando a viabilidade ambiental e estabelecendo os requisitos básicos e condicionantes a serem atendidos nas próximas fases de sua implementação;

II – Licença de Instalação (LI) – autoriza a instalação do empreendimento ou atividade de acordo com as especificações constantes dos planos, programas e projetos aprovados, incluindo as medidas de controle ambiental e demais condicionantes, da qual constituem motivo determinante;

III – Licença de Operação (LO) – autoriza a operação da atividade ou empreendimento, após a verificação do efetivo cumprimento do que consta das licenças anteriores, com as medidas de controle ambiental e condicionantes determinados para a operação.

De acordo com a Resolução 237/1997 (BRASIL, 1997), o procedimento de licenciamento ambiental obedecerá às seguintes etapas:

I – Definição pelo órgão ambiental competente, com a participação do empreendedor, dos documentos, projetos e estudos ambientais necessários ao início do processo de licenciamento, correspondente à licença a ser requerida;

II – Requerimento da licença ambiental pelo empreendedor, acompanhado dos documentos, projetos e estudos ambientais pertinentes, dando-se a devida publicidade;

III – Análise, pelo órgão ambiental competente, dos documentos, projetos e estudos ambientais apresentados e a realização de vistorias técnicas, quando necessárias;

IV – Solicitação de esclarecimentos e complementações pelo órgão ambiental competente, uma única vez, em decorrência da análise dos documentos, projetos e estudos ambientais apresentados, quando couber, podendo haver a reiteração da mesma solicitação caso os esclarecimentos e as complementações não tenham sido satisfatórios;

- V** – Audiência pública, quando couber, de acordo com a Resolução CONAMA n° 9, de 3 de dezembro de 1987 (BRASIL, 1987);
- VI** – Solicitação de esclarecimentos e complementações pelo órgão ambiental competente, decorrentes de audiências públicas, quando couber, podendo haver reiteração da solicitação quando os esclarecimentos e as complementações não forem satisfatórios;
- VII** – Emissão de parecer técnico conclusivo e, quando couber, parecer jurídico;
- VIII** – Deferimento ou indeferimento do pedido de licença, dando-se a devida publicidade.

A Instrução Normativa nº 19/2018 especifica a tabela “Enquadramento do Uso e Manuseio de Radioisótopos – UMR – no Licenciamento Ambiental Federal – LAF”, que relaciona as instalações a serem licenciadas pela ANSN¹ e seu enquadramento no licenciamento ambiental. Entretanto, destaca que, independentemente da orientação na tabela, o IBAMA determina, caso a caso, a necessidade de licenciamento ambiental e de exigência de EIA/RIMA e Audiência Pública (AP), associada a empreendimentos de significativo impacto ambiental; ou a necessidade de Relatório Ambiental Simplificado (RAS) e Reuniões Técnicas Informativas (RTI), que podem ser exigidos a empreendimentos de pequeno potencial de impacto ambiental (BRASIL, 2018). Essa instrução também estabelece os procedimentos para regularização e licenciamento de projetos ou atividades existentes antes desse instrumento legal (BRASIL, 2018).

Na referida tabela, depósitos de rejeitos radioativos classe 2 (classe em que se enquadram os rejeitos NORM embalados, segundo a CNEN 8.01) estariam sujeitos a licenciamento a partir de RAS e RTI.

Verificou-se a competência em âmbito federal para licenciamento das atividades que envolvem radionuclídeos, conforme colocado no item anterior. Entretanto, convém citar a publicação

¹ Ver seção “Legislação nuclear”, sobre detalhes da criação da ANSN.

“Procedimentos de licenciamento ambiental do Brasil”, em que foi centralizada a informação referente ao licenciamento ambiental em todos os estados e no Distrito Federal, uma vez que os órgãos ambientais licenciadores possuem autonomia para definir seus procedimentos e critérios, o que leva à formação de um cenário heterogêneo no que se refere ao licenciamento ambiental no país (MMA, 2016).

Legislação sobre resíduos perigosos

A classificação dos resíduos no Brasil é normatizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da norma brasileira 10.004/2004 (ABNT, 2004a). A norma classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados.

- **Classe I** – *resíduos perigosos: aqueles que apresentam periculosidade, ou uma das características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e/ou patogenicidade;*
- **Classe IIA** – *resíduos não inertes e não perigosos: aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos Classe I – Perigosos ou de Classe IIB. Resíduos desta classe podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade à água;*
- **Classe IIB** – *quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme anexo da referida norma.*

Como foi dito anteriormente para as normas ambientais, a NBR 10004 também afirma que “os resíduos radioativos não são objeto desta Norma, pois são de competência exclusiva da Comissão Nacional de Energia Nuclear”.

A NBR 10004 é complementada pelas normas NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos (ABNT, 2004b), NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos (ABNT, 2004c) e NBR 10007, para amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2004d), que acrescentam diretrizes para a classificação de rejeitos.

A norma que estabelece as condições necessárias para o armazenamento de resíduos perigosos é a NBR 12235 (ABNT, 1992). Considerando resíduos sólidos perigosos Classe I, como definidos na NBR 10004, essa norma define armazenamento como “contenção temporária de resíduos, em área autorizada pelo órgão de controle ambiental, à espera (grifo nosso) de reciclagem, recuperação, tratamento ou disposição final adequada, desde que atenda às condições básicas de segurança”. Essa norma não se aplica, portanto, aos depósitos finais de rejeitos.

Em linhas gerais, a NBR 12235 estabelece a necessidade de compatibilidade dos resíduos a serem armazenados num mesmo depósito, de registros de movimentação e armazenamento de resíduos, além de estabelecer diretivas para a prevenção de contaminação ambiental, como bacias de contenção, manuseio seguro, treinamento de pessoal, procedimentos de inspeção e estabelecimento de planos de emergência.

No que concerne à disposição final de resíduos perigosos, a NBR 10.157 define critérios para projeto, construção e operação de aterro para resíduos perigosos. A norma fixa as condições mínimas exigíveis para o projeto e a operação de aterros de resíduos perigosos, de forma a proteger adequadamente as coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, bem como os operadores dessas instalações e as populações vizinhas (ABNT, 1987).

Para assegurar o projeto, a instalação e a operação adequados de um aterro de resíduos perigosos, a norma estabelece exigências relativas à localização, segregação/compatibilidade e análise de resíduos, monitoramento, inspeção, impermeabilização do aterro, drenagens e tratamento do líquido percolado, fechamento da instalação e treinamento de pessoal. A qualidade das águas

subterrâneas na área da instalação deve atender aos padrões de potabilidade estabelecidos na legislação vigente.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos foi instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que dispõe sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis (BRASIL, 2010). Essa lei não se aplica aos rejeitos radioativos, porém convém ressaltar um de seus conceitos: o de responsabilidade compartilhada; ou seja, um conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, dos importadores, dos distribuidores, dos comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços de manejo dos resíduos sólidos para minimizar o volume de resíduos e reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos. Esse compartilhamento de responsabilidades se opõe ao vigente no que concerne a rejeitos radioativos, para os quais, conforme explicado no item sobre legislação sobre resíduos perigosos, as responsabilidades são transferidas do gerador para a CNEN de acordo com o tipo de depósito de rejeitos.

Em esclarecimento sobre a inclusão de rejeitos radioativos na categoria “perigosos”, corriqueiramente citada na legislação ambiental, convém assinalar que a Instrução Normativa IBAMA nº 13 de 18 de dezembro de 2012 (Lista Brasileira de Resíduos Sólidos) inclui como material perigoso: “Materiais resultantes de atividades humanas que contenham radionuclídeos” e remete a sua classificação à norma 8.01 da CNEN (IBAMA, 2012).

Tratamento de resíduos perigosos

Algumas alternativas, como o tratamento térmico ou a reinjeção dos resíduos NORM, poderiam ser soluções apontadas pelo estudo no futuro; portanto, o presente item apresenta uma breve revisão da legislação sobre esses tópicos.

Tratamento térmico

O tratamento térmico de resíduos é regulamentado por dois instrumentos legais do CONAMA: a Resolução 316/2002, que prevê procedimentos e critérios para a operação de sistemas de tratamento térmico de resíduos, e a Resolução 499/2020, que regulamenta o coprocessamento de resíduos em fornos rotativos para a produção de clínquer (e revoga a Res. CONAMA 264/1999). Nenhum dos dois instrumentos contempla os resíduos radioativos, que devem seguir os regulamentos específicos da Comissão Nacional de Energia Nuclear (BRASIL, 2002; BRASIL, 2020).

A Norma Brasileira NBR 11.175: Incineração de resíduos sólidos perigosos – padrões de desempenho – procedimento (ABNT, 1990), analogamente à legislação ambiental, não contempla rejeitos radioativos, pois aplica-se ao resíduos classificados segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004a).

Reinjeção

A reinjeção de resíduos em poços não é uma prática comum e, portanto, não está regulamentada na legislação ambiental nacional.

A prática “injeção profunda (por exemplo, injeção de resíduos bombeáveis em poços, formações salinas ou depósitos de ocorrência natural etc.)” é citada como uma “operação de tratamento e de disposição” na Instrução Normativa 1, de 25 de janeiro de 2013, que regulamenta o Cadastro Nacional de Operadores de Resíduos Perigosos – CNORP (IBAMA, 2013).

A Instrução Normativa nº 1, de 2 de janeiro de 2018 (IBAMA, 2018a), que define diretrizes que regulamentam as condições ambientais de uso e descarte de fluidos, cascalhos e pastas de cimento nas atividades de perfuração marítima de poços e produção de petróleo e gás, estabelece o Projeto de Monitoramento de Fluidos e Cascalhos, e determina outras providências, foi suspensa até a resolução da divergência jurídica entre os órgãos de assessoramento jurídico do IBAMA e da Agência Nacional do Petróleo (IBAMA, 2019).

Legislação nuclear

A partir do período de tempo da redação deste relatório, a criação da nova agência reguladora nuclear, ANSN – Agência Nacional de Segurança Nuclear, estava em processo de criação. Até o presente momento a CNEN tem sido a organização responsável pela regulamentação nuclear e pela promoção das atividades nucleares no país. Portanto, todas as normas da CNEN citadas neste livro ainda estão sendo nomeadas e citadas como normas da CNEN. A partir de agora, a ANSN assumirá o papel regulatório da CNEN, como ficará claro na Lei 10308/2001 revisada.

A legislação nuclear para rejeitos radioativos é baseada na Lei 10308/2001, que prevê requisitos para a seleção do local, construção, licenciamento, operação, inspeção, custos, indenização, responsabilidade civil e garantias relacionadas aos depósitos de rejeitos radioativos, e outras medidas (BRASIL, 2001).

O artigo 2º da Lei 10308/2001 estabelece que “a CNEN é responsável pelo destino final dos resíduos radioativos gerados no território nacional”. Os artigos 3º e 4º definem três tipos de depósitos de resíduos radioativos: depósitos iniciais, depósitos intermediários e depósitos finais, que devem ser construídos, licenciados, gerenciados e operados de acordo com critérios, procedimentos e normas estabelecidos até agora pela CNEN e, a partir de agora, pela ANSN.

Em seu segundo capítulo, a Lei 10308/2001 trata da “Seleção do Local para Depósitos”. No artigo 6º estabelece que: “A seleção de locais para a instalação de depósitos intermediários e finais atenderá aos critérios, procedimentos e normas estabelecidos pela ANSN”. Para tratar desse aspecto, foi publicada a CNEN NE 6.06: 1990, “Seleção e escolha de locais para depósitos de rejeitos radioativos”. No item 1.2., que descreve seu “campo de aplicação”, essa norma estabelece que: “Esta Norma se aplica à localização de depósitos finais, intermediários ou provisórios para rejeitos radioativos de níveis baixos e intermediários de radiação”. Mais tarde, no item 3 – “Definições e Siglas”, define “rejeitos radioativos de baixos e intermediários níveis de radiação” como sendo “rejeitos radioativos

com meia-vida curta” com “atividades que decaem para níveis aceitáveis em tempo menor ou igual a 300 anos” e com “número insignificante de emissores alfa, que apresentam baixa e/ou média radiotoxicidade” (CNEN, 1990). Portanto, essa norma não se aplica a rejeitos de meia-vida longa com uma presença significativa de emissores alfa, excluindo assim os processos de seleção de rejeitos NORM de óleo e gás.

Os *depósitos iniciais* são destinados ao armazenamento de rejeitos radioativos no local da instalação nuclear que os gerou, por um período de tempo definido. São de responsabilidade do detentor (pessoa física ou jurídica, pública ou privada) da autorização concedida pela ANSN para operar a instalação onde os resíduos são gerados. Esse titular é responsável pelo projeto, pela construção e pela instalação do depósito, incluindo os custos (artigos 8° e 16°); é também responsável pela administração e pela operação do depósito (artigos 12° e 16°); pela remoção dos resíduos para depósitos intermediários ou finais, arcando com todas as despesas diretas e indiretas; e pelos custos relacionados à seleção do local, ao licenciamento e à segurança do depósito (artigo 16°). O titular da autorização da ANSN para operar a instalação também é responsável por quaisquer danos causados aos indivíduos, à propriedade e ao meio ambiente pelos rejeitos ali depositados, independentemente de culpa ou intenção (art. 19°).

O parágrafo 1° do artigo 4° define que “os depósitos iniciais utilizados para o armazenamento de rejeitos das instalações de extração ou beneficiamento de minério podem ser convertidos em depósitos finais, com a autorização expressa da ANSN”. Esse parágrafo se aplica às instalações minero-industriais, que são reguladas pelas exigências da norma CNEN-N.N.-4.01:2016, que prevê requisitos para autorização, para a posse, uso e armazenamento de minérios, matérias-primas e outros materiais contendo radionuclídeos da série urânio natural e/ou tório nas instalações minero-industriais nas quais são extraídos, beneficiados e processados, incluindo locais para armazenamento inicial de escória e resíduos radioativos (CNEN, 2016). Tais minérios e escória são

armazenados a granel, sem embalagem e em grandes quantidades no local da instalação. Esse não é o caso dos resíduos NORM O&G, como será explicado mais adiante.

A lei estipula que (art. 7°) “é proibido depositar rejeitos de qualquer tipo nas ilhas oceânicas, na plataforma continental e nas águas territoriais brasileiras”, e esses são os locais onde atualmente se concentram as maiores reservas brasileiras de petróleo (BRASIL, 2001).

O *depósito intermediário* destina-se a receber e, eventualmente, armazenar rejeitos radioativos, visando à sua remoção para um *depósito final*, que é o depósito destinado à deposição final de rejeitos radioativos, em conformidade com os critérios de aceitação estabelecidos na CNEN-N.N.-6.09: 2002, que trata dos “critérios de aceitação para a deposição de rejeitos radioativos com baixos e médios níveis de radiação”. Essa norma, entretanto, não se aplica aos materiais contaminados com NORM O&G, como estabelece nas definições: “Resíduos com baixos e médios níveis de radiação – são resíduos contendo predominantemente radionuclídeos emissores Beta e Gama com meia-vida da ordem de 30 anos” (CNEN, 2002).

No artigo 9° da Lei 10308, está estabelecido que: “A CNEN é responsável pelo projeto, construção e instalação de depósitos intermediários e finais de rejeitos radioativos”, portanto essas instalações estão sob a responsabilidade da CNEN. O parágrafo único desse mesmo artigo descreve: “Pode haver delegação dos serviços previstos no caput a terceiros, mantendo a total responsabilidade da CNEN.”

A Lei 10308 define no artigo 23° que as autorizações para a operação de depósitos iniciais, intermediários ou finais estão sujeitas à prestação das garantias previstas na Lei nº 6453, de 17 de outubro de 1977, que “prevê responsabilidade civil por danos nucleares e responsabilidade criminal por atos relacionados às atividades nucleares” (BRASIL, 1977).

Para a gestão de rejeitos, havia a norma CNEN NE 6.05:1985, que estava desatualizada e foi revogada em 2014. Uma nova norma com o mesmo escopo foi desenvolvida pela CNEN e também

publicada em 2014. Esta é a norma *CNEN-N.N.-8.01* (CNEN, 2014a), que estabelece os “critérios gerais e requisitos básicos de segurança e proteção radiológica relacionados ao gerenciamento de rejeitos radioativos para baixos e médios níveis de radiação, bem como rejeitos radioativos de meia-vida muito curta”. Ela se aplica ao gerenciamento de resíduos radioativos de Classe 1 e Classe 2 embalados em containers, ou seja, a norma não se aplica ao gerenciamento de rejeitos a granel. Nessa norma, os rejeitos NORM da indústria petrolífera enquadram-se na Classe 2.2, “Rejeitos contendo radionuclídeos naturais (RBMN-RN): rejeitos da extração e exploração de petróleo, contendo radionuclídeos das séries do urânio e tório em concentrações de atividade ou atividades acima dos níveis de isenção estabelecidos no Anexo VI desta Norma”. A norma apresenta um guia para a preparação do plano de gerenciamento de rejeitos radioativos, um requisito obrigatório para cada depósito.

A Lei 10308/2001 (BRASIL, 2001) estabeleceu o quadro legal para o licenciamento de depósitos de rejeitos que só foram regulamentados com a publicação da norma *CNEN-N.N.-8.02:2014* (CNEN, 2014b). Essa norma estabelece os critérios gerais e os requisitos básicos de segurança e proteção radiológica relacionados ao licenciamento de depósitos iniciais, intermediários e finais de rejeitos radioativos de baixos e médios níveis de radiação. Em seu terceiro parágrafo, ela indica que não se aplica ao licenciamento de depósitos de rejeitos radioativos de Classe 2.2 que não estão embalados. Os rejeitos radioativos da classe 2.2 devem ser armazenados em depósitos próximos à superfície ou a uma profundidade definida pela análise de segurança (CNEN, 2014b). Também se observa que a norma estabelece requisitos específicos do Relatório de Local para depósito final de rejeitos da Classe 2.1, do Relatório Final de Análise de Segurança (RFAS) dos depósitos iniciais e intermediários para as classes 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4, embalados em containers, e do RFAS dos depósitos finais para a Classe 2.1. Entretanto, os requisitos para o licenciamento de relatórios para o depósito final para a Classe 2.2 não estão estabelecidos.

O procedimento formal de licenciamento de depósitos de rejeitos radioativos está desenvolvido em cinco seções principais, detalhando os requisitos para a obtenção dos atos administrativos sequenciais de: Aprovação do Local, Autorização de Construção, Autorização de Operação, Autorização de Descomissionamento (para depósitos iniciais, intermediários ou provisórios) e Autorização de Fechamento (para depósitos finais). A norma também tem quatro anexos com guias para os relatórios exigidos em cada etapa: Relatório de Seleção do Local, Relatório Final de Análise de Segurança, RFAS (para depósitos finais Classe 2.1) e Relatório Final de Análise de Fechamento do Local (RFAEL).

Dependendo do estágio de autorização pretendido, os guias podem servir como base para o Relatório Preliminar de Análise de Segurança (RPAS).

Além das exigências relativas a cada ato administrativo, distribuídas nas seções do Capítulo V da norma, o RPAS ou o RFAS, conforme o caso, incluem planos preliminares ou definitivos sobre situações de emergência, gerenciamento de rejeitos, proteção física, proteção contra incêndios e proteção radiológica, entre outros.

Regulamentação do transporte de materiais radioativos

Aplicável ao território brasileiro

O artigo 21º da Norma 8.01 e o artigo 27º da Norma 8.02 explicitam que o transporte externo de resíduos radioativos deve ser realizado de acordo com a norma *CNEN-N.N.-5.01 – Transporte de Materiais Radioativos* (CNEN, 2021b), assim como com outras resoluções e regulamentos atuais de transporte.

De acordo com essa norma, e para fins de transporte, os rejeitos NORM são classificados como BAE-1 – Material de baixa atividade específica,² uma classe que inclui concentrados de minérios de urânio ou tório e suas cadeias naturais de decaimento. O transporte público do material BAE-1 é feito em embalagens industriais Tipo EI-1,³ projetadas para satisfazer os requisitos gerais especificados na própria norma, aplicáveis a recipientes robustos normalmente

disponíveis no mercado, tais como caixas e tambores metálicos e tambores plásticos de polietileno.

Além disso, de acordo com essa norma, as embalagens Tipo EI-1 devem atender aos requisitos de projeto que visam garantir sua integridade e segurança radiológica sob condições normais de transporte. Entre outras características, essas embalagens devem ser fáceis de manusear, incluindo elevação com dispositivos redundantes, fabricadas com materiais fáceis de descontaminar e compatíveis com o produto transportado, e resistentes ao estresse mecânico durante o transporte de rotina, incluindo porcas e parafusos que não soltam ou afrouxam. Igualmente importante, sua fixação ao veículo de transporte deve ser segura e simplificada.

Além dos regulamentos da ANSN, o transporte de materiais radioativos deve atender às exigências de segurança publicadas pelas agências reguladoras dos diversos meios de transporte.

As determinações relativas aos transportes aéreo, fluvial e marítimo não serão abordadas neste livro, pois a possibilidade de seu uso no Brasil é baixa com relação aos resíduos NORM O&G. Elas são: RBAC 175 da ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), NORMAM 01, 02 e 29 da Diretoria de Portos e Costas da Marinha do Brasil, e Resolução 1765 da ANTAQ (Agência Nacional de Transporte Aquaviário) (CNEN, 2021b).

Para o transporte terrestre, a Resolução ANTT 5232 classifica o material radioativo como Classe 7 e define regras para identificação e atribuição a números da ONU, referindo-se ao cumprimento das disposições das Normas de Transporte estabelecidas pelo órgão regulador nuclear (ANTT, 2016).

A Resolução CONAMA 237/1997 e a Lei Complementar nº 140/11 estabelecem o licenciamento ambiental da atividade de transporte de materiais radioativos exclusivamente para a Federação (IBAMA), sob orientação da ANSN.

A fim de realizar ações conjuntas da política nacional de meio ambiente relacionadas às licenças e aprovações ambientais nas áreas de instalações radioativas e nucleares e na atividade de transporte, em outubro de 2014, a CNEN e o IBAMA assinaram o

Acordo de Cooperação Técnica, que incluiu a publicação da Nota Técnica IBAMA-CNEN nº 01-2013 (NUNES et al., 2013), que rege a aplicação dos regulamentos de transporte e fornece orientação para a elaboração do Plano Geral de Transporte.

A nota técnica citada é muito detalhada e tem um item específico, 3.3.2, que descreve os requisitos para Materiais de Baixa Atividade Específica – BAE, a classe à qual pertencem os materiais NORM. Para estes, não será necessária a aprovação do transporte pela ANSN (NUNES et al., 2013).

Para materiais incluídos na categoria BAE I, tais como rejeitos NORM de óleo, que são transportados em grandes quantidades e apresentam toxicidade e solubilidade, bem como outros riscos capazes de causar contaminação ou outros danos ambientais no caso de um acidente, é necessária uma Autorização de Transporte Ambiental do IBAMA. Deve-se observar que o termo grandes quantidades, no caso em questão, é da ordem de uma tonelada (NUNES et al., 2013).

O IBAMA publicou a Autorização Ambiental para o Transporte de Produtos Perigosos, obrigatória desde 10 de junho de 2012, para a atividade de transporte marítimo e transporte interestadual (terrestre e hidroviário) de produtos perigosos. Os transportadores que realizam a atividade em apenas uma unidade da Federação (dentro de um estado ou do Distrito Federal) devem seguir as regras de licenciamento ou autorização ambiental para o transporte de produtos perigosos emitidas pelo respectivo órgão ambiental estadual (IBAMA, 2018b). Com relação ao estado do Rio de Janeiro, especificamente, o INEA determina que o “manifesto de carga” deve ser preenchido de acordo com o “Manifesto de Transporte de Resíduos – NOP Inea 35 – Sistema MTR”.

Aplicável à exportação de rejeitos NORM

A Resolução CONAMA nº 24, de 7 de dezembro de 1994, determina que qualquer importação ou exportação de rejeitos radioativos, em qualquer forma e composição química, em qualquer quantidade, só pode ser realizada com o consentimento prévio da ANSN, após

ouvir o IBAMA. O IBAMA, por sua vez, notificará as autoridades competentes do país de destino de qualquer exportação de rejeitos radioativos (BRASIL, 1994).

De acordo com a resolução, o transporte de rejeitos radioativos deve atender tanto às exigências estabelecidas nas normas da ANSN quanto às dos ministérios dos Transportes e do Trabalho, bem como às especificadas na legislação internacional pertinente (BRASIL, 1994).

Deve-se observar que o Brasil é signatário da Convenção da Basiléia, sobre o Controle de Movimentos Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu Depósito. A convenção foi totalmente internalizada por meio do Decreto nº 875, de 19 de julho de 1993 (BRASIL, 1993) e também foi regulamentada pela Resolução CONAMA nº 452, de 2 de julho de 2012 (BRASIL, 2012). Um dos objetivos da convenção é promover o gerenciamento ambientalmente seguro de rejeitos perigosos e outros resíduos internamente nos países parceiros, para que seu movimento possa ser reduzido. A importação e a exportação de rejeitos perigosos ou controlados só são permitidas entre os países signatários da Convenção da Basiléia (IBAMA, 2017). Essa legislação, até o momento, não inclui explicitamente os rejeitos radioativos.

Considerações finais sobre a regulamentação nacional

As atividades relacionadas ao gerenciamento de rejeitos NORM, como armazenamento, disposição final ou tratamento, como a incineração (classificada como processamento de material radioativo), serão licenciadas pelo órgão ambiental federal. Somente uma entidade federativa tem um mandato para o licenciamento ambiental de projetos e atividades que envolvam esse material.

Os rejeitos NORM O&G são classificados como rejeitos potencialmente perigosos – Classe I devido à sua toxicidade, especialmente no caso de borras. Nesse sentido, a legislação ambiental que trata desses rejeitos, embora não aplicável aos rejeitos radioativos, deve ser observada, pois rege a matéria após o decaimento (apesar da

meia-vida longa associada a alguns radionuclídeos). No entanto, a legislação sobre rejeitos radioativos contempla os aspectos levantados pela legislação ambiental.

Para os depósitos intermediários e finais de rejeitos radioativos, a Lei 10308/01 encarregou a CNEN de construir e operar os depósitos. Essa lei, entretanto, abriu a possibilidade de a CNEN terceirizar os serviços de projeto, construção, instalação, gerenciamento, operação e remoção de rejeitos de um depósito para outro, bem como de firmar acordos ou arranjos para cooperação mútua com terceiros em relação aos custos de conclusão total ou parcial do projeto (MELO, 2014). Não há regulamentação específica sobre o assunto NORM da indústria de petróleo e gás e as mudanças na Lei 10308/01 ou o estabelecimento de normas específicas para esse caso podem exigir um longo tempo. Por outro lado, pode ser mais prático criar uma regulamentação de segundo nível – a Posição Regulatória – relacionada à norma N.N.-8.02: 2014, a fim de orientar e estabelecer requisitos para lidar com esse material. Entretanto, essa proposta pode não ser essencial para o órgão regulador proceder com o estabelecimento de soluções para a gestão do NORM da indústria de petróleo e gás.

Os requisitos da CNEN, considerados isoladamente, não contemplam o monitoramento de fontes não radioativas de poluição em sua totalidade, reforçando a necessidade de um licenciamento ambiental (IBAMA) e nuclear (ANSN) conjunto das instalações e a necessidade de interação entre os dois órgãos.

Referências

- ABNT. *NBR 10004*: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.
- ABNT. *NBR 10005*: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.
- ABNT. *NBR 10006*: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c.
- ABNT. *NBR 10007*: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004d.
- ABNT. *NBR 10157*: Aterros de resíduos perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- ABNT. *NBR 11175*: Incineração de resíduos sólidos perigosos – Padrões de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.
- ABNT. *NBR 12235*: Armazenamento de resíduos sólidos perigosos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ANTT. AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. *Resolução nº 5.232*, de 14 de dezembro de 2016.
- BRASIL. *Decreto nº 875*, de 19 de julho de 1993.
- BRASIL. *Instrução normativa nº 19*, de 20 de agosto de 2018.
- BRASIL. *Lei complementar nº 140*, de 8 de dezembro de 2011.
- BRASIL. *Lei federal nº 6.938*, de 31 de agosto de 1981.
- BRASIL. *Lei nº 12.305*, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.
- BRASIL. *Lei nº 10.308*, de 20 de novembro de 2001. Dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos, e fornece outras providências. Presidência da República. Brasília: Casa Civil.
- BRASIL. *Lei nº 6.453*, de 17 de outubro de 1977. Dispõe sobre a responsabilidade civil por danos nucleares e a responsabilidade criminal por atos relacionados com atividades nucleares e fornece outras providências.
- BRASIL. *Resolução CONAMA nº 9*, de 3 de dezembro de 1987.
- BRASIL. *Resolução CONAMA nº 1*, de 23 de janeiro de 1986..
- BRASIL. *Resolução CONAMA nº 237*, de 19 de dezembro de 1997.
- BRASIL. *Resolução CONAMA nº 24*, de 7 de dezembro de 1994. Publicada no DOU no 248, de 30 de dezembro de 1994, Seção 1, p.21346.
- BRASIL. *Resolução CONAMA nº 316*, de 29 de outubro de 2002.
- BRASIL. *Resolução CONAMA nº 452*, 2 de julho de 2012.
- BRASIL. *Resolução CONAMA nº 499*, de 6 de outubro de 2020.
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *CNEN-N.N. -8.01*:

- Gerência de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação. Rio de Janeiro, 2014a.
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. CNEN-N.N.-8.02: Licenciamento de depósitos de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação. Rio de Janeiro, 2014b.
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. CNEN-NE-6.06: Seleção e escolha de locais para depósitos de rejeitos radioativos. Rio de Janeiro, 1990..
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. CNEN-N.N.-4.01: Requisitos de segurança e proteção radiológica para instalações minero-industriais. Rio de Janeiro, 2016.
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. CNEN-N.N.-5.01: Transporte de material radioativo. Rio de Janeiro, 2021a.
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. CNEN-N.N.-6.09: Critérios de aceitação para deposição de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação. Rio de Janeiro, 2002.
- IBAMA. *Autorização ambiental para transporte de produtos perigosos* (2018b).
- IBAMA. *Importação/ exportação e trânsito de resíduos*. Convenção de Brasília, 2017.
- IBAMA. *Instrução normativa nº 1*, de 2 de janeiro de 2018. (2018a)
- IBAMA. *Instrução normativa nº 1*, de 25 de janeiro de 2013.
- IBAMA. *Instrução normativa nº 13*, de 18 de dezembro de 2012. (Lista Brasileira de Resíduos Sólidos.)
- IBAMA. *Instrução normativa nº 11*, de 14 de março de 2019.
- MELO, A. C. C. *Rejeitos radioativos no direito brasileiro: Uma abordagem sob a perspectiva da Lei no 10.308/01 e da Convenção Conjunta sobre o Gerenciamento Seguro do Combustível Irradiado e dos Rejeitos Radioativos*. Monografia em Direito Ambiental Nacional e Internacional, Faculdade de Direito, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RGS, 2014, p.60.
- MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Portal Nacional de Licenciamento Ambiental: Competências para o licenciamento ambiental*.
- MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Procedimentos de licenciamento ambiental do Brasil*. Brasília: [s.n.], 2016.
- NUNES, W. G. et al. *Nota Técnica Conjunta IBAMA-CNEN 01/2013: base para a reformulação do termo de referência para o controle da atividade de transporte de materiais radioativos e operacionalização do sistema nacional de transporte de produtos perigosos*. 2013.
- PASSOS, Rafael de Castro Scottá. *Gerenciamento de resíduos das atividades offshore de exploração e produção de petróleo: Uma análise da conformidade legal aplicada em projetos licenciados*. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2015.

PRINCIPAIS MELHORIAS NA LEGISLAÇÃO NUCLEAR NACIONAL

A estrutura legislativa para o gerenciamento de rejeitos radioativos é fundamentalmente constituída por normas regulatórias emitidas pela CNEN (competência a partir de agora entregue à ANSN) para a aplicação da Lei 10308/2001, conforme descrito no Capítulo 3. A legislação ambiental para licenciamento também deve ser cumprida, mas é abrangente para todos os projetos e atividades no país e está além do escopo deste livro sugerir melhorias.

A Lei 10308/2001 define as responsabilidades pela disposição final dos rejeitos radioativos para a CNEN e não faz considerações específicas sobre os rejeitos NORM. Esse detalhamento poderia ser feito em futuros atos normativos.

De toda forma, os rejeitos NORM O&G acima do limite de isenção são classificados como rejeitos radioativos e, portanto, regulamentados pela Lei 10308/2001. Na situação atual, essa legislação estabelece que os geradores da indústria de petróleo e gás (e outros geradores de rejeitos) devem projetar, gerenciar e operar apenas depósitos iniciais para seus rejeitos NORM. Como a responsabilidade pelos depósitos finais diz respeito à CNEN, os operadores de O&G estão em posição de aguardar as definições da CNEN ou a delegação de responsabilidades a terceiros, conforme estabelecido na Lei 10308/2001.

Os rejeitos NORM O&G são classificados na norma CNEN-N.N.-8.01 como material radioativo Classe 2.2 (CNEN, 2014a). As disposições dessa norma não são aplicáveis a materiais não embalados e, portanto, o gerenciamento de rejeitos NORM O&G é regulamentado por essa norma somente se acondicionados em tambores ou outras embalagens.

Os resíduos NORM da indústria de mineração geralmente não são acondicionados em embalagens e são, portanto, regulados pela CNEN-N.N.-4.01, que usa uma abordagem diferente da CNEN-N.N.-8.01, em que a atividade é listada para cada radionuclídeo (CNEN, 2016).

A CNEN-N.N.-4.01 estabelece uma abordagem gradativa para o gerenciamento de resíduos NORM, que são considerados categoria I se a atividade estiver acima de 500 Bq.g⁻¹, categoria II para atividades entre 10-500 Bq.g⁻¹ e categoria III para atividades abaixo de 10 Bq.g⁻¹, considerando a concentração total de radionuclídeos da série urânio e tório. Os limites para ²²⁶Ra, ²²⁸Ra e ²²²Rn são coincidentes com essa norma, definida como 10 Bq.g⁻¹ na CNEN-N.N.-8.01. Análises de segurança genéricas poderiam ser o fundamento para estabelecer categorias para uma abordagem gradativa para o gerenciamento dos rejeitos NORM contidos nas embalagens, de forma semelhante à CNEN-N.N.-4.01 (CNEN, 2016).

Essa classificação de rejeitos considerando se está embalado ou não gera uma situação diferente para os rejeitos NORM da indústria de petróleo e gás, em comparação com os NORM da indústria de mineração, que são armazenados principalmente em lagoas e barragens e, por essa razão, regulamentados pela CNEN 4.01 (CNEN, 2016), se forem considerados como resíduos radioativos.² No entanto, essa regulamentação não se aplica à disposição final de resíduos, mas é improvável que a maioria dos resíduos NORM

² De acordo com a CNEN 4.01, resíduo radioativo é qualquer material resultante de processos químicos ou físicos que contenha radionuclídeos naturais em concentrações acima dos limites de isenção e para os quais a reutilização seja possível, considerando aspectos econômicos, tecnológicos e de proteção contra radiação.

seja recuperada ou removida para outro tipo de depósito. De acordo com a Lei 10308/01, os depósitos iniciais utilizados para o armazenamento de resíduos das instalações de extração ou beneficiamento de minério podem ser convertidos em depósitos finais, com a autorização expressa da ANSN.

Além disso, embora os depósitos finais de NORM O&G estejam incluídos na aplicação da CNEN-N.N.-8.02 (CNEN 2014b), esse regulamento não estabelece requisitos para os relatórios de licenciamento de depósitos finais deste tipo de rejeitos Classe 2.2.

Essa situação levanta a necessidade de uma Posição Regulatória que esclareça os requisitos do órgão regulador em relação ao licenciamento de depósitos finais de rejeitos radioativos Classe 2.2. Uma alternativa seria excluir esses rejeitos do escopo da CNEN-N.N.-8.01 e da CNEN-N.N.-8.02 e emitir um novo regulamento específico para os rejeitos NORM.

Seria altamente desejável que essa posição regulatória incluísse os principais cenários e diretrizes para a construção de uma análise de segurança para a deposição de rejeitos, considerando a definição de critérios de limites de dose para grupos críticos em relação a diferentes vias de exposição, em vez da concentração de atividade dos rejeitos por si só. A definição dessa metodologia, que também pode ser ajustada caso a caso, pode levar a situações de liberação incondicional.

A liberação incondicional já está prevista em uma norma CNEN (CNEN, 2011 e 2014c), em que os valores para liberação são estabelecidos e equivalem a níveis de isenção. Esse regulamento também estabelece que para materiais em grandes quantidades, como rejeitos NORM, o nível de isenção pode ser definido caso a caso, pelo órgão regulador. A análise de segurança seria uma ferramenta importante para provar que, no caso de liberação incondicional, a dose para o público é inferior a 1 mSv por ano.

Nessa direção, uma importante declaração apresentada durante um evento internacional – que contou com a participação da equipe do projeto *Virtual National Workshop on Holistic Approach to NORM Management* (Oficina Nacional Virtual sobre Abordagem Holística

da Gestão de NORM), patrocinada pelo Programa de Cooperação Técnica da AIEA no Brasil, e foi realizado de 3 a 7 de maio de 2021 – reforçou a ideia de que “o número arbitrário 1Bq/g de urânio ou tório, derivado da média da distribuição da radioatividade natural na Terra, não pode ser utilizado como um valor acima do qual as instalações e atividades devem ser controladas, em vez de um critério baseado na dose”.

Em síntese, as seguintes considerações finais são feitas a respeito da melhoria das regulamentações nacionais:

- A regulamentação específica relativa às exigências de licenciamento para depósitos finais para rejeitos radioativos Classe 2.2 nas normas da ANSN está ausente. Também devem ser definidos requisitos e cenários para análise de segurança dos depósitos finais.
- Análises de segurança genéricas poderiam ser a base para estabelecer categorias para uma abordagem gradativa para o gerenciamento de rejeitos NORM, de forma semelhante à CNEN-N.N.-4.01 (CNEN, 2016).
- A delegação a outras partes (por exemplo, geradores ou empreiteiros) para projetar, gerenciar e operar depósitos finais de rejeitos está prevista na Lei 10308/2001 e deve ser avaliada pela CNEN e pelo órgão regulador.

Os resultados do seminário mencionado vão na mesma direção das conclusões da análise da equipe e mostram que existe um bom ambiente para as mudanças necessárias na regulamentação nuclear no Brasil no que diz respeito à gestão da NORM.

Referências

- BRASIL. *Lei nº 10.308*, de 20 de novembro de 2001. Dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos, e fornece outras providências. Presidência da República. Brasília: Casa Civil.
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Posição regulatória 3.01/001:2011*: Critérios de exclusão, isenção e dispensa de requisitos de proteção radiológica. Rio de Janeiro, 2011.
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *CNEN-N.N.-8.01*: Gerência de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação. Rio de Janeiro, 2014a.
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *CNEN-N.N.-8.02*: Licenciamento de depósitos de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação. Rio de Janeiro, 2014b.
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *CNEN-N.N.-3.01*: Diretrizes básicas de proteção radiológica. Rio de Janeiro, 2014c.
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *CNEN-N.N.-4.01*: Requisitos de segurança e proteção radiológica para instalações minero-industriais. Rio de Janeiro, 2016.
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *CNEN-N.N.-3.01*: Diretrizes básicas de proteção radiológica. Rio de Janeiro, 2014.

LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL

Agência internacional de energia atômica

Os resíduos gerados a partir da concentração tecnológica de NORM, incluindo os resíduos de mineração e do processamento de urânio, bem como os resíduos gerados na exploração de petróleo e gás, são classificados e gerenciados de diferentes maneiras, dependendo do país em questão. Em alguns países, esses resíduos são considerados resíduos industriais convencionais, enquanto em outros, dependendo de sua atividade, são considerados rejeitos radioativos (IAEA, 2017).

Devido às grandes quantidades geradas, esses resíduos necessitam de um gerenciamento específico, com uma abordagem pragmática caso a caso, envolvendo descontaminação, reutilização, reciclagem, contenção, diluição, dispersão e deposição. Nessa gestão, os conceitos de concentração/contenção e diluição/dispersão devem ser considerados complementares e não contraditórios.

O gerenciamento de resíduos NORM implica uma caracterização inicial baseada em análise de risco, seguida por uma caracterização mais detalhada que permita seu gerenciamento seguro, utilizando métodos como redução de volume, embalagem e inertização. Como exemplo, grandes peças metálicas contaminadas com resíduos NORM, tais como tubos da indústria petrolífera, devem ser cortadas

em partes menores para fins de manuseio e transporte. Já as incrustações e as lamas, provenientes da indústria de petróleo e gás, são geralmente armazenadas até a disponibilização de instalações de deposição adequadas.

Os critérios para isenção de materiais contendo radionuclídeos de origem artificial baseiam-se na premissa de que a isenção será a opção ideal, desde que a dose anual para um indivíduo seja da ordem de 10 μ Sv ou menos.

Para resíduos NORM, contudo, a situação é diferente. Devido à existência de níveis significativos e variáveis de background devidos aos radionuclídeos naturais, a isenção é provavelmente a opção ideal em uma faixa muito maior de doses anuais, geralmente doses da ordem de 1 mSv ou menos (IAEA, 2017).

Dependendo do país, os resíduos NORM gerados podem ter destinos diferentes. A Tabela 2, a seguir, mostra as opções mais utilizadas no gerenciamento desse material, de acordo com o volume gerado.

Tabela 2. Opções para destinação de resíduos NORM segundo o volume gerado

Opção de deposição	Volume NORM	
	Pequenos volumes	Grandes volumes
Armazenamento para decaimento	Não aplicável ¹	Não aplicável ¹
Trincheira superficial	Preferível	Preferível
Barragem de rejeitos	Preferível ²	Preferível ²
Instalação superficial com barreiras de engenharia	Aceitável	Possível ³
Deposição em profundidade média	Aceitável	Possível ³
Deposição em instalação geológica	Possível ³	Possível ³
Deposição em poço	Possível ³	Não aplicável ⁴

1. Análise de segurança; 2. NORM de mineração; 3. Avaliação com base nos aspectos técnicos ou econômicos; 4. Seleção por motivos técnicos.

Fonte: Adaptado de IAEA, 2017.

União Europeia

De acordo com a regulação da União Europeia (UE), cada Estado-membro é obrigado a assegurar a vigilância radiológica em seu território e de sua população (artigos 35 e 36 do Tratado EURATOM e Diretiva Europeia 2013/51/EURATOM).

Essa obrigação se reflete nos artigos 21 e 22 da lei de 15 de abril de 1994 e nos artigos 70 e 71 do Regulamento Geral para a Proteção da População, dos Trabalhadores e do Meio Ambiente contra o Perigo das Radiações Ionizantes. Esses artigos estabelecem que o controle da radioatividade no território de um país e as doses recebidas pela população são de responsabilidade da autoridade nuclear nacional.

A Diretiva 2013/59 do Conselho EURATOM, de 5 de dezembro de 2013, estabelece as normas básicas de segurança para a proteção contra os perigos decorrentes da exposição à radiação ionizante. Essa diretiva se aplica a qualquer situação de exposição planejada, existente ou de emergência, que envolva um risco de exposição à radiação ionizante que não possa ser considerado insignificante do ponto de vista da proteção radiológica ou em relação ao meio ambiente.

Os rejeitos radioativos são definidos nessa diretiva como “material radioativo na forma gasosa, líquida ou sólida, para o qual não está previsto ou considerado nenhum outro uso pelo Estado-membro ou por uma pessoa física ou jurídica, cuja decisão seja aceita pelo Estado-membro, e que é regulamentado como rejeito radioativo por uma autoridade reguladora competente sob a estrutura legislativa e regulatória do Estado-membro”. O Anexo VI dessa diretiva lista os setores industriais que lidam com material radioativo natural, incluindo a produção de petróleo e gás. O artigo D. 515-110-1 lista as instalações industriais sujeitas à obrigação de caracterização radiológica mencionada no artigo R515-110 e as instalações que realizam atividades de produção de petróleo e gás, com a única exceção dos trabalhos de perfuração para pesquisa.

O site oficial da legislação da União Europeia – EUR-Lex – publicou a Diretiva 2013/59, de 5 de dezembro de 2013, que estabelece as normas básicas de segurança para proteção contra os perigos decorrentes da exposição à radiação ionizante, e revoga as Diretivas EURATOM 89/618, 90/641, 96/29, 97/43 e 2003/122. Essa diretiva foi publicada nos 24 idiomas oficiais da UE (EUROPEAN COMMISSION, 2014) e os Estados-membros são obrigados a transpô-la para a legislação nacional.

Como exemplo dessa transposição, a Agência Federal de Controle Nuclear da Bélgica (AFCN) mantém programas de monitoramento radiológico do território do país. Quanto à radioatividade natural, a AFCN divulga informações em sua página na internet, como, por exemplo, a concentração de elementos naturais em seu território (AFCN, 2020) (Tabela 3).

Tabela 3. Concentração de elementos radioativos naturais em solo na Bélgica

Urânio (^{238}U)	Tório (^{232}Th)	Potássio (^{40}K)
5 - 50 Bq/kg	5 - 50 Bq/kg	70 - 900 Bq/kg

Fonte: Adaptado de AFCN, 2020.

A AFCN considera que a presença de material NORM, em alguns casos, pode representar um risco para a saúde das pessoas expostas e ter um impacto significativo sobre o meio ambiente. Assim, é necessário que as indústrias que geram esse material (setor de fosfato, exploração e produção de óxidos de areia e zircônio, produção de dióxido de titânio, tratamento de águas subterrâneas, energia geotérmica, usinas de carvão, produção de metais não ferrosos, indústria siderúrgica, aplicações de tório, indústria de petróleo e gás, mineração de terras raras, entre outros) tomem medidas para limitar ao máximo os riscos para as pessoas e o meio ambiente.

Estados Unidos

Nos Estados Unidos, diferentes agências – Comissão Reguladora Nuclear (NRC), Departamento de Transporte (DOE), Departamento de Saúde e Serviços Humanos (HHS), Administração de Segurança e Saúde Ocupacional (OSHA) e as comissões de transporte em nível estadual, entre outros – são responsáveis por aspectos específicos do processo de gerenciamento de resíduos radioativos, incluindo o gerenciamento de resíduos NORM. Para operacionalizar esse acordo, a NRC mantém uma política de cooperação com os entes federativos estaduais, realizada por meio do programa *State Liaison Officer Program*. Essa política permite que o estado regulamente o gerenciamento, o armazenamento e o descarte de certos rejeitos radioativos e prevê a participação estadual, por exemplo, nas atividades de inspeção da NRC.

A proteção contra radiação no local de trabalho é regulamentada tanto pelo NRC, que estabelece as funções e as responsabilidades do supervisor de radioproteção nos regulamentos 10.CFR.19 e 10.CFR.20, quanto pela OSHA, no regulamento 29 CFR 1910.1096 (US DEPT OF LABOR, 2021). As empresas de processamento de resíduos NORM devem cumprir com os requisitos especificados nessa normativa.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), por meio da Lei de Conservação e Recuperação de Recursos (RCRA) (contida na normativa 40 CFR 261), regulamenta diferentes aspectos do gerenciamento de resíduos da exploração e produção de petróleo, gás e energia geotérmica.

Vale mencionar que os fluidos de perfuração – águas produzidas e outros resíduos associados à exploração e produção de petróleo, gás natural ou energia geotérmica – são classificados pela EPA como resíduos não perigosos (40 CFR 261.4.b.5) (EPA, 2021).

O estado do Texas, onde operam empresas de gerenciamento de resíduos NORM, é um exemplo de um estado que emitiu regulamentação específica para gerenciamento desse material. A Comissão Ferroviária do Texas (RRCT) autoriza, como especificado

no Código Administrativo do Texas, na Parte 1, Capítulo 4, Subcapítulo F – Oil and Gas NORM, os seguintes métodos de deposição sem necessidade de licença (EUA, 2021):

- Deposição em poço selado e abandonado, por deposição no mesmo local onde foram gerados os resíduos NORM de petróleo e gás;
- deposição em aterro, ou seja, deposição no mesmo local onde os resíduos NORM O&G foram gerados, mesclando-os com o material do terreno;
- deposição em uma instalação licenciada pela NRC ou pelo estado do Texas;
- injeção em formações geológicas específicas.

A licença de injeção está sujeita à notificação prévia à RCRA pelo operador da instalação de injeção.

Emirados Árabes Unidos

Os Emirados Árabes Unidos possuem a sexta maior reserva comprovada de petróleo e a 5ª maior reserva de gás natural do mundo. A indústria de petróleo e gás é a principal produtora de resíduos NORM no país.

A autoridade nuclear dos Emirados – Autoridade Federal para Regulamentação Nuclear (FANR) – foi estabelecida em setembro de 2009, com o mandato de licenciar e inspecionar as atividades nucleares no país e implementar o programa de regulamentação nuclear, de acordo com a Lei Nuclear dos Emirados (Decreto 6, de 2009) e os regulamentos da FANR.

O gerenciamento de resíduos NORM inclui as seguintes normas e guias regulatórios:

- FANR-REG-24 “Basic Safety Standards for Facilities and Activities involving Ionizing Radiation other than in Nuclear Facilities” e RG 007 “Radiation Safety”;
- FANR-REG-26 “Regulation for Pre-disposal Management of Radioactive Waste” e RG 018 “Pre-disposal Management of Radioactive Waste”;

- FANR-REG-27 “Disposal of Spent Fuel and Radioactive Waste” e RG 027 “Near Surface Disposal of Radioactive Waste”.

Canadá

De acordo com a estratégia regulatória canadense, a Comissão Federal Canadense de Segurança Nuclear (CNSC) é responsável pela regulamentação do ciclo do combustível nuclear e pelo transporte de materiais radioativos. As atividades industriais que incluem materiais NORM são reguladas por legislação de nível provincial (TAKALA, 2017; HEALTH CANADA, 2011).

As diretrizes canadenses para o gerenciamento de materiais radioativos de ocorrência natural, desenvolvidas conjuntamente pelos reguladores federais, provinciais e territoriais, contêm orientações genéricas e são a base para regulamentos específicos sobre o gerenciamento desse tipo de resíduo (HEALTH CANADA, 2011). Essas diretrizes recomendam que o “material NORM pode ser liberado sem restrições radiológicas quando a dose associada ao público não for superior a 0,3 mSv ao ano”. Volumes de material NORM acima dos limites de liberação derivados incondicionais podem, após uma análise específica das condições locais, ser liberados para deposição sem considerações adicionais. Nesses casos, a premissa básica é que o material, em sua deposição final, não contribuirá com dose para o indivíduo crítico que seja maior do que 0,3 mSv/a. Fora dessas situações ou condições, o material se enquadra em uma classificação NORM mais restritiva.

Reino Unido

Em princípio, a estrutura legal do Reino Unido para os rejeitos radioativos também se aplica a todos os rejeitos NORM, a menos que explicitamente declarado em contrário (THE SCOTTISH GOVERNMENT, 2014).

São aceitas no país diferentes rotas de tratamento e deposição, sujeitas à demonstração pelo operador que o acondicionamento dos

rejeitos NORM é necessário para facilitar o manuseio e o transporte seguro dos rejeitos e que não comprometa futuras operações de gerenciamento. De acordo com a estratégia de gestão de resíduos NORM do Reino Unido, “a diluição deliberada e inadequada de rejeitos é inaceitável, pois pode levar ao uso desnecessário de matérias-primas, à ocupação não otimizada de espaço em aterros e pode ser uma maneira de burlar o controle regulatório” (THE SCOTTISH GOVERNMENT, 2014).

A deposição de resíduos NORM O&G em um aterro sanitário está isenta da exigência de licenciamento ambiental se a concentração de rejeitos não exceder 10 Bq/g. O operador deve manter um registro adequado dos rejeitos NORM dispostos e assegurar que, quando razoavelmente praticável, qualquer marcação ou rotulagem dos rejeitos ou de sua embalagem seja removida antes da deposição dos rejeitos (UNITED KINGDOM, 2016).

Noruega

A legislação para o gerenciamento de resíduos radioativos na Noruega tem origem na legislação aplicável a outros tipos de resíduos perigosos. Os resíduos NORM são classificados como resíduos perigosos, assim como o óleo ou resíduos contendo metais pesados etc. Não há, portanto, legislação específica para resíduos NORM.

Existe no país uma boa cooperação entre a autoridade ambiental (NEA) e a autoridade nuclear (DSA), sendo que ambas realizam auditorias conjuntas e há exigências conjuntas, por exemplo, exigências pós-encerramento.

Um aspecto relevante no sistema regulatório da Noruega é que ele não é muito prescritivo. Os reguladores estabelecem parâmetros e critérios a serem seguidos, assim como diretrizes e bons exemplos, e cabe aos operadores escolherem métodos e processos para alcançar as metas estabelecidas.

O gerenciamento de rejeitos, as áreas contaminadas e as descargas de efluentes são regulamentados pela Lei de Controle da Poluição (THE NORWEGIAN GOVERNMENT, 1981). Complementando

esta estrutura legal genérica, foram estabelecidos regulamentos específicos, inclusive sobre a aplicação dessa lei à contaminação radioativa e aos rejeitos radioativos.

Todo operador que possui ou gerencia resíduos perigosos deve declarar seu inventário uma vez por ano. O formulário de declaração é o mesmo, independentemente de os rejeitos conterem ou não materiais radioativos. Por serem considerados um tipo de rejeito radioativo, os rejeitos NORM devem ser enviados para uma instalação de armazenamento licenciada. Os rejeitos devem ser armazenados por não mais de um ano, quando uma rota de descarte deve ser implementada. Os rejeitos radioativos acima de 1 Bq/g devem ser enviados para o repositório. Rejeitos entre 1 e 10 Bq/g podem ser enviados para instalações de descarte de resíduos perigosos, mas essa opção não foi utilizada no passado e esse limite tende a ser abandonado.

Foi estabelecido na Noruega um fundo a ser utilizado no caso da impossibilidade da empresa de continuar a operação das instalações. Esse fundo garante o fechamento seguro do repositório se houver qualquer situação imprevista como, por exemplo, o operador decretar falência.

O tratamento dos rejeitos NORM por incineração é considerado um método viável na Noruega, sempre sujeito a licenciamento pelos órgãos reguladores.

Os métodos de deposição de rejeitos NORM O&G atualmente licenciados na Noruega são a reinjeção offshore e a deposição em túneis. O primeiro é permitido como parte da licença geral de exploração de petróleo e faz parte do licenciamento de descarga das plataformas petrolíferas, limitado aos rejeitos por ele gerados. O retorno dos rejeitos NORM processados em terra para plataformas offshore não é permitido, uma vez que isso seria considerado como um despejo de rejeitos no mar.

França

Na França, os rejeitos com alta radioatividade natural são gerenciados *in loco*, de acordo com suas características radiológicas. As rotas de gerenciamento incluem tratamento para reutilização ou recuperação de materiais ou transporte para descarte em aterros para resíduos convencionais (quatro instalações estão autorizadas a recebê-los) ou nos depósitos da ANDRA, que se dedicam ao gerenciamento de rejeitos radioativos.

O gerenciamento de rejeitos com alta radioatividade natural foi significativamente alterado em 2018, por ocasião da transposição das disposições da Diretiva do Conselho EURATOM 2013/59, de 5 de dezembro de 2013. Essa diretiva estabelece as normas básicas para a proteção da saúde contra os riscos resultantes da exposição à radiação ionizante (MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE, 2018). Os seguintes valores de isenção para os radionuclídeos foram estabelecidos:

- ^{238}U e filhos: 1 Bq/g
- ^{232}Th e filhos: 1 Bq/g
- ^{40}K : 10 Bq/g

Os rejeitos NORM são classificados em duas categorias:

- Rejeitos de muito baixo nível, como rejeitos de areia de fundição, e rejeitos refratários à base de zircônio, utilizados principalmente na indústria do vidro;
- Rejeitos de longo prazo com baixo nível; por exemplo, alguns rejeitos de tratamento de monazita, da fabricação de esponjas de zircônio ou da desmontagem de algumas instalações industriais, como tratamento de ácido fosfórico e produção de dióxido de titânio.

A Diretiva 2013/59/EURATOM da União Europeia, que foi adaptada pela França, também harmoniza os critérios gerais e os limites para as questões de liberação e isenção do controle regulatório. Com relação aos materiais radioativos naturais, o escopo da

diretiva foi ampliado para cobrir atividades humanas que envolvem a presença de fontes naturais de radiação, incluindo o tratamento de materiais que naturalmente contêm radionuclídeos. De acordo com os termos da diretiva, a proteção contra fontes naturais de radiação deve ser incorporada aos requisitos gerais, em vez de ser considerada separadamente em um título específico.

Em particular, setores nos quais há atividades que lidam com NORM e que devem estar sujeitos a controle regulatório devem ser gerenciados dentro da mesma estrutura regulatória para outras práticas. De acordo com a diretiva, os Estados-membros da União Europeia são obrigados a identificar as classes ou os tipos de práticas que envolvem materiais radioativos naturais, que resultam na exposição dos trabalhadores ou da população e que não podem ser negligenciadas do ponto de vista da proteção radiológica. Uma lista dos setores industriais que utilizam a NORM, e que deve ser considerada durante a pesquisa, também é fornecida por essa diretiva, como mencionado anteriormente.

Um aspecto importante é o transporte desses materiais através das fronteiras de diferentes países. Existe uma documentação específica para regular essa atividade (EUROPEAN COMMISSION, 2020; MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE, 2018). Outra preocupação diz respeito à “valorização” do NORM para reutilização.

As opções para o armazenamento de rejeitos de radiação muito baixa, de origem natural e artificial, são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Opções de deposição de rejeitos radioativos de muito baixo nível na França

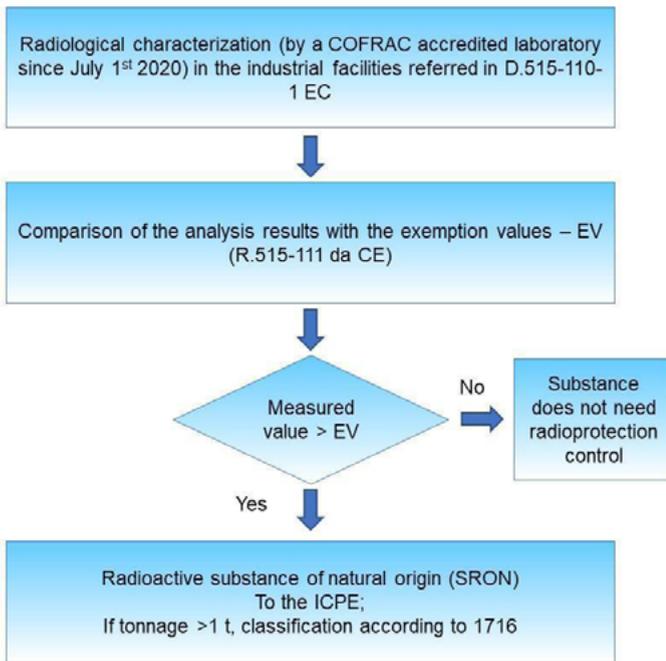
Tipos de rejeitos	2760-3 (IDRI)	2760-2 (IDRNP)	2760-1 (IDRP)	2797-2 (CIPSD)
Radionuclídeo natural, atividade muito baixa, <1 Bq/g	sim	sim	Sim	sim
Radionuclídeo natural, atividade muito baixa, >1 Bq/g and <20 Bq/g	não	sim, com monitoramento radiológico	sim, com monitoramento radiológico	sim
Radionuclídeo natural, atividade muito baixa, >20 Bq/g	não	não	Não	sim
Radionuclídeo artificial, atividade muito baixa	não	não	Não	sim

IDRI – Instalação de Deposição de Rejeitos Inertizados; (ISDI – Installation de Stockage de Déchets Inertes); **IDRNP** – Instalação de Deposição de Resíduos Não Perigosos (ISDND – Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux); **IDRP** – Instalação de Deposição de Resíduos Perigosos (ISDD – Installation de Stockage de Déchets Dangereux); **CIPSD** – Centro Industrial de Preparação, Segregação e Deposição Industrial (Centre Industriel de Regroupement, d’Entreposage et de Stockage).

A Figura 6 mostra o fluxograma de decisão para o gerenciamento dos rejeitos gerados na indústria de petróleo e gás. A caracterização do material deve ser feita por uma instituição credenciada pelo COFRAC, o Comitê Francês de Credenciamento, e, dependendo do resultado, ou não há necessidade de medidas de proteção contra radiação ou o material deve ser enviado para uma instalação licenciada.

Em resumo, na França os resíduos NORM são gerenciados caso a caso, após sua caracterização.

Figura 6. Fluxograma da gerência de resíduos NORM



Fonte: Adaptado de Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 2018.

Malásia

Segundo Kontol et al. (KONTOL, SULAIMAN e RAZALIM, 2015) a indústria de exploração e produção de petróleo e gás é um componente-chave da economia malaia, sendo esses produtos os que mais contribuem para a receita do país. Além disso, esse setor é o maior destinatário de investimentos estrangeiros diretos e uma das maiores fontes de divisas, tendo transformado o interior da Malásia e provocado muitas mudanças socioeconômicas. A Malásia possui um grande número de plataformas offshore e instalações onshore para a produção e o processamento de petróleo e gás.

A gestão dos rejeitos gerados pela indústria de petróleo e gás na Malásia é regulamentada pelo Departamento do Meio Ambiente

(DOE) ou pelo Conselho de Licenciamento de Energia Atômica (AELB). Lamas e incrustações de petróleo contendo metais pesados são categorizados como resíduos regulares e são cobertos pelo DOE.

Na Malásia, os resíduos NORM das instalações de petróleo e gás podem ser categorizados em dois grupos:

- **Grupo I** – instalações contendo radionuclídeos acima de certa concentração de atividade em lamas e incrustações;
- **Grupo II** – instalações que lidam com materiais contaminados, tais como tubos e bombas, cuja taxa de dose pode ser detectada por monitores de radiação externa.

Esse resíduo deve ser gerenciado adequadamente para reduzir o risco para os trabalhadores, assim como para o público em geral e o meio ambiente. A presença de material NORM na operação da indústria de petróleo e gás exige tratamento e monitoramento cuidadosos em sua gestão. Além disso, outros contaminantes não radioativos, tais como hidrogênio, sulfato, mercúrio, benzeno etc., também podem estar presentes e devem ser gerenciados adequadamente.

Se houver uma alta presença de NORM nos resíduos, ela se enquadra na competência do licenciador (AELB). O guia LEM / TEK / 30 (AELB, 2016) apresenta as diretrizes para o gerenciamento de resíduos na indústria de petróleo e gás. Outro documento importante é o código de prática LEM / TEK / 58, preparado pelo AELB, que acrescenta os aspectos de radioproteção ao tema (AELB, 2016a).

Como tratamento típico, o lodo e as incrustações são temporariamente armazenados em tambores nas próprias plataformas de exploração e produção. Para fins de descarte, os rejeitos normalmente devem ser tratados e colocados em valas ou trincheiras e cobertos com terra. O local de descarte deve ser de propriedade do usuário ou gerador de rejeitos e aprovado pela autoridade competente. Normalmente, esse local está localizado na área da empresa, devido à facilidade de controle e monitoramento.

Devido ao possível risco à saúde que o trabalho com NORM pode trazer e ao aumento da exposição à radiação, na regulamentação

da Malásia a Avaliação de Impacto Radiológico deve ser realizada em todas as descargas de rejeitos NORM propostas e deve demonstrar que nenhum membro do público é exposto a doses acima do limite anual estabelecido pela AELB (KONTOL, SULAIMAN e RAZALIM, 2015)

O Conselho de Energia Atômica e Licenciamento do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação da Malásia desenvolveu um Código de Prática (AELB, 2016a) relativo ao NORM das indústrias de produção e refino de petróleo e gás, excluindo seu tratamento, sua reciclagem e sua recuperação. Esse código contém orientações sobre a proteção contra radiação e requisitos regulamentares aplicáveis à operação de instalações de petróleo e gás e às atividades de eliminação de rejeitos.

O limite de dose para o grupo crítico em relação à deposição de rejeitos é de 0,3 mSv/ano.

Referências

- AELB. *Guidelines on Radiological Monitoring for Oil and Gas Facilities Operators Associated with Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials (TENORM)*. LEM/TEK/30. Dengkil, Malaysia, 2016.
- AELB. *Code of practice on radiation protection relating to technically enhanced naturally occurring radioactive material (TENORM) in oil and gas facilities*. Selangor, Malaysia, 2016a.
- AFCN. *Matériaux naturellement radioactifs (NORM)*. Bruxelas, Bélgica, 2020.
- COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. *Council Directive 2013/59/EURATOM: laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure*. Official Journal of the European Union. Brussels, Belgium.
- COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. *Directive 2013/59/EURATOM*.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.
- EUROPEAN COMMISSION. *Transport of radioactive materials – Supervision and control of shipment of radioactive waste and spent fuel*. Europe, 2020.
- HEALTH CANADA. *Canadian Guidelines for the Management of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) – Rev. 2011*. Prepared by the Canadian NORM Working Group of the Federal Provincial Territorial Radiation Protection Committee.

- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Selection of technical solutions for the management of radioactive waste*. Vienna, Austria: IAEA, 2017.
- KONTOL, K. M.; SULAIMAN, I.,; e RAZALIM, F. A. (2015). *Radiological impact assessment in disposal of treated sludge*. Jurnal Sains Nuklear Malaysia, 27(2), pp. 23-30.
- MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE.. *Transposition de la directive 2013/59/EURATOM – Code de la santé publique et code de l’environnement*. Mission Sûreté Nucléaire et Radioprotection. Paris, França, 2018.
- TAKALA, J. M. *Management of NORM – A Canadian perspective*. ICRP Workshop on Surface Disposal of Radioactive Waste, November 6, 2017 – Fukushima, Japan.
- UNITED KINGDOM. *The Environmental Permitting (England and Wales) Regulations 2016*.
- THE NORWEGIAN GOVERNMENT. *Pollution Control Act of 13 March 1981 N° 6 Concerning Protection Against Pollution and Concerning Waste*.
- THE SCOTTISH GOVERNMENT. *Strategy for the Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) waste in the United Kingdom*. 2014.
- UNITED STATES OF AMERICA. [Texas Administrative Code. \(Last Updated: March 27, 2024\)](#).
- US DEPT. OF LABOR. *Occupational Safety and Health Administration – regulation 29 CFR 1910.1096*.

MAPEAMENTO DE POTENCIAIS PARCEIROS E FORNECEDORES

Parceiros brasileiros

Dois potenciais parceiros brasileiros com competência técnica útil para a gestão do NORM O&G foram contatados, como mostra a Tabela 5. Ambas as empresas têm experiência no gerenciamento de resíduos perigosos da indústria de O&G.

A *Vitória Ambiental (VA)* é uma empresa do ramo de exploração de petróleo em terra, e tratamento e disposição de resíduos sólidos e perigosos, industriais e efluentes. A VA está vivamente interessada em participar de estudos de reinjeção de rejeitos em poços de exploração abandonados, aproveitando seus conhecimentos em perfuração de poços. Eles têm estado em contato com o regulador nuclear, tentando realizar uma reinjeção de rejeitos NORM em um poço de teste. De acordo com o regulador e tendo em mente as melhores práticas, um teste utilizando rejeitos reais exigiria uma análise de segurança, pois consiste essencialmente na eliminação real de rejeitos radioativos. A fim de avaliar alguns parâmetros do processo, e antes da montagem da análise de segurança como um passo para o licenciamento nuclear, um teste de reinjeção poderia ser realizado com material não radioativo, com características similares. Essa operação deve ser autorizada pelo órgão regulador ambiental do Estado.

Outro parceiro nacional potencial é o *CETREL*, um consórcio de geradores de resíduos no complexo petroquímico de Camaçari, no

estado brasileiro da Bahia. A empresa é responsável pelo tratamento, acondicionamento, armazenamento e destinação de resíduos perigosos. A CETREL tem uma experiência variada e abrangente em lidar com soluções inovadoras para diferentes tipos de resíduos, sempre alinhada com as exigências do órgão regulador.

Além disso, considerando a geração de rejeitos NORM por muitos produtores de O&G, que poderiam ser agrupados regionalmente para gerenciar seus rejeitos, as lições aprendidas pela CETREL e seus membros do consórcio são de grande importância em relação ao modelo de negócios: um consórcio entre muitos geradores diferentes, uma alternativa interessante para os rejeitos NORM.

Tabela 5. Parceiros potenciais no Brasil para gerência de rejeitos NORM O&G

	Vitória Ambiental	CETREL
Atividades do parceiro	Aluguel de equipamentos, perfuração de poços de petróleo, gerência de rejeitos com PCB, tratamento (ES e MA) e armazenamento (R) de rejeitos da indústria de petróleo	Serviços ambientais nas áreas de água, efluentes, resíduos, prevenção à poluição e remediação de áreas contaminadas. Monitoramento ambiental, em processos de remediação, tratamento de resíduos, processos para reciclagem energética, de material ou da água
Organização responsável pelo parceiro, financeira ou legalmente	Empresa brasileira privada, desde 1981	Empresa brasileira privada, desde 1978
Localização	Estados brasileiros: ES, RJ, MA, SP	Camaçari (BA)
Aspectos sobre o processo de seleção de local, se aplicável	Próximo aos produtores de petróleo, seus principais clientes	Próximo aos produtores de rejeitos, do polo petroquímico
Possíveis atividades do parceiro	Reinjeção, deposição, tratamento de rejeitos industriais	Tratamento, incineração e deposições inicial e final
Home page	https://www.vitoriambiental.com.br	https://www.cetrel.com.br
Contatos	Marcelo Chiabai (27) 3335-4700	Diógenes /Maysa (71) 3634-9800

A Tabela 6 mostra uma lista não exaustiva de empresas privadas no ramo de deposição de resíduos perigosos (Classe I, de acordo com a norma brasileira ABNT 10004). Mesmo que a deposição de resíduos NORM O&G não acondicionados ainda não esteja regulamentada no Brasil, essas empresas podem ser parceiras potenciais se houver uma mudança na regulamentação ou para a deposição autorizada de resíduos abaixo do nível de isenção.

Tabela 6. Empresas no Brasil com aterros licenciados para resíduos classe I³

Company	Company activities	Company locations	Home page
Pró Ambiental	Disposal and incineration of Class I waste	RJ, MG	https://www.proambientaltecnologia.com.br/
Essencis-MG	Disposal of Class I waste	MG	https://www.essencis.com.br/
Tecnosol	Disposal of Class I waste	RJ	http://www.tecnosolcomercio.com/
Solvi	Disposal of Class I waste	Brazil: several unities across country	https://www.solvi.com/certificacoes

Parceiros internacionais e boas práticas

Várias empresas internacionais foram selecionadas como potenciais parceiros ou fornecedores ou exemplos de melhores práticas. Alguns exemplos para as duas categorias e uma breve descrição de cada uma serão apresentados neste capítulo, considerando sua experiência para tratamento ou para atividades de deposição.

³ As empresas listadas nesta tabela estavam licenciadas no momento da edição final deste livro. Entretanto, a situação do licenciamento é dinâmica e deve ser verificada novamente antes da contratação de uma empresa para o serviço de deposição final de rejeitos.

Parceiros ou fornecedores em potencial para o tratamento de NORM O&G

A *Rosatom State Atomic Energy Corporation* é uma empresa russa sediada em Moscou, responsável pelo complexo de energia nuclear do país. Foi fundada em 1953 e atualmente engloba mais de trezentas empresas e instituições afiliadas localizadas em diferentes regiões do mundo, incluindo a América Latina. A Rosatom opera no Brasil e é capaz e disposta a propor e implementar soluções para a gestão do NORM O&G, desde o projeto até a operação da usina.

A *NUKEM Technologies GmbH*, com sede na região de Frankfurt, é a subsidiária de gerenciamento de rejeitos da Rosatom. As atividades da NUKEM dentro do Grupo Rosatom são o descomissionamento e a desmontagem de instalações nucleares, o gerenciamento de combustível usado, os serviços de engenharia e o acondicionamento de rejeitos radioativos, incluindo o tratamento de rejeitos NORM. Os processos de tratamento de rejeitos da NUKEM incluem a incineração e a cimentação. Para os serviços do NORM O&G, o portfólio da NUKEM compreende a unidade móvel de limpeza de tubos, que pode ser instalada em locais de produção remotos (por exemplo, o campo Solimões na Amazônia), o moedor mecânico a hidrojato, unidades de evaporador personalizadas e sistemas para caracterização do NORM (transportador de correia FREMES).

A *Econ Industries* é uma empresa alemã, fundada em 2003, para tratamento de resíduos perigosos (recuperação de fluidos de corte, resíduos oleosos, resíduos contendo mercúrio, remediação do solo, separação de lodo metálico, NORM, refrigerantes). Como alternativa para o tratamento de rejeitos NORM, antes do descarte final, a empresa vende a unidade VacuDry. Ela é projetada para a destilação a vácuo de resíduos destinados à recuperação de água e orgânicos sem contaminação radioativa, e para concentrar os contaminantes na fase sólida. Tanto lodos como incrustações podem ser usados como material de alimentação. Quanto maior o teor de umidade, menor a eficiência, como é típico em um processo térmico.

A empresa oferece unidades de diferentes tamanhos e capacidades. Basicamente, o sistema destina-se a ser fixo, mas a menor

unidade – que cabe em um contêiner marítimo de 40’ – é semimóvel e pode ser desmontada e transportada. A Econ Industries fornece assistência no pedido de licenciamento, incluindo a realização de testes piloto como prova de desempenho. É altamente recomendável que os critérios de aceitação de resíduos de descarte sejam aprovados pelo regulador antes da implementação ou compra do sistema. O tempo entre o pedido e o recebimento da unidade varia de seis a oito meses. O preço é de aproximadamente 2,5 milhões de euros Ex-Works. Uma vantagem notável do VacuDry é a possibilidade de usar o mesmo equipamento para diferentes fluxos de resíduos para cada lote, mesmo os resíduos perigosos não radioativos.

O equipamento mostra vantagens, como: baixo consumo de energia garantido por meio de requisitos de energia controlada; alta temperatura e baixo vácuo garantem um processo completo de limpeza; sistema de emissão e sem poeira; recuperação de recursos em vez de incineração e separação de óleo, mercúrio e água dos resíduos NORM, necessários para a disposição final segura (ECON INDUSTRIES, 2021). As principais desvantagens seriam o custo do equipamento e o fato de que a destilação a vácuo não é viável para fluxos baixos ou altos de fluido, bem como possíveis perdas de pressão e energia devido a vazamentos ou rachaduras (NAIK et al., 2016).

Segue-se uma breve descrição do processo. A primeira etapa da operação é a alimentação de resíduos na câmara de vácuo. Nesse equipamento, o objetivo é aquecer o resíduo, liberando assim os gases presentes no material. Para isso, é utilizado um ambiente de vácuo que favorece a condensação dos compostos. A câmara de vácuo alcança temperaturas de até 450°C. Para aquecimento, pode ser utilizado óleo combustível, gás ou eletricidade. Além disso, para garantir maior transferência de calor, há um eixo rotativo dentro da câmara (ECON INDUSTRIES, 2021).

O segundo passo ocorre na unidade de condensação. Após o aquecimento dos resíduos, os gases são filtrados para remover partículas indesejadas, tais como poeira. Com os gases já filtrados, estes são levados aos trocadores de calor para condensar água, óleo

e mercúrio, caso este esteja presente. No fundo do trocador de calor, há sistemas que separam esses líquidos condensados. Quaisquer pequenas gotas de líquido restante são removidas usando filtros especialmente projetados (ECON INDUSTRIES, 2021).

A terceira etapa é a unidade de descarga. Os resíduos previamente tratados na câmara de vácuo são enviados para uma unidade de resfriamento, para permitir que o próximo lote de resíduos seja tratado na câmara de vácuo. Se necessário, após o resfriamento, o resíduo pode ser removido ou solidificado (ECON INDUSTRIES, 2021).

Finalmente, há a fase de tratamento do gás. Nessa etapa, os gases restantes da unidade de condensação são limpos e filtrados por um sistema que contém carvão ativado, sendo então liberados para a atmosfera. Devido ao vácuo e ao potente sistema de filtração, o número de poluentes criados pela planta é mínimo, o que facilita a aprovação ambiental (ECON INDUSTRIES, 2021).

A TECNATOM é uma empresa espanhola que presta serviços no campo nuclear desde 1957. As principais atividades da TECNATOM são o fornecimento de componentes e serviços de inspeção de integridade estrutural, treinamento de pessoal operacional usando simuladores de escopo completo e apoio de engenharia para operações industriais. A TECNATOM do Brasil, com sede no Rio de Janeiro, iniciou suas operações em 2001, fornecendo serviços de engenharia, treinamento, inspeção e logística para os setores de energia, aeronáutico e O&G. O gerenciamento dos rejeitos do NORM é citado no portfólio da empresa.

A TECNATOM foi o fornecedor da instalação de incineração de resíduos NORM para a ADNOC (Abu Dhabi National Oil Company), nos Emirados Árabes Unidos.

A incineração, em que são usadas temperaturas de até 1.000°C, é um método apropriado para o tratamento de rejeitos NORM. Um forno, normalmente rotativo, garante uma boa transferência de calor, levando assim a uma maior eficiência do processo. É necessário garantir um abastecimento adequado de ar e combustível dentro do forno, já que a combustão incompleta gera perda de eficiência, além de deixar uma alta radioatividade residual e um

maior volume de resíduos. Os rejeitos a serem incinerados podem ou não sofrer pré-processamento a fim de reduzir o tamanho dos grãos e garantir uma melhor incineração (IAEA, 2006). Deve ser dada atenção aos tipos de rejeitos que podem ser incinerados – não podem ser incombustíveis, com elevado calor específico, plásticos, metais ou explosivos. A incineração é usada principalmente para resíduos orgânicos, pois os torna estáveis e inertes (IAEA, 2006).

A principal vantagem da incineração é a grande redução no volume de rejeitos, permitindo um processo contínuo, além de ser adequada para uma ampla gama de composições. Entre as desvantagens está o fato de que os rejeitos de um mesmo processo podem ter composições diferentes e o processo é fortemente específico em relação ao volume, já que pode ser caro para pequenos volumes de resíduos (IAEA, 2006).

Exemplos de boas práticas para deposição final

As empresas internacionais descritas a seguir foram selecionadas como potenciais parceiros ou fornecedores ou ainda como exemplos de boas práticas.

O *Wergeland Group* é uma empresa familiar norueguesa fundada em 1956 e localizada na região de Gullen, na Noruega, onde operam a instalação de deposição de rejeitos NORM O&G em Stangeneset desde 2008. A instalação foi construída dentro da área do terminal marítimo da empresa.

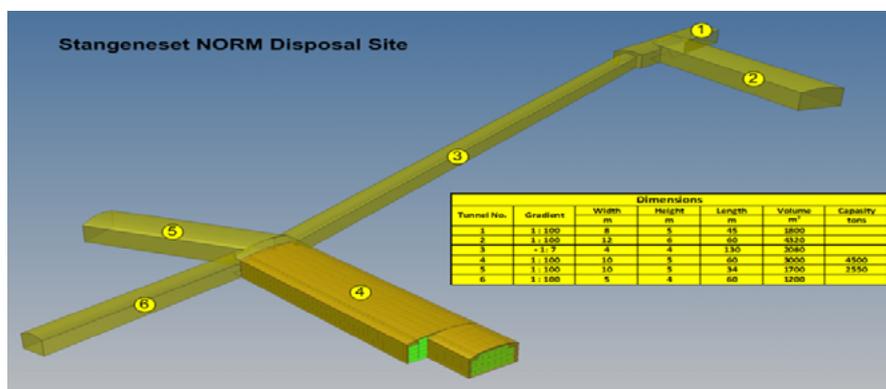
O grupo é constituído de seis empresas que desempenham uma grande variedade de atividades. Sua principal subsidiária, a *Wergeland-Halsvik AS*, fornece suporte operacional às plataformas de exploração de petróleo offshore no ciclo *back-end*, opera serviços de *ferry*, construção de estruturas de concreto, além de inspeção e reparo de navios.

As fases de planejamento e preparação das instalações em Stangeneset compreenderam oito anos. A instalação foi construída como um depósito de túnel de rocha próximo à superfície, contendo também infraestrutura para armazenamento e acondicionamento

a curto prazo dos pacotes de rejeitos NORM. A Autoridade Norueguesa de Radiação e Segurança Nuclear (DSA) e a agência ambiental deram autorização para a instalação em 2008 após uma avaliação cuidadosa em relação a possíveis impactos futuros de, por exemplo, inundações, deslizamento de lama, decomposição de barreiras e tentativa de entrada ilegal. A autorização foi desde então renovada periodicamente.

A instalação pode receber rejeitos com atividade de até 300 Bq/g. A Figura 7 mostra um desenho esquemático do repositório.

Figura 7 Vista esquemática do depósito final Stangeneset, com dimensões e capacidade de cada túnel



A formação hospedeira da instalação é uma rocha pré-cambriana saudável. Consiste em um túnel principal – 135 metros de comprimento, com uma declividade de aproximadamente 1:7 – e perpendicularmente disposto nas áreas de entrada, recepção e preparação. Os túneis de deposição de rejeitos 4 e 5 estão localizados na extremidade posterior, 16 metros abaixo do nível do mar. A premissa do projeto é que a instalação será eventualmente inundada pela água do mar.

Os rejeitos recebidos na instalação não são imobilizados dentro dos tambores. No caso das incrustações, eles são removidos das tubulações principalmente por jato de água de alta pressão nas instalações das companhias petrolíferas. Se, ao chegar às instalações, for observado o excesso de água dentro dos tambores, ele é tratado adicionando areia acima do conteúdo do tambor.

Os tambores PEAD contendo rejeitos são imobilizados em uma matriz de cimento e as camadas dos tambores são imobilizadas (Figura 8). Uma vez concluídas as operações de deposição, o túnel será preenchido com concreto e selado.

Figura 8 Tambores de rejeitos NORM alocados para imobilização



A capacidade atual da instalação é de 7.050 t, mas pode ser expandida conforme necessário. Do início da operação até 2020, um total de 3.249,5 t (13.090 tambores) foi depositado nas instalações. Espera-se que cerca de 3.000 toneladas de resíduos NORM O&G sejam produzidas na Noruega nos próximos 30 anos.

A fim de tornar a construção do depósito financeiramente viável, foi cobrada uma taxa especial para receber os resíduos. O custo de construção foi coberto pelo valor recolhido do recebimento de 300 toneladas de rejeitos. Após essa fase, a taxa cobrada foi reduzida.

Alguns detalhes operacionais são fornecidos a seguir:

- Não é permitida água livre nos embalados;
- Não é permitido óleo residual (para mais de 20% de óleo, um absorvedor é adicionado);
- Tambores permitidos somente se preenchidos até a capacidade máxima (tambores com espaço interno são preenchidos com areia);
- As embalagens de descarte são, para fins operacionais, classificadas de acordo com a atividade específica de seu conteúdo: Categoria 1: 10 a 300 Bq/g e Categoria 2: 1 a 10 Bq/g;
- O pré-tratamento antes do descarte consiste na desidratação de borras seguida de imobilização em concreto no interior do tambor. As incrustações também são imobilizadas;
- A faixa de atividade dos radionuclídeos principais são: Ra-226 - 2,73 Bq/g; Ra-228 - <0,032 Bq/g;
- Outros nuclídeos analisados são: ^{238}U , ^{235}U , ^{210}Pb , ^{227}Ac , ^{228}Th . O material NORM é embalado e analisado na instalação geradora, uma análise por processo de produção (por exemplo, para um duto);
- Após o fechamento do depósito, haverá um período de 300 anos de controle institucional;
- A Avaliação de Segurança será revisada a cada 30 anos para renovação do licenciamento;
- Para fins de segurança no trabalho, o ar é extraído pelos ventiladores dos túneis para evitar o acúmulo de radônio;
- A força de trabalho é composta de 28 pessoas.

Em relação ao processo de seleção do local:

- A seleção do local foi baseada na inteligência comercial (instalação de deposição localizada em terrenos já pertencentes à Wergeland);
- A boa comunicação com o governo e a comunidade foi mantida durante o processo de escolha do local;
- Solicitação às autoridades de licenciamento, incluindo a investigação das consequências/avaliação do impacto, foi submetida para obter a licença de operação;
- Boas medições do background são realizadas regularmente;
- O município recebe compensação financeira, paga a partir do valor recebido pelo depósito dos pacotes de Categoria 1.

Em resumo, pode-se dizer que as instalações do Stangeneset:

- Oferecem uma solução completa para os rejeitos com diferentes características perigosas, tais como metais pesados, incluindo mercúrio, produtos químicos etc.;
- Seguem as diretrizes da IAEA para o gerenciamento de rejeitos radioativos;
- Atendem aos critérios de segurança para o descarte de rejeitos radioativos com uma meia-vida muito longa.

Seu método de deposição é um bom exemplo para um depósito final de rejeitos de operações de O&G NORM que podem ser utilizados nas costas sul e sudoeste do Brasil devido à presença de estruturas compatíveis de leito de rocha.

Os *Estados Unidos* são o lar de várias empresas dedicadas à eliminação de resíduos NORM O&G.

A *Lotus LLC* é uma empresa prestadora de serviços criada em 1998 no Condado de Andrews, Texas, EUA, para fornecer o serviço de deposição de rejeitos NORM por injeção em formações geológicas. O conceito de deposição em poços de injeção partiu das melhores práticas relatadas pela AIEA (IAEA, 2003).

O site operacional da Lotus está localizado a 30 km do centro de Andrews, sobre uma formação geológica cuja camada salina é uma cama e não uma cúpula, o que traz enormes vantagens

operacionais, como a flexibilidade operacional, pois possui vários poços no mesmo local. Além disso, é uma área estritamente industrial dentro de uma região com forte vocação para serviços industriais relacionados a óleo e gás. Além disso, a Lotus possui infraestrutura capaz de descontaminar sucata e outros equipamentos contaminados e, portanto, pode receber, tratar e dispor de materiais e equipamentos contaminados.

A instalação é licenciada pela The Railroad Commission of Texas (RRCT), a agência estatal que regulamenta todos os aspectos da indústria de petróleo e gás, para receber, tratar e eliminar os rejeitos NORM provenientes da exploração de petróleo e gás, sem limite de concentração de radionuclídeos. Em 2017, a licença foi renovada com um aditivo que estendeu a permissão para receber resíduos NORM do exterior. Chevron Austrália e Shell Brasil são dois de seus clientes no exterior.

A própria Lotus financiou e desenvolveu o projeto da construção dos poços de injeção, incluindo seu exclusivo processo patenteado.

Sua tecnologia é um exemplo de sucesso para um depósito final de rejeitos NORM de operações O&G em regiões remotas do Brasil, principalmente nas regiões norte e nordeste, onde as estruturas geológicas adequadas podem ser prospectadas para a deposição de rejeitos nas proximidades das instalações. A reinjeção de gás é um método já praticado em alguns desses campos.

Outro fornecedor norte-americano de serviços de eliminação de rejeitos NORM é a Clean Harbors, que opera instalações na Deer Trail, Colorado, e em Buttonwillow, Califórnia. A tecnologia utilizada é a deposição em aterros sanitários, seja direta ou pré-tratamento (solidificação, encapsulamento, estabilização) seguido de deposição. Essas instalações estão autorizadas a aceitar rejeitos com concentrações de Ra-226/Ra-228 até 74 Bq/g (2.000 pCi/g) e 67 Bq/g (1.800 pCi/g), respectivamente.

A Tabela 7 mostra as instalações autorizadas pelo Departamento de Saúde Pública e Meio Ambiente do Colorado para descarte de rejeitos NORM no território estadual e os respectivos limites de radionuclídeos. Todas são instalações do tipo aterros sanitários projetados.

Tabela 7. Instalações autorizadas no Colorado (EUA) para deposição de NORM (CDPHE, 2021)

Instalação	Limites dos radionuclídeos
Clean Harbors Deer Trail	. Rejeitos de petróleo e gás: o total de ^{226}Ra e ^{228}Ra não deve exceder 12.200 pCi/g em scale ou 6.000 pCi/g em outras formas. ^{210}Pb não deve exceder 10.000 pCi/g. O total de rejeitos de O&G para disposição não deve exceder 50.000 toneladas ao ano. . Outros rejeitos: a atividade total dos radionuclídeos não deve exceder 2000 pCi/g. ^{226}Ra não deve exceder 222 pCi/g. ^{210}Pb não deve exceder 666 pCi/g.
Pawnee Waste	Ra e ^{228}Ra combinados menor ou igual a 50 pCi/g, urânio natural menor ou igual a 10 pCi/g, tório natural menor ou igual a 10 pCi/g, ^{210}Pb menor ou igual a 10 pCi/g e ^{210}Po menor ou igual a 10 pCi/g.
Waste Connections Southside Landfill	Apenas urânio, menor que 339 pCi/g.
Public Services Foothills Landfill	^{226}Ra e ^{228}Ra combinados menor ou igual a 50 pCi/g, urânio natural menor ou igual a 245 pCi/g, tório natural menor ou igual a 50 pCi/g, ^{210}Pb menor ou igual a 3 pCi/g e ^{210}Po menor ou igual a 3 pCi/g.

Outro bom exemplo de gestão NORM O&G vem dos *Emirados Árabes Unidos*. A autoridade nuclear dos Emirados, FANR (Autoridade Federal de Regulamentação Nuclear), desenvolveu modelos de avaliação de desempenho de segurança (PSA) para estudar a liberação do repositório. Esses modelos propõem um projeto que consiste em rejeitos em recipientes de aço com argamassa colocados dentro de sobre-embalados de concreto recheados com argamassa, depois uma camada de solo sobreposta e uma de geo-membrana. Esse projeto minimiza a liberação de radônio do repositório. De acordo com a prática internacional, assume-se um período de supervisão de 300 anos, que inclui tanto períodos de controle institucional ativo como passivo e a avaliação de segurança é realizada até 10.000 anos após o fechamento.

A partir de 2019, a empresa petrolífera estadual ADNOC (Abu Dhabi National Oil Company) detém uma Licença de Operação para suas Instalações de Tratamento e Deposição de Rejeitos NORM emitida pela FANR. Essa instalação combinada é projetada para tratar e descartar borra contaminada com NORM, incrustações, equipamentos e tubulações (AL SHEHHI, 2021).

Os processos secundários de gestão do NORM foram selecionados entre várias alternativas, que devem cumprir com os objetivos de deposição previamente estabelecidos (ABUAHMAD, 2013).

- Contenção (de erosão, intrusão, dispersão);
- Isolamento ($< 0,3 - 1$ mSv/ano, considerando irradiação direta, inalação de radônio);
- Manutenção mínima e responsabilidade futura;
- Longevidade (> 200 anos);
- Relação custo-eficácia.

No total, foram identificados 12 métodos de segregação/volume, 3 métodos de solidificação e 9 métodos de encapsulamento ou eliminação, investigados e classificados no exercício de comparação. Os processos selecionados e implementados no ADNOC incluem:

- Descalcificação de tubulações e descontaminação de equipamentos visando à reutilização ou à reciclagem;
- Conversão de incrustações, borras e combustíveis por incineração;
- Acondicionamento por solidificação para uma forma estável de resíduos que possa ser descartada com segurança;
- Descarte em repositório projetado próximo à superfície, baseado em um conceito de barreiras múltiplas.

As principais suposições consideradas no PSA foram (FANR, 2021):

- Uma restrição de dose de 0,3 mSv por ano a partir de uma base de projeto, considerando cenários de exposição potencial muito além do tempo para o controle institucional assumido;
- Uma invasão inadvertida que não perturbe as funções de segurança do projeto da instalação de eliminação é considerada como uma exposição potencial planejada como parte da base do projeto, e a restrição de dose se aplica a essa situação;

- Consideração de eventos e processos naturais extremos, ou seja, eventos acidentais fora da base do projeto;
- A intrusão inadvertida, incluindo tanto a intrusão direta nos resíduos como a ruptura humana das barreiras projetadas, são consideradas como eventos acidentais fora da base do projeto;
- Assume-se um período de supervisão de 300 anos;
- A avaliação de segurança é realizada até 10.000 anos após o fechamento.

Uma componente-chave da avaliação de segurança é o desempenho do sistema de cobertura (camadas de solo e geo-membrana), uma vez que ele prevê a retenção dos resíduos e limita as potenciais liberações de radônio para a atmosfera. Foi realizada uma avaliação da resistência à erosão do sistema de cobertura, utilizando uma abordagem recomendada pelo NRC dos EUA (NRC, 1985).

Outra barreira considerada no PSA é a unidade de eliminação de resíduos, que consiste nos resíduos em recipientes de aço com argamassa colocados dentro de embalagens de concreto recheadas com concreto. A intrusão humana inadvertida é considerada o único evento ou processo perturbador de credibilidade, que pode afetar a capacidade da cobertura de continuar a funcionar até 10.000 anos. Considerando o projeto da cobertura e a avaliação do candidato, é razoável supor que no momento do fechamento uma cobertura adequadamente projetada poderia continuar a fornecer um desempenho adequado por 10.000 anos no futuro.

Cenários que não perturbam as características de engenharia da instalação de descarte são considerados cenários de exposição potencial planejados e estão sujeitos à restrição de dose de 0,3 mSv/y. Isso abrange o cenário inadvertido de intrusão no local, incluindo um residente no local, desde que a cobertura da instalação de descarte permaneça no local.

Cenários que envolvem a remoção das características projetadas, incluindo cenários de perfuração e cenários em que um intruso ou residente no local é exposto a resíduos exumados, são considerados uma situação acidental, que está sujeita à estrutura

de otimização da AIEA (IAEA, 2011), que recomenda:

- Se a dose anual for inferior a 1 mSv/y, não se justificam mais esforços para reduzir a probabilidade de intrusão ou para limitar suas consequências;
- Se a dose anual for inferior a 20 mSv/y, esforços razoáveis são justificados para reduzir a probabilidade de intrusão ou as consequências;
- Se a dose anual for superior a 20 mSv/y, devem ser consideradas opções alternativas de descarte;

O *Canadá* possui várias instalações de deposição de NORM licenciadas ou em operação localizadas em todo o país. A *Pembina Landfill* na província de Alberta, propriedade da SECURE Energy, é uma instalação operacional que aceita todos os tipos de rejeitos NORM: incrustações minerais em tubulações, borras e meios filtrantes e equipamentos contaminados (SECURE ENERGY, 2021). O limite máximo de concentração global aceito é de 70 Bq/g, mas limites específicos para ^{226}Ra – 55 Bq/g, urânio natural – 2 Bq/g e tório natural – 6 Bq/g – também são impostos (não há restrições para ^{230}Th). As características do projeto do aterro consistem em um revestimento de argila projetada, dois revestimentos sintéticos, detecção de vazamento, sistema de coleta de lixiviado e uma série de programas de monitoramento ambiental.

Sólidos industriais perigosos e resíduos perigosos do campo petrolífero podem ser codispostos nas trincheiras de Pembina.

A *Fort St. John Facility*, um aterro sanitário em British Columbia, aceita rejeitos NORM até 70 Bq/g, com exceção de ^{226}Ra , restrito a 5 Bq/g (HUGHES e CUTHILL, 2017).

Outra província que permite a eliminação de rejeitos NORM é Saskatchewan. Sua regulamentação permite que “água e outros fluidos residuais não perigosos produzidos em associação com atividades de óleo e gás ou não óleo e gás sejam descartados em uma piscina subterrânea por meio de um poço de descarte” (SASKATCHEWAN, 2021). Existem atualmente instalações de deposição geológica aprovadas em formações salinas operadas respectivamente

pela *Plains Environmental Ltd* (Melville) (SASKATCHEWAN, 2021) e pela *Tervita Corp* (Unity Saskatchewan), com limites respectivos de 300 Bq/g por isótopo e 70 Bq/g de atividade específica total.

O Canadá também é o lar da *Terralog Technologies Inc.* (TTI), uma empresa de serviços sediada em Calgary, Alberta. A TTI é proprietária da tecnologia SFI (*Slurry Fracture Injection*) para injeção de rejeitos em formações geológicas profundas. O portfólio de serviços da TTI inclui projetos de injeção NORM na Indonésia, na Arábia Saudita, nos EUA, no Kuwait e na Noruega.

As informações sobre as empresas citadas neste item estão resumidas no Anexo I.

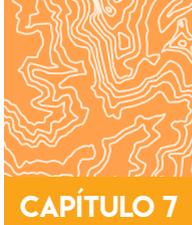
Referências

- ABUAHMAD, H. *Construction of a Naturally Occurring Radioactive Material Project in the BeAAT Hazardous Waste Facilities*. ICRP 2013 Proceedings.
- AL SHEHHI, A. A. *The UAE NORM Facility Licensing*. Presentation at FANR/ADNOC/CDTN/PUC-Rio meeting, February 4, 2021.
- CDPHE. COLORADO DEPARTMENT OF PUBLIC HEALTH & ENVIRONMENT.
- FANR. FEDERAL AUTHORITY FOR NUCLEAR REGULATION. *Licensing Basis for the NORM Waste Disposal Facility as briefly discussed during the CDTN/FANR/ADNOC meeting*. Explanatory sheet to presentation at FANR/ADNOC/CDTN/PUC-Rio meeting, February 4, 2021.
- HUGHES, G. e CUTHILL, C. *Management of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Western Canada*. Presentation at CRPA Conference Saskatoon, 2017.
- IAEA. *Disposal of Radioactive Waste*. IAEA N° SSR-5, Vienna, 2011.
- NRC. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Designing Protective Covers for Uranium Mill Tailings Piles: A Review Prepared by P. A. Beedlow, G. B. Parker*. NUREG/CR-4075. 1985.
- SASKATCHEWAN GOVERNMENT. *Disposal Wells*.
- SASKATCHEWAN MINISTRY OF ECONOMY. *Upstream Oil and Gas Facility License Nr. WPF 2006-02*.
- SECURE ENERGY.
- ECON INDUSTRIES. *VacuDry working principles*.

IAEA. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Radiation protection and the management of radioactive waste in the oil and gas industry*. Safety Reports Series N° 34. Vienna: IAEA, 2003.

IAEA. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Application of Thermal Technologies for processing of radioactive waste*. International Atomic Energy Agency (IAEA), December, p. 1–90, 2006.

NAIK, Sujata et al. *Distillation Columns*. [S. l.], 2016.



OPÇÕES DE TRATAMENTO E DEPOSIÇÃO PARA O BRASIL

Após um levantamento abrangente das tecnologias e dos métodos disponíveis no Brasil e no mundo para o tratamento e a deposição de rejeitos NORM O&G, e após a realização de uma pesquisa sobre as legislações nacionais e internacionais aplicáveis, propõe-se o conjunto de opções para etapa final do ciclo de vida do material descrito neste capítulo.

Esta proposta é feita considerando-se duas restrições. Em primeiro lugar, avaliando que a exportação de rejeitos NORM não é uma opção sustentável, devido aos custos envolvidos e à dependência da legislação dos países de destino ou de trânsito, apenas as opções que pudessem ser totalmente implementadas dentro do território brasileiro foram consideradas. Como segunda restrição, apenas métodos licenciados pelas autoridades reguladoras dos respectivos países foram considerados viáveis para o contexto brasileiro.

O uso de minas de sal abandonadas, um método potencialmente promissor para a Região Nordeste do Brasil, não foi contemplado. Ele foi descartado devido ao risco de colapso nesses tipos de minas, como ocorreu nas minas da Brasken na cidade de Maceió, Alagoas, o que resultou em um “desastre geológico que afundou o solo, causou tremores de terra e ameaçou a vida de cerca de 40 mil pessoas de cinco bairros de Maceió” (VALE, 2021).

Os métodos considerados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Métodos de deposição propostos para o Brasil

Método	Exemplos	
	Instalação	País
Túnel escavado em rocha superficial	Stangeneset, Wergeland	Noruega
Aterro industrial	Ruweis, ADNOC ⁴	Abu Dhabi, Emirados
	Clean Harbors Deer Trail, Colorado	EUA
	Pawnee Waste, Colorado	
	Pembina Landfill, Alberta	Canadá
	Fort St. John Facility, British Columbia	
Injeção em formação geológica	Lotus, Texas	EUA
	KSA, Saudi Aramco (operado por Terralog)	Arábia Saudita

Túnel escavado em rocha superficial

Um exemplo significativo desse tipo de deposição é aquele operado pela empresa Wergeland, da Noruega, em seu terminal na área portuária industrial de Gullen, conforme descrito no Capítulo 6.

Segundo os especialistas consultados (Marcelo Motta de Freitas/PUC-Rio e Francisco Javier Rios/CDTN), a construção de um depósito similar no Brasil é viável, especificamente no litoral das regiões sul e sudeste do Brasil, desde o Rio Grande do Sul até o Espírito Santo. Como já existe uma extensa e consolidada experiência em obras de engenharia no Brasil, certamente haverá empresas brasileiras capazes de construir tais instalações.

Aterro industrial

Os aterros industriais para resíduos perigosos podem ser considerados como uma opção adequada para a disposição final de rejeitos NORM da indústria do petróleo, mesmo para concentrações de ^{226}Ra + ^{228}Ra acima do

4 A instalação de deposição em Ruweis é notavelmente mais robusta do que um aterro industrial comum. Seus compartimentos de concreto são típicos de depósitos próximos à superfície para rejeitos de baixo e médio níveis.

nível de dispensa - 1 Bq/g. Para tanto, é necessário que o órgão regulador emita uma licença condicional, sujeita ao cumprimento de critérios específicos de dose, tais como dose para indivíduos do público abaixo de certos valores estabelecidos, sendo aceitos internacionalmente valores na faixa de 0,3 a 1 mSv/a.

Estando essas instalações licenciadas pela autoridade ambiental competente, caberá ao órgão regulador nuclear emitir a licença condicional para sua operação. Uma dificuldade atual nessa alternativa reside na falta de regulamentação sobre os cenários a serem adotados na avaliação de dose.

No Reino Unido, rejeitos com concentrações de atividade abaixo de 5 Bq/g podem ser dispostos em depósitos de resíduos comuns, até o limite de 50 GBq/a, e aqueles com concentrações na faixa de 5 a 10 Bq/g em depósitos controlados, desde que seja possível demonstrar que a dose para indivíduos do público é inferior a 0,3 mSv/ano. É relevante notar que a maioria dos rejeitos da Petrobras tem concentração de ^{226}Ra inferior a 5 Bq/g (VALINHAS, 2021).

A construção e a operação de aterros para resíduos perigosos estão previstas no marco legal brasileiro, com destaque para a norma ABNT-NBR-10157/87. Considerando a avaliação de custo nos EUA, cada tonelada métrica depositada tem um custo aproximado de US\$200 (HERBERT, 2021).

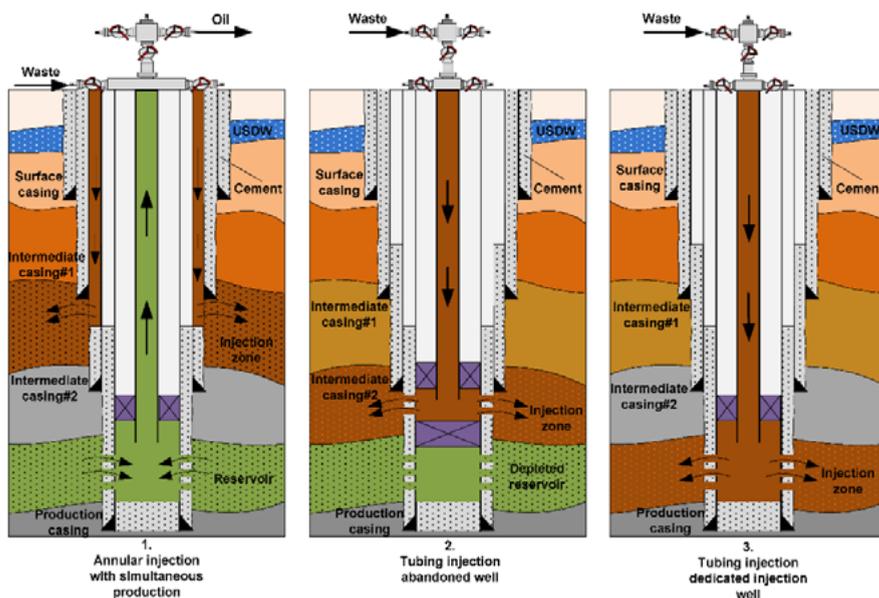
Injeção em formação geológica

A injeção em formações geológicas através de poços pode ser dividida em quatro tipos (HEBERT, 2021):

- Anular;
- Tubular por fraturamento;
- Em formação de cobertura (*Cap Rock/sub-fracture injection*);
- Em caverna salina (*Cavern well injection*).

A Figura 9 ilustra os tipos anular e tubular:

Figura 9. Injeção anular (1) e tubular (2 e 3)



Fonte: GAURINA-MEDIMUREC, 2020.

Injeção anular

A injeção anular é utilizada com vantagem quando se tem um arranjo de poços operacionais próximos, condição que permite a injeção de rejeitos NORM simultaneamente à produção, como ilustrado à esquerda na Figura 9. Esse mesmo poço pode ser, posteriormente, usado na modalidade de injeção tubular, quando a produção é abandonada, como visto na ilustração central da mesma figura.

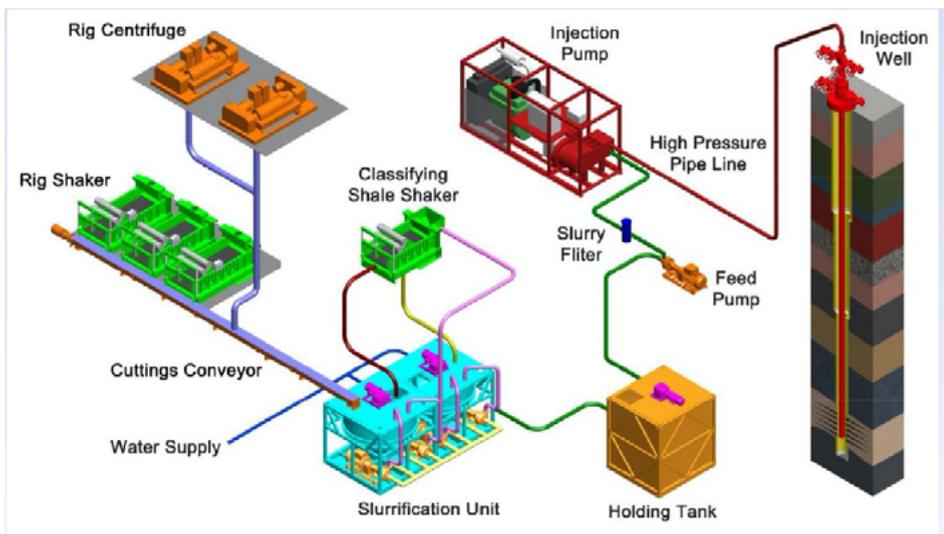
Cabe observar que poços de injeção podem ser adicionalmente classificados de acordo com seu objetivo intrínseco: poços perfurados intencionalmente para fins de injeção de resíduos (poços dedicados, à direita na Figura 9) ou adaptados de sua finalidade original (poços convertidos, na posição central da mesma figura).

Um exemplo deste último, ilustrado Figura 10, é proposto pelo Grupo Vitória Ambiental, que dispõe, em sua área de exploração no Espírito Santo, de diversos poços onshore abandonados. O grupo

possui experiência na perfuração de poços profundos e propõe-se a realizar testes com barita e traçadores não radioativos no sentido de verificar a capacidade de armazenamento da formação geológica e dominar e monitorar o processo de injeção.

Não há experiência no licenciamento dessa atividade no Brasil.

Figura 10. Esquema para injeção de resíduos NORM O&G proposto pelo Grupo Vitória Ambiental



Fonte: CHIABAI, 2021.

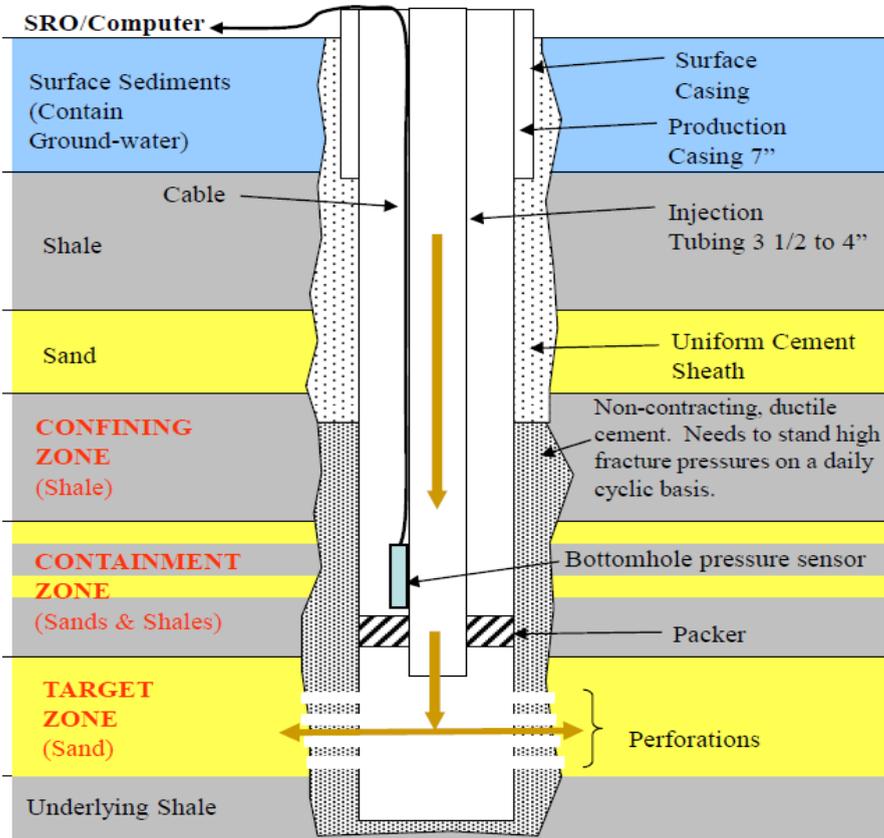
Injeção por fraturamento

A técnica de fraturamento para a exploração de óleo de xisto tem sido amplamente utilizada nos EUA e é objeto de grande controvérsia devido à contaminação dos aquíferos vizinhos.

A utilização da técnica de fraturamento de rochas do tipo arenito ou do uso de rochas fraturadas do tipo arenito para fins de armazenamento de resíduos NORM é ilustrada na Figura 11. Sua principal vantagem, quando comparada com a utilização de poços abandonados, é a maior capacidade de injeção. A empresa canadense Terralog, proprietária da tecnologia SFI (*Slurry Fracture*

Injection), oferece serviços baseados nesse tipo de injeção e seu portfólio de serviços inclui projetos de injeção na Indonésia, na Arábia Saudita, nos EUA, no Kuwait e na Noruega (LATIF, 2021).

Figura 11. Esquema da deposição de resíduos usando a técnica de injeção em rochas fraturadas do tipo arenito



Fonte: LATIF, 2021.

Métodos de deposição segundo a distribuição geográfica da produção nacional

A distribuição geográfica dos campos de petróleo e gás no Brasil, associada às características das formações geológicas onde esses campos estão localizados e à produção de cada região, dita em grande medida os possíveis métodos de deposição viáveis em cada região do país.

Segundo a ANP (ANP, 2020), os 649 campos offshore foram responsáveis por 97% da produção nacional de petróleo em 2020, tendo os 6.558 campos onshore produzido os 3% restantes. Considerando apenas os 30 maiores campos, os campos offshore têm uma produção ainda mais impressionante, gerando 98,4% do volume total (922.754 bbl/d offshore contra 15.107 bbl/d onshore) (Figura 12 e Tabela 9).

Figura 12. Campos petrolíferos com maior produção no Brasil em 2020

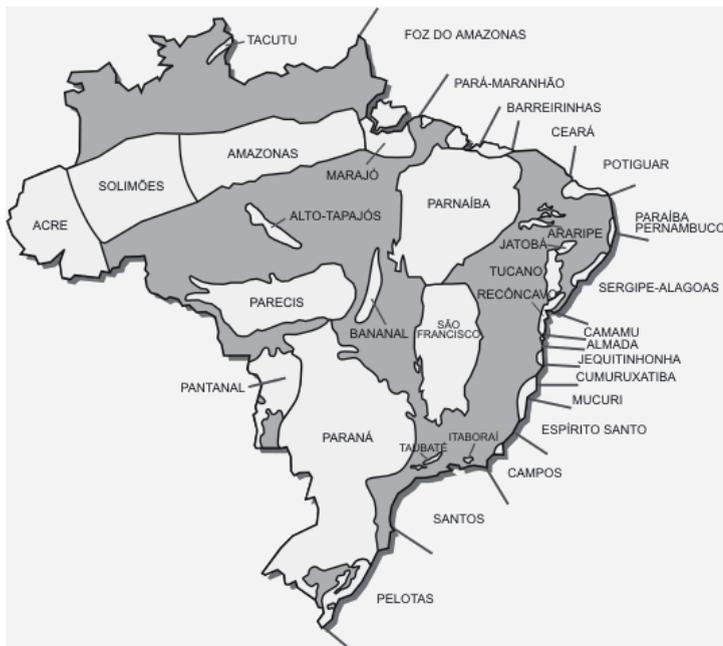


Tabela 9. Produção de petróleo por campo em 2020

Campo	Tipo	% produção
Santos	Offshore	64,2
Campos	Offshore	32,1
Potiguar	Onshore	1,1
Recôncavo	Onshore	0,8
Espírito Santo	Onshore/Offshore	0,6
Solimões	Onshore	0,5
Sergipe	Onshore/Offshore	0,5
Alagoas	Onshore	0,1
Ceará	Offshore	0,1

Fonte: ANP, 2020.

Uma estratégia interessante para otimização da etapa de deposição de resíduos NORM seria aglomerar os campos produtivos em compactos regionais. Dessa forma, vários campos poderiam compartilhar a mesma infraestrutura de deposição de resíduos, com evidentes vantagens econômicas e logísticas. O arranjo proposto no presente trabalho é mostrado na Tabela 10.

Tabela 10. Compactos regionais de campos petrolíferos

Compacto	Participação na produção nacional (%)	Campos
Amazonas	0,5	Solimões
Nordeste	2,6	Ceará
		Potiguar
		Recôncavo
		Sergipe-Alagoas
Leste	0,6	Espírito Santo
Sul-Sudeste	96,3	Campos
		Santos

Os critérios adicionais a serem considerados na seleção do método de deposição para cada compacto são sua participação na produção nacional e suas atividades de descarte anteriores. Especificamente no caso de reinjeção, é importante identificar se essa prática já foi feita em poços da região.

Os métodos de tratamento e deposição para cada compacto são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Métodos de tratamento e deposição por compacto regional

Compacto	Método de deposição	Tratamentos possíveis
Amazonas	Reinjeção em poço abandonado (prática anterior para gás)	Preparação para injeção
	Transporte para deposição fora da região	Redução de volume e umidade (sistema VacuDry)
Nordeste	Reinjeção em poço abandonado (prática anterior para gás nos campos Recôncavo e Sergipe)	Preparação para injeção
	Transporte para deposição fora da região	Redução de volume e umidade (sistema VacuDry) Acondicionamento em bombonas
	Aterro industrial	Acondicionamento em bombonas Absorção do excesso de óleo Drenagem do excesso de água
Leste	Reinjeção em poço abandonado (poço-teste Vitória Ambiental)	Preparação para injeção
Sul-Sudeste	Túnel escavado em rocha próximo à superfície	Acondicionamento em bombonas Absorção do excesso de óleo Drenagem do excesso de água
	Aterro industrial	Acondicionamento em bombonas Absorção do excesso de óleo Drenagem do excesso de água

A decisão sobre quais dessas tecnologias adotar no Brasil deve ser tomada considerando-se também dimensões não estritamente técnicas. Para uma comparação mais abrangente foi selecionado no presente estudo a metodologia *Nível de Maturidade Tecnológica*, descrita no próximo capítulo.

MATURIDADE TECNOLÓGICA

Considerações gerais

Este capítulo tem como objetivo descrever o processo de adaptação da escala e do método TRL / NMT para tecnologias de tratamento e descarte para resíduos NORM gerados pela indústria de O&G no Brasil. A aplicação do método também será considerada em todos os seus níveis, incluindo a decisão dos critérios de avaliação para as tecnologias selecionadas como opções possíveis para o projeto.

O Nível de Maturidade Tecnológica (NMT), ou Technology Readiness Level (TRL), é uma métrica sistemática criada pela National Aeronautics and Space Administration (NASA), a agência espacial norte-americana, projetada originalmente com sete níveis, por Stan Sadin, em 1974 (BANKE, 2010), que permite avaliar, em determinado momento, o nível de maturidade de uma tecnologia fornecida e comparar de forma consistente a maturidade entre diferentes tecnologias, considerando todo o contexto de um sistema específico, sua aplicação e seu ambiente operacional (MANKINS, 1995). Frequentemente, um único componente ou tecnologia pode apresentar-se em diferentes TRL para diferentes aplicações. Essa métrica tem sido adotada por diversas instituições no Brasil, como a Associação Brasileira de Pesquisa e Inovação (EMBRAPII), o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e o Instituto

Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), entre outras, com o objetivo de identificar se o projeto segue como etapas que são apoiadas por essas instituições e como um indicador de que o recurso utilizado foi avançado em termos de tecnologia.

De acordo com Andrade et al. (2019), maturidade tecnológica refere-se aos níveis de prontidão de determinado elemento tecnológico para ser incorporado a um sistema a fim de cumprir uma missão específica em seu ambiente operacional. Em outras palavras, o NMT mede a distância que uma tecnologia está de sua aplicação e de seu consumidor final.

O desafio da análise de um elemento tecnológico em determinado cenário, no tempo e no espaço, é poder fazer avaliações claras, bem documentadas, fundamentadas e independentes sobre seu nível de preparação ou prontidão tecnológica, bem como seus riscos. Em muitas organizações, as avaliações usando NMTs ou TRL provaram ser altamente eficazes na comunicação do status de novas tecnologias. Assim, utilizando essa metodologia, é possível ordenar tecnologias visando à sua comparação para uso atual ou para o seu desenvolvimento, tendo em vista a sua futura implementação, ou para outros fins.

A técnica foi elaborada inicialmente com sete etapas/níveis; hoje são nove níveis, avaliando a tecnologia desde a sua concepção. Atualmente, ele apresenta um conjunto de métricas escalonáveis, variando do nível 1; o mais baixo, até o nível 9; o mais alto, conforme proposto por John Mankins, em 1995. No Brasil, a aplicação do NMT é padronizada pela ABNT-NBR ISO-16290 (Sistemas espaciais – definições de níveis de maturidade de tecnologia (NMT-TRL) e avaliação de seus critérios).

Quando uma tecnologia está no TRL 1, a ideia de pesquisa científica está sendo iniciada, os primeiros indícios de viabilidade são traduzidos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) futuros e os resultados estão sendo colhidos. O TRL 2 ocorre uma vez que os princípios básicos foram estudados e algumas aplicações práticas podem ser aplicadas às descobertas iniciais. O TRL 2 é muito

especulativo, pois quase não há evidências experimentais que comprovem o conceito da tecnologia.

Uma tecnologia pode ser promovida para TRL 3 a partir do momento que o projeto começa a ser desenhado, ainda em fase de pesquisa. Nesse nível, são realizados estudos analíticos e laboratoriais para confirmar que se trata de uma tecnologia viável e pronta para prosseguir com o processo de desenvolvimento. Frequentemente, durante o TRL 3, um modelo de prova de conceito para a tecnologia é construído.

Uma vez que a prova de conceito está pronta, a tecnologia avança para o TRL 4. Durante o TRL 4, vários componentes são testados uns contra os outros. O TRL 5 é uma continuação do TRL 4, no entanto uma tecnologia que está nesse nível é identificada como uma tecnologia de “breadboard” e deve passar por testes mais rigorosos do que a tecnologia que está apenas no TRL 4. As simulações devem ser realizadas em ambientes que são mais semelhantes a ambientes reais. Assim que o teste do TRL 5 estiver concluído, a tecnologia pode avançar para o TRL 6. Uma tecnologia do TRL 6 tem um protótipo ou modelo representacional totalmente funcional.

A tecnologia TRL 7 requer que o modelo de trabalho do protótipo seja demonstrado em um ambiente espacial. A tecnologia TRL 8 foi testada e qualificada e está pronta para implementação em uma tecnologia ou sistema de tecnologia existente. Uma vez que uma tecnologia foi “comprovada em voo”, ou seja, implementada e comprovada em uma situação real, durante uma missão ou operação bem-sucedida, ela pode ser considerada uma tecnologia TRL 9 (MANKINS et al., 1995).

Figura 13. Níveis de maturidade tecnológica



Fonte: Adaptado do site web.archive.org.

Adaptação do TRL para diferentes setores industriais

O modelo Prado-MMGP (modelo de Maturidade em Gestão de Projetos) foi lançado em dezembro de 2002 e contempla a experiência do consultor Darci Prado, que tem mais de 40 anos de carreira nesse assunto em empresas como IBM, INDG e FALCONI. O objetivo era criar um modelo simples e fácil de usar, um modelo que forneça resultados confiáveis.

O método TRL foi aceito mundialmente devido à sua eficácia comprovada na medição do nível de preparação da tecnologia, mas seus benefícios se estendem além disso e atingem a indústria, as universidades e até mesmo o ecossistema de inovação.

Uma das principais consequências positivas do uso do TRL foi a padronização da classificação da tecnologia em todo o mundo. Começando pelo uso em solo norte-americano, expandindo-se pela referência da Comissão Europeia e, posteriormente, atingindo o mundo inteiro, o método padronizou a forma como as novas tecnologias são avaliadas. Como exemplos de promotores de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação no Brasil que utilizam o TRL, podemos citar BiotechTown, FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos),

BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) e EMPRAPII (Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial).

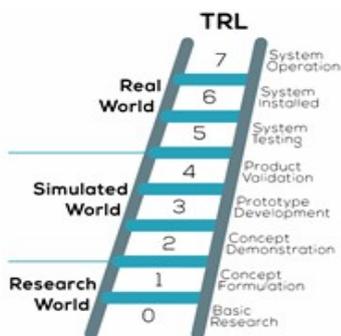
Com uma visualização mais acessível e simplificada das etapas, os gestores têm mais facilidade para gerenciar os recursos investidos nos projetos, entendendo melhor a quantidade de recursos que cada tecnologia necessita e os possíveis retornos. Além de auxiliar na tomada de decisão, esse benefício também dá suporte ao gerenciamento de aplicativos, possibilitando a padronização dos setores e dos níveis a serem apoiados.

O benefício também atinge pesquisadores empreendedores que estão desenvolvendo projetos e buscando apoio, uma vez que os investidores terão mais facilidade para entender o nível de desenvolvimento de tecnologia mesmo sem um conhecimento profundo na área.

A partir desses conceitos e correlações sobre as fases de desenvolvimento de um projeto de PD&I, é possível indicar em que nível de maturidade tecnológica um projeto se encontra e, em relação aos mecanismos de incentivo à inovação com base na escala do TRL, identificar as possibilidades de acesso a oportunidades de recursos financeiros para inovação.

Por setor, como para óleo e gás por exemplo, existe a escala TRL recomendada pelo API RP 17Q em conjunto com a ISO 20815, com sete níveis conforme mostrado na Figura 14 a seguir.

Figura 14. Escala TRL recomendada pela API RP 17Q em conjunto com a ISO 20815



A figura a seguir mostra um exemplo de uma adaptação dos níveis de prontidão para melhor atender às necessidades do setor de pesquisa Transmédico.

Figura 15. Adaptação da escala TRL para o desenvolvimento de farmacêuticos

	NMT 1	NMT 2	NMT 3	NMT 4	NMT 5	NMT 6	NMT 7	NMT 8	NMT 9		
	Ideia básica	Desenvolvimento e conceito	Prova experimental do conceito	Processo validado em laboratório	Processo validado em equipamento de produção	Validação da capacidade de processo em equipamento de produção	Validação da capacidade de processo em lote econômico	Validação da capacidade sobre uma parcela das partes	Validação da capacidade sobre todas as partes e por longos períodos		
						FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4		
	Pesquisa básica		Pesquisa pré-clínica		Pesquisa pré-clínica tardia.		Avaliação preliminar da tolerabilidade e da farmacocinética	Eficácia e segurança em um pequeno grupo de voluntários doentes	Ensaios clínicos controlados: relação benefício/risco	Identificação dos efeitos adversos que podem ocorrer após a comercialização	
	Pesquisa			Desenvolvimento							
Fase	 POP Prova de princípio			 Estudos pré-clínicos		Estudos clínicos  Fase 1  Fase 2  Fase 3			 Registro		
Duração	2-3 anos			2-4 anos		2-3 anos	2-4 anos	2-5 anos	1-2 anos		
Objetivo	Comprovar que uma substância tem o efeito desejado por meio de testes <i>in vitro</i> e em animais			Avaliar a segurança do produto e suas características biológicas		Comprovar a segurança do produto, aplicado em forma aguda em indivíduos saudáveis e definir a dose apropriada			Avaliar a eficácia e os efeitos colaterais no grupo reduzido de indivíduos doentes. Quando possível, avaliar propriedades farmacocinéticas e farmacodinâmicas	Avaliar a eficácia e os efeitos colaterais no longo prazo. Envolve grupo mais amplo de pessoas doentes	Obter a permissão para comercializar o produto
	Fase pré-clínica				Fase clínica						
	 Caracterização química		 Estudos bioquímicos		  Estudos em modelos animais		 Estudos com seres humanos				

Fonte: VELHO, S. R. K. et al. *Nível de Maturidade Tecnológica: uma sistemática para ordenar tecnologias. Parcerias Estratégicas*, v. 22, n. 45, p. 119-140, 2007.

TRL como uma ferramenta de PD&I

Na avaliação da maturidade tecnológica, por meio do NMT, também é importante indicar o esforço necessário a ser realizado na P&D de cada tecnologia, dando subsídios aos pesquisadores para a realização de seus projetos, bem como abrindo novas frentes de estudos e pesquisas. Assim, aplicando esse conjunto de métricas, é possível reduzir riscos e incertezas no desenvolvimento e na aplicação de novas tecnologias.

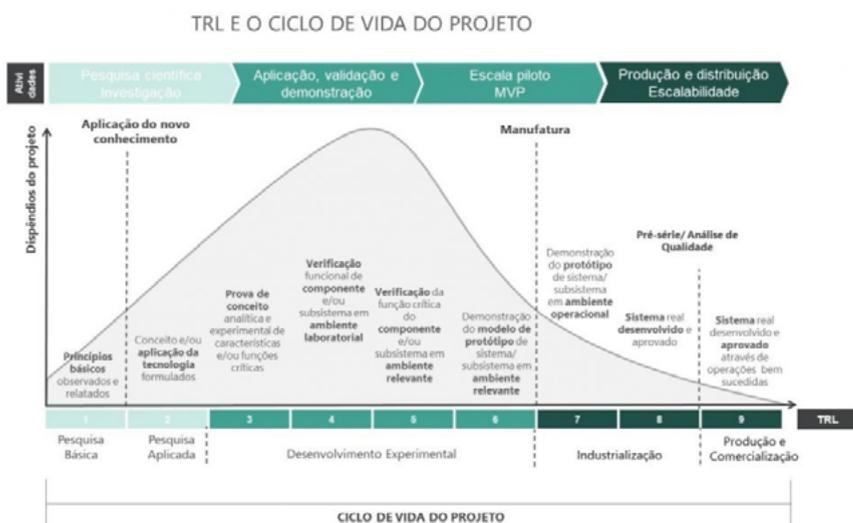
Independentemente da escala em uso neste momento, podemos dizer que as vantagens são claras para a gestão do progresso em PD&I e no apoio à tomada de decisão, destacando aspectos como:

Comparação dos estágios atuais de desenvolvimento;

- Gerenciamento de riscos;
- Alinhamento entre as equipes de desenvolvimento e vendas;
- Tomada de decisões relacionadas a investimentos e esforços por estágio de desenvolvimento.

Tomar decisões oportunas sobre perseverança em um desenvolvimento tecnológico influenciará diretamente no custo do projeto. Além disso, realizar todos os testes necessários para confirmar se a tecnologia está suficientemente “madura” antes de colocá-la no mercado significa preservar a imagem da empresa. Isso pode ser melhor compreendido no gráfico tradicional de “custos de mudança de produto”, em que o projeto pode influenciar 70% dos custos do ciclo de vida, embora represente apenas 5% do orçamento final (HUTHWAITE, 1992). A Figura 16 fornece orientações quanto ao nível de maturidade tecnológica de um determinado projeto de inovação, considerando as macro etapas do ciclo de vida de um projeto.

Figura 16. Relação entre o nível de maturidade e o ciclo de vida de um projeto



Fonte: Site ABGI - <https://abgi-brasil.com/trl-recursos-financeiros-por-niveis-de-maturidade-tecnologica/>

Ainda assim, no que diz respeito à importância da utilização do TRL, os níveis de maturidade tecnológica têm sido amplamente utilizados para justificar a captação de recursos financeiros públicos e privados pela equipe de P&D. Atualmente, há uma tendência de agências de fomento utilizarem o TRL para avaliar a relevância de uma tecnologia, sendo possível estimar o potencial de projetos ou a curva de investimentos necessários.

Calculadoras de TRL

Ao avaliar o nível de TRL de uma tecnologia, vários aspectos devem ser considerados. Para fazer isso de maneira mais uniforme, foram criados programas automáticos chamados calculadoras TRL. Com esses softwares, o interessado responde a várias perguntas e o software classifica a tecnologia pelo TRL. As calculadoras TRL permitem às empresas classificar e/ou resumir seus portfólios

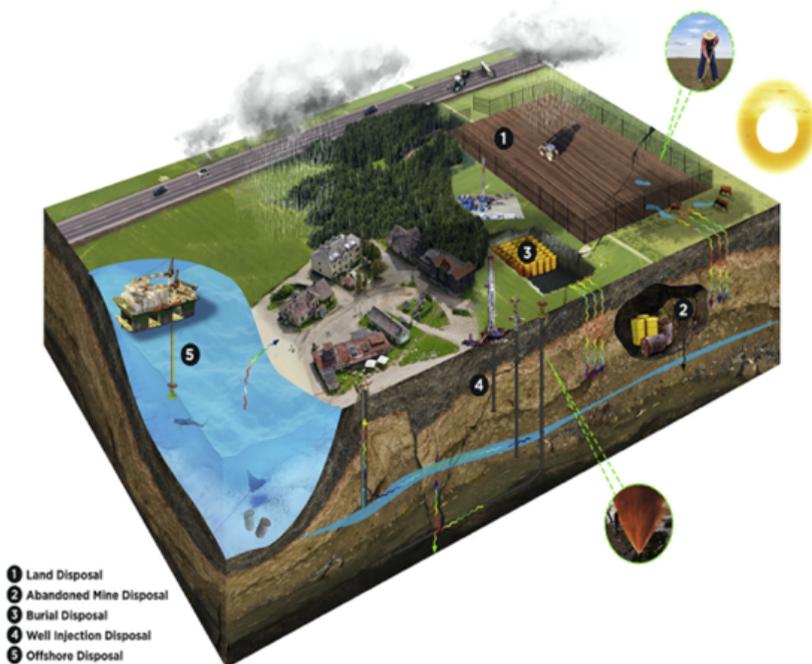
para o desenvolvimento de novos produtos envolvendo diversas tecnologias. Dessa forma, os riscos de desenvolvimento podem ser minimizados e é possível identificar, no mercado, quais as melhores linhas de financiamento de acordo com o atual estágio da tecnologia. Assim, uma calculadora TRL tem como premissa facilitar a classificação da tecnologia ao seu nível, minimizando os riscos ao seu desenvolvimento. Portanto, uma calculadora TRL é composta por questões que identificam os pré-requisitos necessários a serem atendidos em cada nível. Essas calculadoras têm a vantagem de enquadrar o nível de maturidade de determinada tecnologia em um setor específico. O Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DOD) disponibiliza uma calculadora TRL que se encontra na internet e a mais desenvolvida refere-se ao desenvolvimento de software e hardware utilizando a métrica TRL, a versão mais recente é a 2.2 (DOD-MRL, 2012). No entanto, atualmente considera-se que uma única calculadora TRL não atende a todas as peculiaridades das áreas tecnológicas; nesse caso, várias calculadoras TRL seriam necessárias.

Avaliação de risco

A gestão de resíduos é um dos maiores desafios ambientais do século XXI, considerando os padrões de consumo da sociedade industrial que geram mais resíduos do que a natureza consegue absorver. A importância e a necessidade de regulamentos de gestão de resíduos foram ratificadas desde o relatório da ONU, Nosso Futuro Comum, de Brundtland, em 1987. Uma das maneiras de certificar o sucesso de uma operação de gestão de resíduos antes de sua implementação é conduzir uma análise preliminar de risco. O objetivo dessa análise é identificar os riscos presentes no sistema e fornecer informações sobre as ocorrências potencialmente perigosas e suas possíveis consequências. Assim, essa estratégia pode ser aplicada a fim de determinar a melhor estratégia de gerenciamento de resíduos NORM e TENORM para o Brasil, de forma que ofereça o menor risco possível, evitando futuros problemas

ambientais, sociais e econômicos em áreas próximas à destinação final dos resíduos. A Figura 17 a seguir mapeia os possíveis riscos envolvidos no gerenciamento de resíduos NORM e TENORM.

Figura 17. Representação dos possíveis riscos associados às opções de gerenciamento de resíduos NORM provenientes das práticas da indústria de óleo e gás



Fonte: ALNABHANI et al., 2015.

Manual sobre o uso das escalas TRL/MRL

Os Technology Readiness Levels, também conhecidos como Manufacturing Readiness Levels (MANKINS et al., 1995), permitem o monitoramento detalhado dos ativos tecnológicos ao longo dos processos de pesquisa, desenvolvimento e validação, ao mesmo tempo que permitem a comparação direta entre diferentes ativos.

A correta aplicação dessa escala facilita o entendimento entre gestores, equipes internas e parceiros externos sobre o estágio de desenvolvimento em que determinado ativo está inserido. A partir daí, é possível identificar os esforços e recursos necessários para o codesenvolvimento ou a cocriação de tecnologias, de forma a avançar em termos de maturidade de certa tecnologia, podendo identificar oportunidades de negócio e de transferência. As escalas TRL/MRL são amplamente divulgadas e utilizadas internacionalmente pelas mais diversas instituições de pesquisa e desenvolvimento tecnológico. No entanto, verifica-se que, principalmente no contexto agrícola e agroindustrial, sua aplicação ainda é incipiente. Nesse sentido, a Embrapa desenvolveu essas diretrizes com o objetivo de alinhar e internalizar o uso das escalas TRL/MRL em seu macroprocesso de inovação.

Além disso, a Embrapa também disponibiliza tabelas com sugestões de escalas de TRL para diversos setores:

- Escala TRL/MRL para máquinas, equipamentos e implementos;
- Escala TRL/MRL para processos industriais e agrícolas;
- Escala TRL/MRL para produtos industriais e agrícolas;
- Escala TRL/MRL para cultivo;
- Escala TRL/MRL para vacinas (insumos agrícolas);
- Escala TRL/MRL para raças e grupos genéticos;
- Escala TRL/MRL para softwares.

Figura 18. Fases e estado da técnica em relação aos níveis de maturidade

Níveis TRL/MRL	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fases [f]	Descobrir	Entender	Adaptar		Validar	Refinar		Usar	
Estado da técnica [c]	Conceito		Desenvolvimento			Produto			

Fonte: EMBRAPA. *Manual sobre o Uso da Escala TRL/MRL*. 2018.

Justificativa

A aplicação do método TRL/NMT adaptado para as opções de tratamento e destinação de resíduos NORM é realizada, permitindo a determinação das tecnologias ideais a serem aplicadas em território brasileiro, com base em seus níveis de maturidade. Espera-se que essa estratégia reduza os investimentos que seriam necessários se os testes de campo tivessem que ser realizados para cada uma das tecnologias conhecidas.

Metodologia

Gerência de Rejeitos (GR)

A gerência de rejeitos industriais recebeu atenção considerável devido à ligação importante entre o gerenciamento seguro e a imagem da indústria geradora. Isso deve ser mantido pela seleção e desenvolvimento de uma ótima estratégia de gerenciamento para prevenir acidentes, minimizar exposições a perigos e acidentes e garantir a segurança dos trabalhadores e do público.

Além disso, a aplicação ideal de tecnologias relacionadas à minimização, tratamento, acondicionamento, armazenamento e deposição de rejeitos radioativos tornou-se uma necessidade devido a diversos fatores, como:

- i. Os rejeitos radioativos só podem ser armazenados em instalações licenciadas para recebê-los;
- ii. A deposição direta de rejeitos radioativos no solo sem tratamento adequado, imobilização ou embalagem é geralmente inaceitável, exceto em alguns casos específicos envolvendo rejeitos de nível muito baixo com atividades próximas aos níveis de isenção;
- iii. Com os acentuados aumentos nos custos de deposição de rejeitos radioativos, a redução de seu volume torna-se essencial e oferece grandes vantagens econômicas;
- iv. Os critérios regulatórios para as etapas de gerência de rejeitos, como transporte, armazenamento e deposição, tornaram-se

recentemente mais restritivos, com a crescente preocupação da sociedade com a escassez de recursos e a crescente oposição pública a instalações de deposição de rejeitos radioativos, sendo o desenvolvimento dessas instalações um processo caro, difícil e prolongado;

v. Avanços recentes em diversas tecnologias adequadas para o gerenciamento de rejeitos radioativos tornaram sua aplicação mais econômica e mais fácil de implementar;

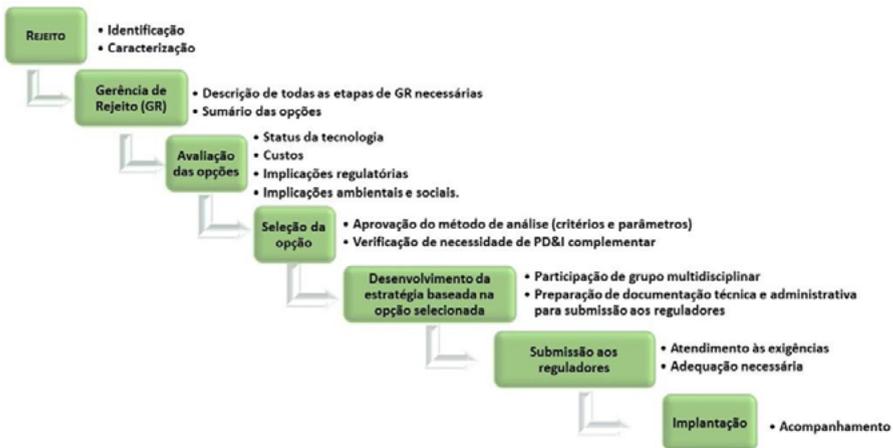
vi. A seleção ideal da tecnologia de gerência de rejeitos é essencial para atingir metas de segurança e proteção da saúde humana e ambiental.

Uma quantidade enorme de informações está disponível sobre vários tipos de gerência de rejeitos, todos tendo mérito a ser considerado. No entanto, nem todas as tecnologias e os processos descritos e apresentados na literatura e nos portfólios das empresas estão bem desenvolvidos ou são adequados para todos os tipos de rejeitos e situações. Assim, essa seleção pode ser feita de acordo com o arcabouço legal e os procedimentos de otimização da gerência.

Fatores como custos envolvidos e complexidades técnicas e ambientais, associados à necessidade de um desempenho adequado, impõem que a metodologia de seleção tenha critérios claros. Alguns deles são mais abrangentes e podem ser aplicados a quase qualquer sistema de gerenciamento de rejeitos, enquanto outros podem aplicar-se a categorias específicas de rejeitos ou a etapas de gerenciamento selecionadas.

O fluxograma na Figura 19 apresenta uma sugestão para selecionar e implementar uma opção para WM.

Figura 19. Fluxograma do processo de seleção de uma opção para GR



A Tabela 12 mostra um exemplo de opções para deposição de NORM apresentadas pela AIEA (2017) de acordo com o volume gerado.

Tabela 12. Opções para deposição de NORM

Opções de Deposição	NORM	
	Pequeno Volume	Grande volume
Instalação projetada próxima à superfície		
Deposição em profundidade intermediária		
Repositório geológico		
Aceitável		
Possível, mas precisa ser avaliado a partir de aspectos técnicos ou econômicos.		

Fonte: Adaptado de AIEA,2017.

Considerando a gerência de rejeitos globalmente, os seguintes fatores devem ser levados em conta no momento de decidir por uma opção para GR:

- a) O inventário e a provável futura geração de rejeitos que precisarão ser armazenados;
- b) Infraestrutura nacional para a gerência de materiais radioativos;

- c) Política nacional e estratégia quanto à deposição de rejeitos radioativos;
- d) Requisitos regulatórios que regem a deposição de rejeitos radioativos;
- e) Possíveis arranjos ou potencial para compartilhar regionalmente soluções de armazenamento ou deposição;
- f) As condições no país, como o clima e a disponibilidade de meios hospedeiros adequados em relação a soluções potenciais para deposição;
- g) Os recursos técnicos e financeiros disponíveis para deposição;
- h) Questões sociais, políticas e ecológicas.

Aplicação

Para aplicar o método NPT, o primeiro passo foi realizar pesquisas para descobrir (identificar) tecnologias existentes para o tratamento e a deposição de rejeitos NORM que atualmente estão sendo aplicadas ou estão em fase final de desenvolvimento, no Brasil e no mundo. Depois disso, foram realizadas conferências, que, devido à pandemia, ocorreram virtualmente, com empresas que estavam aplicando as tecnologias que seriam possíveis opções para o nosso país, coletando dados e informações precisas sobre cada uma, conforme anteriormente apresentado neste livro, possibilitando a correta avaliação de maturidade.

Como as tecnologias selecionadas para aplicar o método já tiveram seus conceitos comprovados e estão dentro das últimas etapas de desenvolvimento, ou mesmo sendo aplicadas em outros lugares, é possível dizer que todas elas já atingiram o sexto nível de maturidade, restando apenas os níveis 7, 8 e 9 a serem alcançados, para que possam ser consideradas “maduras” o suficiente para aplicação permanente no Brasil. Para isso, primeiro seria necessário adaptar a metodologia e a escala do NMT ao nosso caso específico. Nessa época, foram realizadas pesquisas para compreender o método como foi elaborado pela NASA, bem como o estudo das adaptações que foram feitas ao método para diferentes setores.

Para auxiliar na avaliação da maturidade das tecnologias, foi construída uma matriz de avaliação prévia, na forma de uma planilha do Excel®, para determinar as tecnologias que seriam realmente ideais para este projeto, antes de serem encaminhadas para a fase final dos testes. Para construir a planilha, primeiro foi necessário identificar as palavras que descrevem objetivamente os métodos e as necessidades de cada tecnologia. Uma vez definidas essas palavras-chave, elas foram agrupadas em suas respectivas dimensões formando cinco grandes grupos:

1. Disponibilidade
2. Viabilidade do método
3. Viabilidade tecnológica
4. Aspectos legais e comerciais/ externalidades
5. Custo

Definição de dimensões e requisitos

Foram definidos requisitos e parâmetros para formar uma matriz de múltiplas variáveis, com o objetivo de avaliar, dentro do mesmo sistema, as opções presentes para a GR.

Disponibilidade

Essa dimensão inclui: conhecimento público; clientes; recursos humanos treinados; fornecedores e operadores; e depreciação.

Embora existam inúmeras opções tecnológicas para GR, informações confiáveis devem ser coletadas sobre a maturidade dos diversos processos. Uma tecnologia madura é definida como aquela que tem sido usada por tempo suficiente para que falhas e não conformidades sejam verificadas e corrigidas, de modo que seu uso traga o menor risco possível. Geralmente não é necessário fazer grandes ajustes para seu uso em diversos cenários, sendo assim de conhecimento público, tendo um número consistente e satisfeito de usuários.

A disponibilidade de mão de obra competente e experiente para operar, manter e realizar outras atividades rotineiras deve

ser considerada na seleção de tecnologia, bem como no nível de competência disponível na região. A qualificação dessa força de trabalho pode ser um fator decisivo favorável ou desfavorável nessa escolha, especialmente quando se considera o aspecto de reter pessoal treinado, devido à atração do mercado de trabalho.

Viabilidade do método

Os requisitos que fazem parte dessa dimensão são: tipos de rejeitos; geração de rejeitos secundários; pré-tratamento; transporte (tecnologia até o rejeito; e rejeito até a tecnologia); volumes (escala); armazenamento inicial; e armazenamento final

O tipo, o volume e a razão de geração de rejeitos têm uma influência importante na seleção da tecnologia para GR. Em geral, grandes quantidades de rejeitos requerem instalações e equipamentos especializados e mais dedicados. Assim, quando o volume a ser gerenciado é grande, uma tecnologia de alta eficiência deve ser considerada. No entanto, o uso de tecnologias avançadas pode não ser economicamente viável para pequenos volumes, para estes, equipamentos e instalações mais simples, menos caros e mais genéricos são mais adequados. Nesse caso, um alto investimento não se justifica, e outras opções podem ser consideradas, como equipamentos móveis que podem ser transportados até o gerador.

Alguns processos podem ser restritos a aplicações de pequena escala por projeto ou novos processos, para os quais a extrapolação para uma aplicação em larga escala pode exigir mais desenvolvimento e avaliação. As tecnologias devem ser consideradas em sua totalidade, por exemplo, se houver geração de rejeitos secundários, estes também devem fazer parte da GR e não devem trazer maior complexidade que os rejeitos primários.

Algumas tecnologias adequadas para grandes volumes requerem espaço para armazenamento inicial de rejeitos até que a carga adequada seja formada para seu gerenciamento. Portanto, ao selecionar a tecnologia, essa disponibilidade deve ser considerada. As tecnologias voltadas para o armazenamento final devem considerar principalmente as áreas necessárias e o impacto

ambiental associado, uma vez que, como tecnicamente não haverá o decaimento radioativo, essas áreas não serão liberadas dentro de um tempo razoável.

Viabilidade tecnológica

Na seção de viabilidade tecnológica, foram agrupados os seguintes aspectos: manutenção; geografia (localização); mitigação; oportunidade de cooperação internacional; atendimento às necessidades atuais; atendimento às necessidades futuras; e resiliência.

A necessidade e o custo de manutenção estão geralmente ligados à complexidade da tecnologia selecionada. Tecnologias mais simples normalmente usam poucas ou nenhuma peça móvel; contam com processos estáveis, fáceis de controlar; não há necessidade de operadores com alto nível de competência técnica, além de possuírem componentes de fácil acesso. Tecnologias mais complexas muitas vezes têm maiores custos de capital e operacionais, com peças mais móveis, controles mais sofisticados que exigem operadores com maior competência técnica; tendo componentes e acessórios mais sofisticados e, portanto, mais caros e menos acessíveis, contribuindo para uma manutenção mais cara.

A localização das instalações também é um fator importante na seleção de tecnologia. Três opções principais de localização podem ser consideradas: instalação no local; instalação nacional e regional (centralizada) e instalação móvel.

O gerenciamento no local pode envolver o manuseio, o tratamento, o acondicionamento e o armazenamento sem mover os rejeitos do local de sua geração, podendo também incluir a deposição no local, o que elimina os riscos associados ao transporte, mas, dependendo do volume gerado, a concentração de rejeitos pode exceder os limites permitidos, tornando inevitável a busca por uma nova solução. Por outro lado, volumes muito pequenos podem tornar o investimento inviável.

O gerenciamento centralizado pode reunir muitas das etapas da GR, incluindo a transferência de rejeitos para um único local acessível a todos ou a muitos geradores. Portanto, será necessário

um sistema de transporte eficiente para essa transferência até a instalação centralizada. Os geradores devem preparar os rejeitos de acordo com as especificações de transporte e os critérios para sua aceitação nessa instalação.

Algumas tecnologias que utilizam sistemas móveis, que podem ser transportados para o gerador, são uma opção interessante para tipos específicos de rejeitos. A aplicação de tecnologias móveis aumenta a flexibilidade na escolha da GR, otimizando os custos de implementação e de manutenção.

A geografia do país tende a afetar a localização e a adaptação das instalações de GR. Por exemplo, a localização de uma instalação central em um país grande como o Brasil certamente será muito impactada pela distância dos principais geradores e, conseqüentemente, pode afetar a decisão de estabelecer uma instalação centralizada, já que o custo e a dificuldade de transporte tendem a ser muito altos. Além disso, a alta densidade populacional e o uso extensivo dos recursos terrestres para a agricultura podem ter um impacto na seleção do local para uma instalação de GR. Nesse caso, tecnologias envolvendo instalações regionais podem ser uma opção.

Dentro da cooperação internacional, acordos e projetos bilaterais de cooperação podem economizar dinheiro e reduzir riscos potenciais para a população. Outras formas de cooperação internacional para atingir as metas de GR incluem o intercâmbio de pessoal e o treinamento específico, que pode incluir transferência de tecnologia, equipamentos e aluguel de sistemas entre países vizinhos para otimizar as etapas do GR.

A seleção de tecnologia deve sempre considerar os cenários no curto, médio e longo prazos, para que não só atenda às necessidades presentes, mas também seja resiliente o suficiente para ser usada e adaptada àqueles que possam surgir ao longo do tempo. Portanto, deve ser capaz de suportar alterações no procedimento ou no cenário, lidando bem com variações operacionais com dano mínimo, alteração ou perda de funcionalidade.

Aspectos legais e comerciais/ externalidades

Nesses aspectos, os requisitos de licenciamento; sustentabilidade; tecnologia protegida, registros e patentes; aceitação política; aceitação pública; segurança; tempo de controle institucional; e futuras implicações foram estudados.

Os requisitos legais têm influência significativa na seleção das tecnologias de gerência de rejeitos, uma vez que a GR deve ser conduzida dentro do marco legal do país, ou seja, dentro de um sistema de regulamentos, com regras e normas emitidas em nível nacional e/ou estadual e elaboradas pelas autoridades reguladoras. No Brasil, o arcabouço legal a ser considerado depende do gerador e do tipo de resíduo gerado. É necessário, no entanto, integrar os requisitos impostos por diferentes autoridades reguladoras e garantir que sejam cumpridos em todas as etapas da GR.

Associados aos requisitos legais estão os aspectos de segurança da instalação e de sua operação, bem como o impacto ambiental, que, juntamente com os aspectos sociais e econômicos, irá demonstrar a sustentabilidade do sistema de GR selecionado. Os aspectos sociais aqui considerados foram a aceitação pública e política e o tempo de controle institucional, que pode envolver as gerações futuras. Estabelecer uma instalação que envolva a gerência de rejeitos geralmente requer a participação do público para obter aceitação, na maioria das vezes envolvendo tomadores de decisão políticas. Assim, estas partes interessadas (stakeholders) devem ser informadas nas etapas adequadas de seleção e desenvolvimento de tecnologia, com questões sociais sendo abordadas ao longo dessas etapas.

Vale ressaltar que os instrumentos jurídicos internacionais também devem ser considerados nessa seleção, principalmente porque o Brasil é signatário da Convenção Conjunta de Segurança em Gerência de Combustíveis Usados e de Rejeitos Radioativos.

Custo

A dimensão custo incluiu: transporte; necessidade de treinamento (RH); implementação (obras civis + equipamentos); e depreciação.

Um fator não técnico básico que pode afetar muito a seleção de uma tecnologia está ligado aos recursos financeiros exigidos para cada uma, por exemplo, importação de equipamentos e sistemas, pagamento pelo uso de tecnologia patenteada etc. Assim, o custo de diferentes tecnologias pode variar muito e inclui os custos de implementação, de treinamento de recursos humanos (dependendo da complexidade da tecnologia), de atividades adicionais de PD&I para adaptação às regulamentações e de características específicas de rejeitos e deposição, entre outros.

O custo dos transportes também deve ser considerado se a instalação de tratamento/deposição de rejeitos estiver localizada longe das instalações geradoras, uma vez que as embalagens e os planos de transporte devem cumprir as normas nacionais para essa atividade. A redução do volume deve ser sempre considerada, pois volumes mais baixos reduzem os custos globais, incluindo risco e legado para as gerações futuras.

Avaliação da maturidade aplicada à gerência de NORM de petróleo e gás no Brasil

Ao longo de 2020 e 2021, dentro do projeto que está sendo desenvolvido pelo CDTN e pela PUC-Rio, diferentes tecnologias foram estudadas e apresentadas como opções para resolver questões de gerência de NORM de petróleo e gás. As propostas são diversas, algumas envolvendo tratamentos e deposição, outras envolvendo apenas armazenamento de diferentes formas.

Nesse sentido, tanto para o uso imediato quanto para o desenvolvimento de qualquer uma das opções, surgiram alguns impasses, decorrentes do conhecimento e da experiência de cada membro da equipe. Por isso, decidiu-se propor uma metodologia que comparasse essas opções para uso no país, que contemplaria as diferentes dimensões envolvidas.

Primeiro, foi criada uma planilha com as cinco dimensões, com o objetivo de avaliar a maturidade da tecnologia dentro dos três principais pilares da sustentabilidade: econômico, social e ambiental.

Foram definidos critérios para cada uma das cinco dimensões: disponibilidade, viabilidade do método (relacionado ao resíduo), viabilidade tecnológica; aspectos legais e custo, conforme apresentado na Tabela 13:

Tabela 13. Dimensões e critérios selecionados preliminarmente para avaliar a maturidade tecnológica das opções de gerência de NORM da indústria de petróleo e gás no Brasil

DIMENSÕES					
Disponibilidade Viabilidade do Método		Viabilidade da Tecnologia	Aspectos Legais	Custo	
CRITÉRIOS	Conhecimento público	Tipo de resíduo	Manutenção	Licenciamento	Transporte
	Clientes	Geração de rejeitos secundários	Situação geográfica	Sustentabilidade	Necessidade de treinamento
	Recursos humanos treinados	Tratamento	Mitigação	Tecnologia protegida, registros e patentes	Implantação (obras civis e equipamentos)
	Provedores	Transporte (rejeito até a tecnologia)	Oportunidade de cooperação internacional	Impactos sociais	Depreciação
	Operadores	Transporte (tecnologia até o rejeito)	Atendimento às necessidades atuais	Aceitação pública	
		Volumes (escala)	Atendimento às necessidades futuras	Aceitação política	
		Armazenamento inicial	Resiliência	Segurança	
		Armazenamento final		Tempo de controle institucional	
				Implicações futuras	

Posteriormente, foram realizadas diversas reuniões para melhor categorizar cada critério; algumas com o Prof. Dr. Darci Prado que forneceu orientação para a elaboração da planilha com a conceituação e a elaboração dos parâmetros de cada critério para cada dimensão. Os itens da planilha foram validados com a equipe e foram realizados exercícios para aplicar a planilha às tecnologias existentes. Um exemplo do trabalho realizado é mostrado na Figura 20.

Figura 20. Exemplo de planilha preparada para avaliação de NMT de opções de gerência para NORM da indústria de petróleo e gás no Brasil

Tecnologia	Tópico	Quesito	Avaliação					Nota (Parcial)	Nota (soma)	Nota (Média)	Peso	Nota Final (parcial)	Nota Final	
			2	4	6	8	10							
			Muito ruim	Ruim	Médio	Bom	Muito Bom							
Injeção em poços de exploração abandonados	Disponibilidade	Conhecimento público	V	G, R	M			4	28	5,6	25%	14	67,8	
		Clientes					G, R, M							8
		Recursos humanos capacitados		V, M, R	G									4
		Fornecedores		V, M	G, R									6
	Viabilidade do Método	Operadores	V	M	G, R				6					
		Tipos de rejeito					G, R, V, M	10						
		Geração de rejeitos secundários				V	G, R, M	10						
		Pré-tratamento			G, V, M, R			6						
		Transporte (rejeito a tecnologia)			G, M, R			6						
		Transporte (tecnologia ao rejeito)	R, G, M					2						
		Volumes (escala)					R, V, M, G	10						
		Armazenamento inicial			R, M		G		6					
	Viabilidade da Tecnologia	Armazenamento final					G, R, M	10						
		Manutenção				G, R	V, M	10						
		Geográfica	R		M, G			6						
		Mitigação			M	G, R		8						
		Oportunidade para cooperação internacional			G, R, V, M			6						
		Atendimento às necessidades atuais				G, R, V, M		8						
									54					
									7,7					
							15%							
							11,6							

Uma vez definida a metodologia a ser adotada e criada uma matriz representando os múltiplos fatores selecionados e agrupados, os especialistas realizaram avaliações individuais. Em seguida, os escores foram moderados pelo grupo, para garantir consistência, e os pesos foram estipulados para cada dimensão, indicando a importância de cada um na seleção.

Resultados e discussão

A partir dos resultados e dos pesos das notas, obteve-se a nota geral para cada opção tecnológica (Tabela 14 e Tabela 15).

Hierarquizando as opções de deposição, aquela com maior pontuação e, portanto, mais adequada para o cenário atual é “Deposição em túneis escavados em rocha”, seguida por “Deposição em aterro industrial” e “Injeção em poços abandonados de exploração”, sendo a menos pontuada “Injeção em formações geológicas”.

Analisando os resultados da Tabela 14 por dimensão, observa-se que para *disponibilidade* a opção de “aterro industrial” teve a melhor nota e as “formações geológicas de injeção” eram menos disponíveis, o que era esperado, pois nessa dimensão a primeira é bastante demonstrada e possui mercado e fornecedores, enquanto a última é mais restrita.

Considerando a *viabilidade do método*, as opções são equivalentes, sendo o “aterro industrial” o menos viável, devido às limitações de concentração. Para a *viabilidade da tecnologia*, a “Deposição em túneis escavados em rocha” tem uma leve superioridade sobre os demais, principalmente pela característica de ser capaz de atender às necessidades atuais e futuras.

Quanto aos *aspectos jurídicos* e outros, essa opção também teve melhor pontuação, principalmente devido à segurança e a menores implicações futuras. Para o *custo* maior nota significa menores custos para determinada opção. “Aterro industrial” recebeu a nota mais alta, devido à simplicidade da implementação desse depósito.

Tabela 14. Resultados do estudo de opções para a deposição de NORM da indústria de petróleo e gás

Dimensões Analisadas	Opções de descarte			
	Reinjeção em poços de exploração abandonados	Injeção em formações geológicas	Deposição em túnel escavado em rocha	*Deposição em aterro industrial
Disponibilidade	14,0	12,0	19,0	20,0
Viabilidade do método	15,0	15,0	15,0	13,5
Viabilidade da tecnologia	11,6	12,0	12,4	11,1
Aspectos legais e comerciais/ externalidades	17,5	13,1	21,9	18,8
Custo	9,7	9,0	11,3	12,0
TOTAL	67,8	61,1	79,6	75,4

* Opção viável para NORM com concentrações abaixo do limite de isenção.

Considerando a pontuação total, “Injeção em formações geológicas” seria o menos adequado para o cenário nacional geral. No entanto, por meio do estudo realizado, concluiu-se que é possível trabalhar para melhorar as exigências de cada dimensão, seja pela implementação de PD&I, seja pela implementação de atividades nas fases iniciais da Gerência de Rejeitos, principalmente segregação e redução de volume. Nesse caso, os resultados das opções de tratamento apresentadas na Tabela 15 podem ser associados à seleção daqueles que, juntos, têm o melhor desempenho.

Analisando os resultados na Tabela 15 parece que, para o tratamento, a opção “Eliminação de óleo livre: filtração, adição de argila etc.” foi a mais bem pontuada, seguida por “Incineração” e “Secagem térmica”. *Disponibilidade* e *aspectos legais* foram decisivos para essa nota, principalmente por ser conhecida, utilizada e licenciada para rejeitos de outras áreas, independentemente de fatores como volume e tipo de resíduo, exigindo pouco investimento.

As duas opções restantes, “Incineração” e “Secagem Térmica”, apesar de terem notas mais baixas, principalmente devido ao maior nível de licenciamento, complexidade e aspectos de custo, devem ser fortemente consideradas, pois permitem uma grande redução no volume de rejeitos, o que resultará em uma quantidade menor de rejeitos a ser embalada, exigindo áreas de armazenamento menores e resultando em menor impacto para as gerações futuras, melhorando a sustentabilidade do sistema de GR como um todo.

Observa-se que para situações específicas, por exemplo, volume e tipos especiais de rejeitos, bem como local inicial de armazenamento, uma tecnologia pode ser mais viável do que a mais bem pontuada no estudo.

Tabela 15. Resultados do estudo de opções para o tratamento do NORM da indústria de petróleo e gás

Dimensões Analisadas	Opções de tratamento		
	Incineração	Secagem térmica	Eliminação de óleo livre: filtração, adição de argila etc.
Disponibilidade	20,0	15,0	25,0
Viabilidade do método	13,5	15,5	15,5
Viabilidade da tecnologia	10,3	12,9	14,1
Aspectos legais e comerciais/ externalidades	16,9	17,5	25,0
Custo	11,3	9,0	15,0
TOTAL	71,9	69,9	94,6

Antes que uma nova tecnologia possa ser aplicada para uma operação em campo, ela deve passar por uma série de testes para determinar se está pronta para uso ou comercialização. Com o objetivo de determinar a tecnologia ideal a ser aplicada no território brasileiro e de encontrar uma solução universal para a gerência e a destinação de rejeitos NORM de atividades no setor de óleo e gás, foi escolhida a metodologia dos Níveis de Maturidade Tecnológica.

Primeiro, a partir de reuniões com fornecedores, operadores e reguladores, foram selecionadas quatro opções de deposição e três de tratamento, cujo NPT estivesse no nível 7 nessa escala. Essas opções foram então tabuladas e avaliadas considerando requisitos técnicos, legais, administrativos, sociais e de custos, reduzindo ao máximo a subjetividade dos especialistas. Essa avaliação resultou em notas comparativas, o que refletiu a facilidade e a aceitabilidade de cada opção que poderá ser implementada no Brasil, considerando o cenário atual.

“Deposição em túneis escavados em rocha” mostrou-se a mais promissora como solução para os NORM estudados e o tratamento por “Eliminação de óleo livre: filtração, adição de argila etc.” a mais simples de implementar. Observou-se que tanto a “Incineração” quanto a “Secagem térmica” são opções interessantes quando associadas às opções de deposição estudadas, principalmente devido aos fatores de redução de volume que elas apresentam.

Referências

- ABGI BRASIL. *TRL: Recursos financeiros por níveis de maturidade tecnológica*.
ABNT. *Sistemas espaciais – Definição dos níveis de maturidade da tecnologia (NPT) e de seus critérios de avaliação*. ABNT NBR ISSO 16290. Rio de Janeiro: ABNT, 15p., 2015.
- ALNABHANI, Khalid; KHAN, Faisal; e YANG, Ming. *Scenario-based risk assessment of TENORM waste disposal options in the oil and gas industry*. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Canada*, v. 1, n. 1, p 55-66, dec./2015.
- ANDRADE, Herlandi S.; JUNIOR, Milton de Freitas Chagas; SILVA, Messias Borges (orgs) [et al.]. *Avaliação da Maturidade Tecnológica*. Edições

- Brasil / Editora Fibra Categoria: Tecnologia, Inovação, Administração Edição: 1, pp 264).
- BANKE, J. *Technology readiness levels demystified*. NASA. 20 de agosto de 2010.
- CAPDEVILLE, G. D. et al. *Modelo de inovação e negócios da Embrapa Agroenergia: gestão estratégica e integrada de P&D e TT*. Série Documentos, Brasília, v. 1, n. 1, p. 1, 2017.
- CERTI. *Technology Readiness Level (TRL): conheça o framework de confiabilidade em projetos da NASA*.
- ENGEMA. *Prospecção tecnológica no tratamento de resíduos sólidos*.
- MANKINS, John C. *Technology readiness assessments: A retrospective*. ScienceDirect, 2009.
- ALOPEX ON INNOVATION. *How To Execute on Innovation Better*.
- RESEARCHGATE. *TRL/IRL with Defense Acquisition Lifecycle*. DoD, 2008.
- HUTHWAITE, B. *Concurrent Engineering user's guide: guidelines for concurrent product development*. Michigan: Institute for Competitive Design, 1992.
- IAEA. *Selection of Technical Solutions for the Management of Radioactive Waste*. IAEA-TECDOC-1817. Vienna: IAEA, 114p., 2017.
- MANKINS, J. C. *Technology Readiness Levels. A White Paper*. Advanced Concepts Office. Office of Space Access and Technology. NASA, 1995.
- MATURITY RESEARCHES. *A importância da Evolução da Maturidade em Gerenciamento de Projetos*, por Darci Prado. 2020.
- NASA. *Technology Readiness Level*.
- PRADO, Darci S. *Maturidade em gerenciamento de projetos*. Vol. 7 de Gerenciamento de Projetos. 3ª ed. Belo Horizonte: Editora Falconi, 2016. 256p.
- VELHO, S. R. K. et al. *Nível de Maturidade Tecnológica: uma sistemática para ordenar tecnologias*. Parcerias Estratégicas, v. 22, n. 45, p. 119-140, 2007.



CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O levantamento sobre a legislação nacional centrou-se nas organizações brasileiras que legislam sobre atividades com potenciais impactos ambientais ou que geram resíduos e rejeitos. Assim, foram estudados e compilados os instrumentos legais da Organização Brasileira de Normalização (ABNT), da Autoridade Brasileira de Transportes Rodoviários (ANTT), do Ministério e das Agências de Proteção Ambiental (MMA, CONAMA e IBAMA), e das normas nucleares estabelecidas pelo órgão regulador nuclear.

Uma conclusão clara deste estudo foi que o mandato para licenciar atividades com materiais radioativos recai sobre as organizações federais, basicamente o IBAMA e a ANSN. Apenas no caso do transporte de materiais radioativos, as agências ambientais a nível estadual podem ter algum tipo de papel regulador.

Os requisitos de licenciamento para depósitos finais de resíduos NORM nas normas nucleares estão ausentes. Devem também ser definidos requisitos e cenários de caso para a avaliação da segurança dos depósitos finais. As avaliações genéricas de segurança poderiam ser a base para estabelecer categorias para uma abordagem gradual para a gestão de resíduos NORM. A abordagem graduada pode permitir que parte dos resíduos seja gerida como resíduos perigosos, se as restrições de dose forem cumpridas.

A delegação a outras partes para conceber, gerir e operar depósitos finais para resíduos NORM está prevista na Lei 10308/2001 e deve ser avaliada pela CNEN e pelo organismo regulador nuclear.

A nível internacional, foram analisados os regulamentos aplicáveis de oito países: EUA, Emirados Árabes Unidos, Canadá, Reino Unido, Noruega, Malásia, França e Bélgica, para além da normalização da União Europeia. Nos Estados Unidos, diferentes agências federais e estaduais partilham a responsabilidade por aspectos específicos do processo de gestão de resíduos radioativos, o que inclui os resíduos NORM. O caso estudado – injeção em formações geológicas no Texas – é um exemplo de uma situação em que foi emitida uma regulamentação específica para os NORM. Para além da injeção, também é permitida a disseminação de resíduos NORM na superfície terrestre – aterro sanitário.

No Canadá, a autoridade nuclear federal regulamenta o ciclo do combustível nuclear e o transporte de materiais radioativos, enquanto as atividades industriais relacionadas com o NORM são regulamentadas pela legislação provincial. Especificamente para os resíduos NORM, foram desenvolvidas orientações conjuntas pelos reguladores federais, provinciais e territoriais, e contém orientações genéricas e base para regulamentos específicos sobre a gestão desse tipo de resíduos.

A Malásia é outro exemplo de um país com regulamentação específica para os NORM. O Conselho de Energia Atómica e Licenciamento desenvolveu um Código de Prática que fornece orientações e estabelece requisitos para o funcionamento de instalações de petróleo e gás e atividades de eliminação de resíduos.

Exemplos de países onde não existe regulamentação específica para os NORM são o Reino Unido, a Noruega e a França. Nestes, a gestão de resíduos NORM é regulada de acordo com os instrumentos legais aplicáveis a resíduos perigosos ou radioativos.

A partir das opções de eliminação aplicáveis ao Brasil, as três técnicas pesquisadas – túnel de rocha de superfície, aterro industrial e injeção de poços profundos – foram consideradas apropriadas e suficientemente maduras para serem imediatamente implementadas. Podem ser consideradas soluções complementares, que não se excluem mutuamente, considerando a grande superfície do país e as suas diversas formações geológicas.

Para ter em conta as características da produção nacional de petróleo e as características geológicas das formações anfitriãs, propõe-se uma proposta de congregação de vários campos produtores em pactos regionais para a otimização da gestão de resíduos NORM. De acordo com essa estratégia, os pactos da Amazônia, Nordeste, Leste e Sul-Sudeste seriam estabelecidos e uma ou mais rotas de tratamento e eliminação seriam praticadas em cada um deles. As vantagens claras desse acordo são a utilização conjunta da infraestrutura a ser estabelecida e a minimização do movimento de resíduos em todo o país.

A eliminação em túneis escavados em rochas cristalinas é uma opção viável onde tal formação geológica existe. A tecnologia para a sua concepção e construção é dominada pelas grandes empresas de engenharia brasileiras e essa solução parece ser adequada para as regiões Sul e Sudeste, que têm formações geológicas adequadas e concentram aproximadamente 90% da produção nacional. Após a operação de instalação, o túnel é selado com concreto armado, o que reduz a possibilidade de intrusão, particularmente num cenário de subida do nível do mar. Outra condição a cumprir é que o gradiente hidráulico local seja tal que o fluxo hidráulico subterrâneo ocorra na direção do repositório-oceano.

A utilização de depósitos controlados perto da superfície para resíduos perigosos pode ser uma atividade isenta do licenciamento nuclear completo, desde que sejam cumpridos critérios específicos de dose, e que seja concedida uma licença condicional pelo organismo regulador. Essa é uma prática adotada em muitos países, tais como o Canadá, os EUA, os Emirados Árabes Unidos e o Reino Unido, com limites de atividade até 10 Bq/g e dose para indivíduos no público de 0,3 mSv/ano.

O desafio no Brasil será o estabelecimento de uma metodologia para demonstrar que o limite de dose não será excedido, a ser acordada com as agências de licenciamento. Como anteriormente explicado, a maioria dos NORM armazenada no país tem uma concentração de ^{226}Ra abaixo de 5 Bq/g.

A opção de injeção parece ser a mais controversa, uma vez que as questões relativas ao volume que pode ser armazenado, à contaminação das águas subterrâneas, à instabilidade do solo e aos custos são pontos a pesquisar. Entre as diferentes variantes da técnica de injeção, a mais viável, a curto prazo, é a utilização de poços abandonados, tal como proposto pela Vitória Ambiental. É proposto um teste utilizando traçadores naturais de barita e não radioativos para elucidar algumas das questões levantadas.

O Capítulo 4 já apontou algumas considerações sobre a regulamentação nacional a respeito dos NORM que estão em consonância com o resultado do Workshop Nacional Virtual sobre Abordagem Holística da Gestão de NORM e vale a pena resumi-lo aqui: 1 – os requisitos e cenários de caso para a avaliação da segurança dos depósitos finais devem ser definidos; 2 – a aprovação incondicional já está prevista no regulamento brasileiro e deve ser detalhada com base em um critério de dose; 3 – a delegação a outras partes para conceber, gerir e operar depósitos finais para resíduos NORM está prevista na Lei 10308/2001 e deve ser avaliada pela CNEN e pelo regulador nuclear.

Os membros da equipe do projeto consideram que todos os seus objetivos foram plenamente alcançados. O nível tecnológico e a infraestrutura industrial disponíveis no Brasil são claramente suficientes para a implementação imediata das técnicas recomendadas para a eliminação dos resíduos NORM provenientes da indústria de petróleo e gás.

Nesse sentido, o simples início da segunda fase do projeto é altamente recomendado para evitar perder a oportunidade de alcançar soluções de baixo custo e sustentáveis que, com vantagens claras, substituirão as atualmente adotadas, tais como a exportação ou o armazenamento em terra nas instalações das companhias petrolíferas.

Registro das videoconferências e parceiros potenciais

As videoconferências organizadas pela equipe são listadas na Tabela 16 e a lista de parceiros potenciais e exemplos de boas práticas para tratamento e deposição de rejeitos NORM O&G, na Tabela 17.

Tabela 16. Videoconferências organizadas pela equipe

Data	Empresa	País	Tipo de empresa
27 ago. 2020	Vitória Ambiental	Brasil	Exploração de petróleo (onshore), tratamento de resíduos perigosos
15 out. 2020	Lotus LLC	EUA	Prestador de serviços para injeção de rejeitos
11 nov. 2020	CETREL	Brasil	Gestão de resíduos industriais
19 nov. 2020	DSA	Noruega	Órgão regulador nuclear
26 nov. 2020, 17 mar. 2021	Rosatom/NUKEM	Rússia, Alemanha	Companhia estatal responsável pelo complexo de energia nuclear da Rússia
13 jan. 2021	Wergeland	Noruega	Prestador de serviços para tratamento e deposição de rejeitos em túnel escavado em rocha.
28 jan. 2021	CDTN/Geologist Javier Ríos	Brasil	Instituto federal de pesquisa e desenvolvimento
02 fev. 2021	Kabangsaan University	Malásia	Universidade nacional
04 fev. 2021	FANR e ADNOC	Emirados Árabes	FANR – órgão regulador nuclear ADNOC – refinaria de petróleo
23 fev. 2021	Terralog	Canadá	Prestador de serviços para injeção de rejeitos
25 fev. 2021	PUC-Rio/prof. Marcelo Motta	Brasil	Universidade privada
01 abr. 2021	EconIndustries	Alemanha	Fornecedor do sistema VacuDry para tratamento térmico de rejeitos NORM
20 maio 2021	Nukem	Alemanha	Subsidiária da ROSATOM, com expertise para gestão de NORM.

Tabela 17. Lista de parceiros potenciais e exemplos de boas práticas para tratamento e deposição de rejeito NORM O&G

Empresa	Tipo de atividade e ano de início	Local da matriz	Local do negócio
ROSATOM	Gestão de resíduos industriais e NORM, companhia de economia mista, 1953	Moscou	+300 empresas e instituições, incluindo a NUKEM
	Empresa estatal de Energia Russa (Rosatom): POCATOM – companhia estatal da Rússia responsável pelo complexo de energia nuclear da Rússia		
NUKEM Technologies GmbH	A empresa alemã NUKEM Technologies GmbH é 100% acionista do ASE Group (Atomstroyexport) e faz parte do grupo ROSATOM. Oferece uma ampla gama de serviços relacionados a rejeitos radioativos e gerenciamento de combustível irradiado, bem como descomissionamento de instalações de produtos perigosos, nucleares ou radiativas (energia, pesquisa, produção, marinha, reatores navais), 2006.	Industriestraße Alzenau (Frankfurt) - Alemanha	Armênia, Áustria, Bélgica, Bulgária, China, República Tcheca, França, Alemanha, Indonésia, Iraque, Japão, Lituânia, Romênia, Rússia, Eslováquia, África do Sul, Suécia, Suíça, Turquia, Ucrânia, Emirados Árabes Unidos, Reino Unido.
TECNATOM	As principais atividades da Tecnatom são: fornecimento de componentes, inspeção de integridade estrutural, treinamento de pessoal de operação em simuladores e suporte a operações industriais, 1957.	Madri	Espanha, Estados Unidos, França, China, Brasil, México, Eslovênia, Portugal, Emirados Árabes Unidos, Argentina, Reino Unido, Japão, Coreia do Sul etc.
Econ Industries	Tratamento de resíduos perigosos (fluidos de corte, resíduos oleosos, resíduos com mercúrio, remediação de solos, lamas, NORM, líquidos de refrigeração), 2003	Starnberg, Alemanha	Local do cliente (sistema móvel)
Terralog Technologies Inc.	Prestador de serviços para deposição final de NORM por injeção em formações geológicas, 1996	Calgary, Canadá	Local do cliente (sistema móvel)
Wergeland Group	Prestador de serviços para deposição final de NORM em túnel escavado em rocha, 2000	Gullen Industrial Harbor, Noruega	Gullen Industrial Harbor, Noruega
ADNOC - Abu Dhabi National Oil Company	Refinaria de petróleo, 2019	Ruweis, Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos	Ruweis
Lotus	Prestador de serviços para deposição final de NORM por injeção em formações geológicas, 1998	Andrews, Texas, EUA	Andrews, TX-EUA

Clientes	Tecnologia	Maturidade da tecnologia	Contatos	Homepage
	Tratamento, solidificação, incineração, armazenamento, descomissionamento e remediação	Comercial/ industrial	Juan Nunes Av. Rio Branco, Nº 1, Sala 1710, Centro, Rio de Janeiro, RJ, 20090-003, Brasil Tel.: +55 21 3553 9390 info@rosatom.com.br	https://rosatom-latinamerica.com/pt/ https://rosatom.ru/
	Tratamento, limpeza, incineração, cimentação.	Industrial	Juan Nunes	https://www.nukemtechnologies.de/en/
ENDESA, Spanish Nuclear Power Plants, ACTEMIUM, NORDAM, AENA, ELETRONUCLEAR, C. N. Laguna Verde (Mexico), ITER, SONGWOL (South Korea), GKN (England), etc.	Incineração e deposição	Industrial	Ramiro Barroso Antonio, Diretor Adjunto, aramiro@tecnatom.com, Rua Senador Dantas 75/1108-1109 CEP 20031-204 Rio de Janeiro - RJ Brasil, Tel/ Fax: +55 21 3553-1357/8 Cell: 4201 / +55 24 99323-5023	www.tecnatom.es
Clientes no Azerbaijão, Tamil Nadu (sul da Índia), leste da Alemanha, sul da França, norte da Grã-Bretanha e Kuwait	VacuDry (separação, secagem e imobilização de rejeitos NORM)	Industrial	Christian Stiels, Reinhard Schmidt. Schiffbauerweg 1, Starnberg, Germany. +49 8151 446377-0 info@econindustries.com	www.econindustries.com
Canadá, China, Arábia Saudita, Noruega, EUA, Brunei e Indonésia	SFI (injeção em fraturas)	Industrial	Maiy Latif, Maiy Latif Project Development Engineer maiy@terralog.com +1-403-270-4905 +1-403-402-0313	www.terralog.com
Indústrias de petróleo da região	Deposição final em túnel escavado em rocha	Industrial	Erik Brohjem, CEO erik.brohjem@wergeland.com Ph: +47 41284676 M: 90 99 69 93	https://wergeland.com/frontpage-2/
Ásia, África, Europa, e Oriente Médio	Incineração e deposição	Industrial	Senthil, senthilv@adnoc.ae	https://adnoc.ae/en/adnoc-refining
Indústrias de petróleo do Golfo do México indústria de petróleo, Shell/Brasil, cliente na Austrália etc.	Injeção em formações geológicas	Industrial	Leandro Rodrigues	https://lotusllc.com/

