



ESTUDO DE MONITORAMENTO DO NÍVEL DE RADIAÇÃO IONIZANTE  
ORIUNDO DO NORM NA PRÁTICA DE ÓLEO E GÁS UTILIZANDO  
TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO SEM CONTATO

Beatriz Rodrigues Fernandes Pedersane

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2024

ESTUDO DE MONITORAMENTO DO NÍVEL DE RADIAÇÃO IONIZANTE  
ORIUNDO DO NORM NA PRÁTICA DE ÓLEO E GÁS UTILIZANDO  
TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO SEM CONTATO

Beatriz Rodrigues Fernandes Pedersane

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Aprovada por: Prof. Ricardo Tadeu Lopes

Dr. Anderson Gomes de Paula

Prof. Joaquim Teixeira de Assis

Rio de janeiro, RJ - Brasil

Dezembro de 2024

Pedersane, Beatriz Rodrigues Fernandes

Estudo de monitoramento do nível de radiação ionizante oriundo do NORM na prática de óleo e gás utilizando tecnologia de medição sem contato/ Beatriz Rodrigues Fernandes Pedersane. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XIV, 44 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 35-44.

1. Monitoração de radiações ionizantes. 2. NORM 3. Industria Petróleo e Gás. 4. Detecção sem contato. I. Lopes, Ricardo Tadeu. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

Deus eu sou tão grata por todas as bênçãos diárias  
que o Senhor me deu!  
“Seja menos curioso sobre as pessoas  
e mais curioso sobre ideias.”

- Marie Curie

## AGRADECIMENTOS

“Portanto, vamos em frente, na mesma direção que temos seguido até agora.”

Filipenses 3:16 NTLH

Agradeço a Deus por me sustentar durante este ciclo que foi o mestrado.

Ao meu esposo Nelson Eduardo por todo incentivo e compreensão da minha ausência, dedicação e companheirismo em cada passo dessa jornada.

Agradeço aos meus pais Josemar e Fabiana, a minha irmã Gabriela por todo apoio e fé para que eu chegasse até aqui.

A instituição na qual atuei profissionalmente, representada pelo CEO, meus amigos de carreira profissional, e em especial a Diretora de Operações Vanessa Rodrigues pela colaboração dos processos de obtenção dos dados para escrita e pelo carinho assim demonstrado durante toda a etapa.

Também agradeço ao meu orientador, Prof. Ricardo Tadeu, pelo apoio e pela confiança no meu trabalho, a Prof. Inayá e a toda a equipe do PEN pela excelente estrutura de trabalho proporcionada.

Obrigada, por fim, a todos que de alguma forma contribuíram na minha caminhada até aqui.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como preenchimento parcial dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DE MONITORAMENTO DO NÍVEL DE RADIAÇÃO IONIZANTE  
ORIUNDO DO NORM NA PRÁTICA DE ÓLEO E GÁS UTILIZANDO  
TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO SEM CONTATO

Beatriz Rodrigues Fernandes Pedersane

Dezembro/2024

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

Esta dissertação investiga o monitoramento de radiação ionizante de Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (NORM) na indústria de óleo e gás, propondo uma metodologia de medição sem contato. NORM, formados por radionuclídeos como rádio-226, rádio-228 e radônio-222, que representam riscos à saúde ocupacional e ao meio ambiente ao serem mobilizados durante a extração e transporte.

O trabalho propõe melhorias no gerenciamento de NORM por meio de tecnologias avançadas para monitoramento em tempo real, permitindo a identificação precoce de contaminações e a implementação de estratégias eficazes para mitigar riscos radiológicos e ambientais. Foi desenvolvido um protótipo baseado na tecnologia SuperSense, que realiza medições radiométricas precisas em tubulações e tanques, reduzindo riscos operacionais e ambientais.

A pesquisa alinha-se às normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e diretrizes internacionais, demonstrando, por meio de dados de campo, a eficácia e aplicabilidade em unidades *offshore*. Conclui-se que a integração de tecnologias inovadoras ao gerenciamento de NORM melhora a segurança, eficiência e sustentabilidade ambiental na indústria de óleo e gás.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MONITORING STUDY OF IONIZING RADIATION LEVELS FROM NORM IN  
OIL AND GAS PRACTICES USING NON-CONTACT MEASUREMENT  
TECHNOLOGY

Beatriz Rodrigues Fernandes Pedersane

December 2024

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes

Department: Nuclear Engineering

This dissertation investigates the monitoring of ionizing radiation from Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in the oil and gas industry, proposing a contactless measurement methodology. NORMs, composed of radionuclides such as radium-226, radium-228, and radon-222, pose risks to occupational health and the environment when mobilized during extraction and transportation.

The study proposes improvements in NORM management through advanced technologies for real-time monitoring, enabling early detection of contamination and the implementation of effective strategies to mitigate radiological and environmental risks. A prototype based on SuperSense technology was developed to perform precise radiometric measurements in pipelines and storage tanks, thereby reducing operational and environmental risks.

The research aligns with the standards of the Brazilian National Nuclear Energy Commission (CNEN) and international guidelines, demonstrating the effectiveness and applicability of the proposed approach in offshore units through field data. It concludes that integrating innovative technologies into NORM management enhances safety, efficiency, and environmental sustainability in the oil and gas industry.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1 Objetivo</b> .....	1
<b>1.2 Introdução</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
<b>2.1 Origem da Radioatividade</b> .....	3
<b>2.2 Fonte Radioativa Natural</b> .....	4
<b>2.3 Fonte Radioativa Artificial</b> .....	6
<b>2.5 NORM na Indústria de Óleo e Gás</b> .....	7
<b>CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	12
<b>3.1 Contaminação do NORM em processos produtivos</b> .....	12
<b>3.2 Proteção Radiológica</b> .....	13
<b>3.3 Responsabilidades do Titular da Instalação</b> .....	13
<b>3.4 Responsabilidades do Supervisor de Radioproteção</b> .....	14
<b>3.5 Indivíduo Ocupacionalmente Exposto</b> .....	15
<b>3.6 Classificação de Área</b> .....	15
<b>3.7. Limitação de Dose</b> .....	16
<b>CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	18
<b>4.1 Principais aspectos do gerenciamento do NORM</b> .....	18
<b>4.2 Aplicabilidade</b> .....	19
<b>4.3 Métodos manuais para o monitoramento do NORM</b> .....	20
<b>4.4 Tecnologia de Medição com SuperSense</b> .....	21
<b>4.5 Proposta referente ao Uso de Tecnologia para o Monitoramento do NORM</b> ..	24
<b>4.6 Redução do risco de contaminação NORM</b> .....	25
<b>4.7 Redução dos Impactos Ambientais</b> .....	27
<b>4.8 Apresentação do Protótipo</b> .....	28

<b>CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>Análise de Dados e Classificação de Áreas.....</b>	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO .....</b>	<b>33</b>
<b>Conclusões .....</b>	<b>33</b>
<b>Sugestão para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>33</b>
<b>Referências .....</b>	<b>35</b>

## LISTA DE SIGLAS

CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear.
CPS	Contagem por segundo.
DIREJ	Divisão de Rejeitos.
DRS	Diretoria de Radioproteção e Segurança Nuclear.
FPSO	Floating Production Storage and Offloading.
IAEA	International Atomic Energy Agency.
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás.
IOE	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto.
IOGP	International Association of Oil & Gas Producers.
NORM	Naturally Occurring Radioactive Material.
NR	Norma Regulamentadora.
UNSCEAR	Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica.
GRR	Gerência de Rejeitos Radioativos.
PEN	Programa de Engenharia Nuclear.
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro.
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria.

## LISTA DE DEFINIÇÕES

Embalado	O conjunto formado pela embalagem e pelo seu conteúdo de rejeito.
Embalagem	Recipiente fechado, com ou sem revestimento interno, que tem a finalidade de permitir o transporte e o armazenamento do produto e, se necessário, servir de barreira de engenharia com o objetivo de blindar a radiação e/ou reter radionuclídeos.
Exposição	Ato ou condição de estar submetido à radiação ionizante.
Exposição Ocupacional	Exposição normal ou potencial de um indivíduo à radiação em decorrência de seu trabalho ou treinamento em instalações e atividades.
Gerência de Rejeitos Radioativos	Conjunto de atividades administrativas e técnicas envolvidas na coleta, segregação, manuseio, tratamento, acondicionamento, transporte, armazenamento, controle e deposição de rejeitos radioativos.
Indivíduo do Público	Qualquer membro da população quando não submetido à exposição ocupacional ou exposição médica.
Instalação Radiativa	Estabelecimento ou instalação onde se produzem, utilizam, transportam ou armazenam fontes de radiação. Excetuam-se desta definição: a) as instalações nucleares; b) os veículos transportadores de fontes de radiação, quando estas não são partes integrantes deles.
Meio Ambiente	O local e a circunvizinhança em que uma organização opera, incluindo ar, água, solo, recursos naturais, flora, fauna, seres humanos e suas inter-relações.
Monitoração	medição de grandezas para fins de controle ou avaliação da exposição à radiação, incluindo a interpretação dos resultados; a monitoração pode ser classificada quanto ao seu objetivo como monitoração individual, de área de trabalho, de fontes e ambiental ou de acordo com a situação como monitoração de rotina, planejada ou especial.
Limites de Dose	Limites anuais de doses de radiação que não devem ser excedidos.

Radiação  
alfa ou  
decaimento  
alfa

Partícula carregada positivamente, com alta energia, ejetada de núcleos pesados de átomos instáveis (radioativos), e que consiste em dois prótons e dois nêutrons. Ex.: Ra-226 é um emissor alfa.

Radiação  
Beta ou  
decaimento  
Beta

É uma partícula subatômica, com carga negativa ou positiva, de alta energia que é emitida por núcleos de átomos instáveis.

Radiação  
Gama

Radiação eletromagnética (raios ou fótons) emitida por núcleos de átomos instáveis nos processos de decaimento alfa e beta.

Radiação  
Natural de  
Fundo ou  
Background

É a radiação proveniente das fontes naturais de radiação, como a crosta terrestre e os raios cósmicos provenientes do sol e do espaço.

Rejeitos

Resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis.

Unidades  
Marítimas

Qualquer unidade marítima responsável por operações de exploração e/ou produção de petróleo e gás: plataformas, navios-sonda, FPSOs entre outras.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição mundial de exposição à radiação. Fonte: [16] .....	3
Figura 2 - Séries de decaimento (a) Actínio, (b) Tório e (c) Urânio. Fonte: [21] .....	6
Figura 3 – Esquema de reservatório de petróleo Brasileiro. Fonte: Petrobrás .....	8
Figura 4 – Borra oleosa e seu acúmulo (a) Borra oleosa (b) Tubo com incrustação por borra oleosa (c) Flange com entupimento parcial por borra oleosa. Fonte: (a) [47]; (b) [31]; (c) [42] .....	12
Figura 5 - Esquema de classificação de áreas. Fonte: Adaptado de [31] .....	16
Figura 6 – Tipos de Unidade Marítima. Fonte: [62] .....	20
Figura 7- Esquema de funcionamento. Fonte: O autor e [64] .....	22
Figura 8 - Esquema interno do equipamento. Fonte: O autor e [64] .....	22
Figura 9 - Esquema de calibração. Fonte: O autor e [64].....	23
Figura 10 - Imagem do cristal PVT.....	23
Figura 11 – Vaso contendo eletrônica. Fonte: O autor e [64] .....	23
Figura 12 - Equipamento instalado em tubulação. Fonte: O autor e [64] .....	24
Figura 13 – Diagrama esquemático de monitoramento. Fonte: O Autor e [64].....	25
Figura 14 - Representação da interação da radiação ionizante com o corpo humano. Fonte: [42] .....	26
Figura 15 - Simulação do Equipamento instalado em Vaso. Fonte: O autor .....	28
Figura 16 - Incrustação interna. Fonte: O autor .....	30
Figura 17 - Controle da taxa de exposição. Fonte: O autor.....	30
Figura 18 - Controle de CPS. Fonte: O autor .....	30
Figura 19 - Controle da classificação de área. Fonte: O autor .....	31
Figura 20 - Controle da taxa de exposição. Fonte: O autor.....	32
Figura 21 - Controle de CPS. Fonte: O autor .....	32
Figura 22 - Controle da classificação de área. Fonte: O autor .....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes da radiação ionizante natural na dose efetiva anual .....	5
Tabela 2 - Tipos de resíduos contendo NORM gerados nas instalações da indústria de óleo e gás natural.....	9
Tabela 3 - Concentrações do NORM .....	11
Tabela 4 - Principais locais com ocorrência de acúmulos com presença de NORM.....	13
Tabela 5 - Principais locais com ocorrência de acúmulos com presença de NORM.....	16
Tabela 6 - Leituras obtidas no primeiro cenário.....	29
Tabela 7 - Leituras obtidas no segundo cenário .....	31

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 Objetivo

O presente trabalho visa apresentar metodologias atuais para o controle da radioatividade na indústria de óleo e gás, assim como o uso de tecnologias para monitoração em tempo real dos níveis de radiação existentes no ato de armazenagem do petróleo nos tanques.

## 1.2 Introdução

A formação do petróleo é um processo geológico que ocorre ao longo de milhões de anos. Esse hidrocarboneto se origina da decomposição de matéria orgânica acumulada no fundo de oceanos e lagos, que, sob altas pressões e temperaturas, se transforma em compostos orgânicos complexos, incluindo o petróleo. Além de sua importância econômica, as características geológicas de suas formações estão diretamente relacionadas à presença de Materiais Radioativos de Ocorrência Natural - NORM, frequentemente encontrados em petróleo <sup>[1,2]</sup>.

Desde a Antiguidade, o petróleo desempenha um papel significativo na sociedade, sendo utilizado pela primeira vez na Babilônia para fins de vedação e iluminação. Com o advento da petroquímica, suas aplicações foram ampliadas, englobando desde combustíveis até a produção de plásticos, tintas e medicamentos. Apesar de suas diversas utilidades, a exploração e o uso do petróleo trazem desafios significativos, incluindo o manejo de resíduos radioativos gerados durante o processo de produção e extração <sup>[3,4]</sup>.

Os depósitos de petróleo geralmente estão localizados em bacias sedimentares, áreas que possuem condições favoráveis para a acumulação de matéria orgânica e posterior formação de hidrocarbonetos. No entanto, essas mesmas formações geológicas também são ricas em minerais que contêm radionuclídeos, como rádio-226 e rádio-228, que podem ser mobilizados durante a extração do petróleo. Essas características geológicas tornam o monitoramento de NORM essencial para garantir a segurança ambiental e ocupacional <sup>[5,6]</sup>.

A presença de materiais radioativos de ocorrência natural no petróleo é um desafio amplamente reconhecido pela indústria de óleo e gás. Esses materiais podem se acumular como incrustações ou borras durante o processo de extração, transporte e armazenamento do petróleo, representando riscos tanto para os trabalhadores quanto para o meio

ambiente. A detecção e o monitoramento eficazes desses materiais são, portanto, indispensáveis para prevenir a exposição desnecessária à radiação ionizante [7-9].

No contexto da proteção radiológica, as regulamentações nacionais e internacionais, como as da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, estabelecem limites de dose para indivíduos ocupacionalmente expostos e para o público em geral. Embora os níveis de NORM geralmente sejam baixos, em algumas situações podem ultrapassar os limites determinados, exigindo medidas específicas de controle. Nesse sentido, o desenvolvimento de tecnologias avançadas para detecção e monitoramento de radiação desempenha um papel fundamental [10-12].

As informações obtidas por meio de métodos de monitoramento, como o uso de tecnologias de medição sem contato, contribuem significativamente para a tomada de decisões estratégicas no controle operacional. Além de reduzir a exposição à radiação ionizante, essas metodologias permitem a elaboração de procedimentos de proteção radiológica alinhados às normas da CNEN e outros órgãos reguladores, promovendo a segurança dos trabalhadores, a sustentabilidade ambiental e a eficiência operacional [10-13].

## CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Origem da Radioatividade

A radioatividade é um fenômeno natural originado pela instabilidade de certos núcleos atômicos, que emitem energia ou partículas subatômicas para alcançar um estado mais estável. Este processo, conhecido como decaimento radioativo, ocorre naturalmente em elementos como urânio, tório e potássio, que estão presentes na crosta terrestre. Esses elementos contribuem para a radiação natural de fundo, uma exposição contínua e inescapável que afeta todos os organismos vivos e ambientes terrestres <sup>[14]</sup>.

No contexto global, a radiação ambiental natural representa a maior fonte de exposição humana à radiação ionizante, conforme ilustrado na Figura 1. A distribuição mundial de exposição à radiação, conforme apresentado, demonstra que a contribuição principal advém de fontes naturais, como os radionuclídeos presentes no solo e na atmosfera, além da radiação cósmica. Essa ilustração destaca diferenças regionais que refletem variações na geologia local e na altitude, bem como em fatores atmosféricos <sup>[15]</sup>.



Figura 1 - Distribuição mundial de exposição à radiação. Fonte: [16]

Os radionuclídeos naturais, como urânio-238 e tório-232, são remanescentes da formação do sistema solar e possuem meias-vidas extremamente longas. Estes isótopos, presentes desde a formação do planeta, são as principais fontes de radiação terrestre. Além

disso, outros isótopos como potássio-40 e carbono-14 desempenham papéis importantes na exposição ambiental e na datação de materiais orgânicos e inorgânicos [17].

Do ponto de vista físico-químico, a radioatividade ocorre devido a diferenças no número de nêutrons nos núcleos atômicos, criando isótopos instáveis. Durante o decaimento radioativo, esses isótopos emitem partículas atômicas e radiação gama, resultando na formação de elementos mais estáveis. Essa radiação interage com a matéria de maneiras diversas, podendo causar alterações genéticas em organismos vivos e influenciar processos geológicos. Por exemplo, na engenharia nuclear, princípios da interação da radiação com a matéria são utilizados para monitorar a radiação em contextos industriais e ambientais [18].

A interação da radiação com o ambiente é fundamental para compreender seus impactos biológicos e geológicos. No caso da exposição humana, os dados apresentados na Figura 1 reforçam a importância de estratégias de proteção radiológica para minimizar os riscos associados à radiação ionizante. Assim, o monitoramento contínuo e o manejo adequado dessas fontes de radiação, natural ou artificial, são essenciais para garantir a segurança ocupacional e ambiental [19].

## **2.2 Fonte Radioativa Natural**

A radiação natural é uma das principais fontes de exposição à radiação ionizante para a população mundial, e está presente desde a formação do planeta Terra. Esta radiação é emitida por radionuclídeos primordiais, como o urânio-238, o tório-232 e o potássio-40, que possuem meias-vidas muito longas e continuam presentes na crosta terrestre, além da contribuição da radiação cósmica. Estes elementos são responsáveis por grande parte da radiação de fundo à qual todos os organismos vivos estão expostos [16, 20].

Além disso, a radiação cósmica é uma fonte importante de exposição natural. Originada por partículas de alta energia provenientes do espaço, ela interage com a atmosfera terrestre, gerando partículas secundárias que chegam à superfície. A intensidade da radiação cósmica varia com a altitude e a latitude, sendo maior em regiões polares e de grande altitude. Por exemplo, a dose de radiação cósmica em regiões montanhosas é significativamente mais elevada do que ao nível do mar [20].

Outra fonte importante de radiação natural são os radionuclídeos cosmogênicos, como o carbono-14, que se formam pela interação de partículas cósmicas com átomos na atmosfera. O carbono-14 é amplamente utilizado para datar materiais orgânicos e

reconstruir eventos históricos e paleoclimáticos. Essa utilização destaca a versatilidade da radiação natural em áreas como arqueologia e ciências ambientais [14, 20].

Os elementos radioativos que integram a radiação de fundo contribuem para a dose de radiação ionizante à qual todos os seres vivos estão expostos. A média global estimada dessa dose efetiva natural é de 2,42 mSv por ano [16, 20]. A Tabela 1 apresenta os valores médios da dose efetiva anual para adultos, provenientes de fontes naturais de radiação ionizante.

Tabela 1 - Componentes da radiação ionizante natural na dose efetiva anual

Componente de exposição	Dose efetiva anual (mSv/h)
Raios cósmicos e radionuclídeos cosmogênicos	0,39
Radionuclídeos terrestres: exposição gama externa	0,48
Radionuclídeos no corpo: exposição interna, exceto radônio	0,29
Radônio e filhos	1,26
Total	2,42

Fonte [16]

Entre os radionuclídeos terrestres, destacam-se as séries de decaimento do urânio-238 e do tório-232, que originam isótopos intermediários como o rádio-226 e o radônio-222 [16, 21]. O radônio, por ser um gás nobre radioativo, possui alta mobilidade e é capaz de se infiltrar em ambientes fechados, como residências e minas de mineração, onde pode se acumular e elevar os riscos à saúde humana devido à inalação prolongada. A Figura 2 apresenta séries de decaimento, ilustrando os isótopos envolvidos, os tipos de radiação emitida e a complexidade dos processos que resultam na liberação de partículas alfa, beta e radiação gama, indicando o papel desses fenômenos na exposição à radiação ambiental [20, 21].

NORM são frequentemente encontrados em atividades industriais, como a mineração, a extração de petróleo e gás e o beneficiamento de fosfatos. Durante essas operações, radionuclídeos presentes nas formações geológicas podem ser trazidos à superfície, acumulando-se em borras, escórias ou incrustações. Este fenômeno exige monitoramento rigoroso, pois pode gerar riscos tanto para os trabalhadores quanto para o meio ambiente [11, 20 - 22].

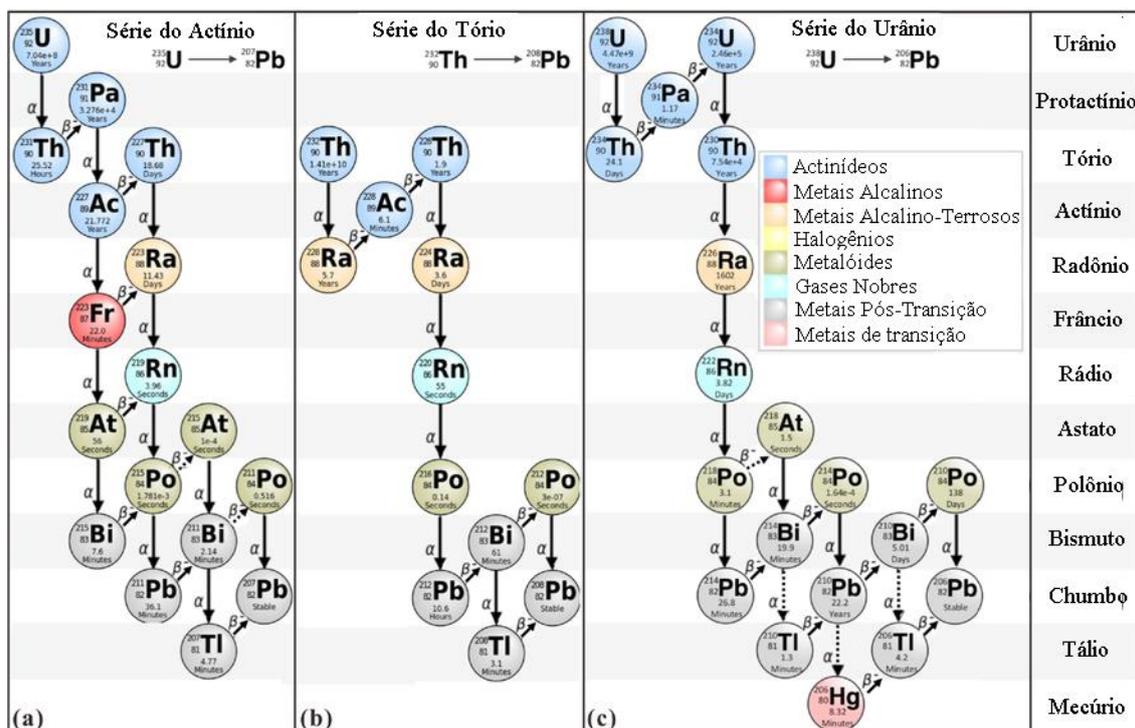


Figura 2 - Séries de decaimento (a) Actínio, (b) Tório e (c) Urânio. Fonte: [21]

No Brasil, algumas regiões são conhecidas por apresentar altos níveis de radioatividade natural devido à presença de depósitos de Urânio e Tório. Entre essas áreas, destacam-se a praia de Guarapari, localizada no sul da região metropolitana de Vitória, Espírito Santo [6, 9, 13, 23], e a região das minas de urânio próximas à cidade de Poços de Caldas, em Minas Gerais [6, 9, 13, 24].

Por fim, o estudo das fontes naturais de radiação, incluindo suas séries de decaimento e os fenômenos de emissão radioativa relacionados, é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de proteção radiológica. A análise adequada dessas fontes contribui para minimizar os riscos associados à radiação ionizante e para a aplicação prática dos conhecimentos em setores industriais e científicos, promovendo o bem-estar e a segurança ambiental.

### 2.3 Fonte Radioativa Artificial

A radiação artificial é gerada por meio do bombardeamento de núcleos estáveis de elementos naturais com diferentes partículas, como prótons, partículas alfa, beta, nêutrons, pósitrons e dêutrons. Esse processo provoca uma transformação nuclear, resultando na formação de núcleos de outro elemento, um fenômeno que não ocorre de forma espontânea na natureza. Essa transmutação só é possível em condições controladas, como em laboratórios especializados [25].

A primeira transmutação artificial foi realizada por Ernest Rutherford em 1919, ao bombardear átomos de nitrogênio com partículas alfa, resultando na formação de oxigênio e prótons. Em 1934, os franceses Jean Frédéric Joliot-Curie e Irène Joliot-Curie bombardearam o alumínio-27 ( $^{27}\text{Al}$ ) com partículas alfa ( $^4\text{He}$ ), produzindo o isótopo radioativo fósforo-30 ( $^{30}\text{P}$ ) e um nêutron <sup>[26]</sup>.

Durante esses experimentos, também foi identificada a emissão de uma partícula chamada pósitron ( $+1^\circ\beta$ ), observada no decaimento do fósforo-30, que resulta na formação do silício-30 <sup>[25]</sup>. As descobertas resultantes das reações de transmutação trouxeram inúmeros benefícios à humanidade, especialmente na indústria e na medicina. Na medicina, a radiação artificial é amplamente utilizada em equipamentos como os tubos de raios X e em aceleradores de partículas, que são fundamentais em tratamentos de radioterapia <sup>[27-29]</sup>.

A principal fonte de exposição à radiação artificial para a população é a radiação utilizada na medicina, especialmente em diagnósticos por imagem, como os exames de raios X e tomografia computadorizada, e em tratamentos oncológicos, como a radioterapia. Esses procedimentos representam uma contribuição significativa para a dose de radiação recebida, variando de acordo com a frequência e o tipo de aplicação <sup>[30]</sup>.

## **2.5 NORM na Indústria de Óleo e Gás**

Os NORM migram do reservatório de petróleo e fluem através das linhas de produção até alcançar as áreas operacionais <sup>[31]</sup>. No Brasil, o problema começou nos anos 80, quando a Petrobras identificou a presença de radiação em borras de óleo dos tubos vindos do campo de óleo Namorado, na Bacia de Campos <sup>[32,33]</sup>. A figura 3 representa a região do Pré-sal brasileiro, na bacia de Campos.

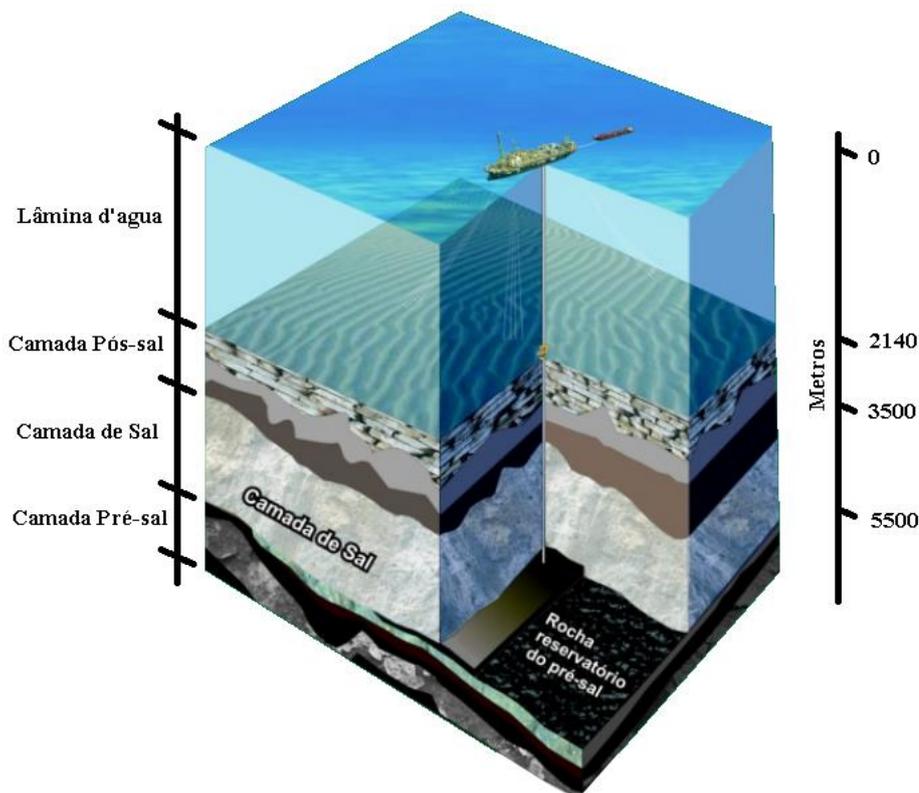


Figura 3 – Esquema de reservatório de petróleo Brasileiro. Fonte: Petrobrás<sup>a</sup>

Na indústria de óleo e gás, os NORM são mobilizados a partir das rochas reservatório para os fluidos de produção, incluindo água, óleo e gás natural. Esses materiais contêm radionuclídeos como rádio-226, rádio-228 e chumbo-210 (Pb-210), que são dissolvidos nos fluidos durante a extração. Este fenômeno exige monitoramento rigoroso, devido à possível concentração de radioatividade em borras e escórias, comuns nesse setor industrial [31, 33, 34].

A Tabela 2 apresenta os tipos de rejeitos de NORM gerados pelas indústrias de óleo e gás natural, destacando os principais radionuclídeos presentes e os locais onde esses materiais são mais frequentemente identificados.

<sup>a</sup> [https://comunicabaciadesantos.petrobras.com.br/documents/d/comunica-bacia-de-santos/6\\_informe-bacia-de-santos-edicao-6\\_1](https://comunicabaciadesantos.petrobras.com.br/documents/d/comunica-bacia-de-santos/6_informe-bacia-de-santos-edicao-6_1)

Tabela 2 - Tipos de resíduos contendo NORM gerados nas instalações da indústria de óleo e gás natural

Tipos de rejeitos contendo NORM	Radionuclídeos	Locais
Incrustações de rádio	$^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ , $^{224}\text{Ra}$ com progênes	Partes úmidas das instalações de produção; Finalização de poços
Borras de rádio	$^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ , $^{224}\text{Ra}$ com progênes	Separadores, Tanques separadores de óleo
Depósitos de chumbo	$^{210}\text{Pb}$ com progênie	Partes úmidas das instalações de produção de gás; Finalização de poços
Películas de chumbo	$^{210}\text{Pb}$ com progênie	Tratamento e transporte de óleo e gás
Películas de polônio	$^{210}\text{Po}$	Instalação de tratamento de condensados
Condensados	$^{210}\text{Po}$	Produção de gás
Gás natural	$^{222}\text{Rn}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{210}\text{Po}$	Domínio do consumidor Sistemas de transporte e tratamento de gás
Água produzida	$^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ , $^{224}\text{Ra}$ , $^{210}\text{Pb}$	Cada uma das Instalações de produção

Fonte: Adaptado de [33, 34]

À medida que os fluidos de produção são expostos a mudanças drásticas de temperatura, pressão e composição química, ao longo do processo de extração, os radionuclídeos podem se precipitar e formar depósitos sólidos. Esses depósitos frequentemente se acumulam na forma de incrustações de sulfato e carbonato de rádio, aderindo às paredes de tubulações, tanques de armazenamento e outros equipamentos. Esse acúmulo não só aumenta os desafios operacionais devido à obstrução de equipamentos, mas também representa um risco potencial de exposição à radiação para os trabalhadores e ao meio ambiente [34, 41].

Adicionalmente, os produtos de decaimento desses radionuclídeos podem contribuir para a formação de borras radioativas e lamas durante os processos de separação de óleo, gás e água. A gestão adequada desses resíduos radioativos é essencial para minimizar os impactos ambientais e garantir a segurança dos trabalhadores. Assim, o monitoramento de NORM na indústria de óleo e gás tornou-se uma prática obrigatória em muitos países, sendo regulamentado por normas nacionais e internacionais.

Segundo a International Association of Oil & Gas Producers – IOGP (2016) [42], as seguintes condições operacionais podem alterar e/ou incrementar o acúmulo de NORM em uma instalação:

- Variações de temperatura e pressão.
- Fluxo variável (transição entre laminar e turbulento).

- Expansão de gás devido a alteração do diâmetro da tubulação.
- Variação de pH (aumento da concentração de sulfatos).
- Presença de micro cristais nas superfícies internas dos equipamentos.

A análise de petróleo e gás de muitos poços diferentes mostrou que os isótopos de urânio e tório de vida longa não são mobilizados das formações rochosas que os contêm. No entanto, Ra-226, Ra-224, Ra-228 e Pb-210 são mobilizados, e aparecem principalmente na água coproduzida durante a extração de petróleo e gás. Esses isótopos e sua progênie radioativa podem então precipitar para fora da solução, juntamente com depósitos de sulfato e carbonato como incrustação ou lodo em tubulações e equipamentos relacionados <sup>[43]</sup>.

O radônio-222, que é o produto de decaimento imediato do rádio-226, comporta-se como um gás nobre e acompanha preferencialmente as linhas de gás durante os processos de extração. Por meio de uma sequência de decaimentos rápidos, ele gera o chumbo-210 (Pb-210), que possui uma meia-vida mais longa. O Pb-210 pode se depositar como um filme fino nas superfícies internas de equipamentos utilizados na extração de gás, representando um risco operacional e radiológico <sup>[43, 45]</sup>.

Os níveis de radioatividade relatados em poços de óleo e gás variam amplamente, influenciados pela radioatividade intrínseca das rochas reservatório e pela salinidade da água coproduzida. A salinidade elevada aumenta a solubilidade de radionuclídeos, tal qual o rádio-226, favorecendo sua mobilização. Como a salinidade da água de produção tende a aumentar com o tempo de exploração, poços mais antigos frequentemente apresentam concentrações mais altas de NORM em comparação aos poços mais jovens <sup>[11, 46]</sup>.

A Tabela 3 apresenta as características da NORM produzida durante a extração de petróleo e gás e algumas medidas indicativas das concentrações.

Tabela 3 - Concentrações do NORM

Radionuclídeo	Gás natural Bq/m <sup>3</sup>	Água produzida Bq/m <sup>3</sup> (10 <sup>-3</sup> )	Incrustação Dura Bq/kg (10 <sup>+3</sup> )	Lodo Bq/kg (10 <sup>+3</sup> )
U – 238	-	0,0003 - 0,1	0,001 – 0,5	0,005 – 0,01
Ra – 226	-	0,002 – 1200	0,1 – 15000	0,05 – 800
Po – 210	0,002 – 0,08	-	0,02 – 1,5	0,004 - 160
Pb – 210	0,005 – 0,02	0,05 – 190	0,02 - 75	0,1 - 1300
Rn – 222	5 – 200000	-	-	-
Th – 232	-	0,0003 - 0,001	0,001 – 0,002	0,002 – 0,01
Ra – 228	-	0,3 – 180	0,05 - 2800	0,5 - 50
Ra - 224	-	0,5 - 40	-	-

Fonte: [11]

## CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 Contaminação do NORM em processos produtivos

A presença de NORM nas instalações está diretamente relacionada às características dos reservatórios, mas também será influenciada pelas condições operacionais e pelo tempo de operação e produção de cada unidade. De forma resumida, pode-se identificar a presença de NORM ao longo do processo produtivo de óleo e gás em acúmulos sob a forma de borras oleosas e incrustações sólidas, conforme ilustra a Figura 4 <sup>[11]</sup>.



Figura 4 – Borra oleosa e seu acúmulo (a) Borra oleosa (b) Tubo com incrustação por borra oleosa (c) Flange com entupimento parcial por borra oleosa. Fonte: (a) [47]; (b) [31]; (c) [42]

Durante o processo de extração e produção, os fluidos produzidos podem conter radionuclídeos como rádio-226, rádio-228 e radônio-222. Devido às condições operacionais, como variações de temperatura e pressão, esses elementos podem precipitar e formar depósitos sólidos em tubulações, válvulas e tanques. Esses depósitos aumentam os desafios operacionais e representam um risco radiológico significativo, exigindo estratégias de controle e manejo adequadas <sup>[33 - 41, 43, 46, 48 - 54]</sup>.

Destaca-se que a quantidade de radionuclídeos deslocados dos reservatórios para fluidos produzidos varia significativamente entre instalações e até mesmo entre poços produtores <sup>[56 - 61]</sup>. De acordo com a International Atomic Energy Agency (2003) <sup>[44]</sup>, um resumo dos locais de ocorrência correlacionado aos radionuclídeos correspondentes é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Principais locais com ocorrência de acúmulos com presença de NORM

Tipo	Radionuclídeos	Características	Ocorrência
Incrustações contendo Ra	Ra-226, Ra-228, Ra-224 e seus elementos filhos	Depósitos sólidos de sulfatos e carbonatos de Ca, Sr e Ba	Tubos e equipamentos de instalação de produção
Borra oleosa contendo Ra	Ra-226, Ra-228, Ra-224 e seus elementos filhos	Areia, argila, parafinas, metais pesados	Separadores, Tanques de separação de óleo
Água produzida	RA-226, Ra228, Ra-224 e/ou Pb-210	Mais ou menos salina, grandes volumes na produção de óleo	Processo de produção

Fonte: Adaptado de [11, 44].

### 3.2 Proteção Radiológica

O Serviço de Proteção Radiológica - SPR é uma estrutura dedicada à implementação e manutenção do plano de proteção radiológica em uma instalação. Embora a denominação "Serviço de Proteção Radiológica" não seja obrigatória, a função que desempenha é essencial para garantir a segurança radiológica. Dentro do SPR, existe uma equipe técnica responsável pela operação e manutenção rotineira da instalação, assegurando que as práticas de proteção radiológica sejam efetivamente aplicadas <sup>[10, 61]</sup>.

### 3.3 Responsabilidades do Titular da Instalação

Conforme a norma CNEN-NN-3.01 - Art. 10 <sup>[10]</sup>, os titulares são responsáveis pela radioproteção das pessoas e do meio ambiente e pela segurança radiológica das instalações e atividades, devendo:

- I - Fixar objetivos em termos de radioproteção e segurança radiológica em conformidade com os requisitos das normas da CNEN;
- II - Estabelecer uma estrutura de radioproteção em consonância com a natureza e os riscos radiológicos associados com as instalações e atividades;
- III - Adotar as ações necessárias para assegurar que os Indivíduos ocupacionalmente Exposto - IOE estejam cientes de que sua segurança é parte integrante do programa de radioproteção;
- IV - Garantir e promover a segurança das fontes sob sua responsabilidade, considerando a categorização constante no Anexo B; e
- V - Garantir a execução de programas para treinamento de pessoal com funções relevantes para a proteção dos membros do público.

### **3.4 Responsabilidades do Supervisor de Radioproteção**

Conforme norma CNEN-NN-3.01 - Art. 19 <sup>[10]</sup>, as responsabilidades dos supervisores de radioproteção são:

I - Manter sob controle, em conformidade com requisitos estabelecidos em normas da CNEN, com exigências de licenciamento e condições operacionais autorizadas: a) as fontes de radiação ionizante; b) a liberação de efluentes e os rejeitos radioativos; c) as condições de radioproteção e segurança radiológica dos indivíduos ocupacionalmente expostos e do público; d) as áreas livres, supervisionadas e controladas, e; e) os equipamentos de radioproteção e monitoração da radiação;

II - Interromper qualquer atividade que considere potencialmente insegura em termos da proteção radiológica;

III - Manter o titular da instalação informado sobre eventos relativos à radioproteção e segurança radiológica;

IV - Executar ou coordenar prontamente ações protetoras e mitigadoras quando da ocorrência de eventos que comprometam a radioproteção e segurança radiológica dos trabalhadores, de pacientes (quando aplicável), do público e do meio ambiente;

V - Comunicar imediatamente ao titular da instalação, sem prejuízo das ações mitigadoras, a ocorrência de irregularidades constatadas com fontes de radiação e as ações necessárias para garantir a radioproteção e segurança radiológica da instalação ou da atividade, em cumprimento às normas da CNEN, bem como manter registro dessa comunicação;

VI - Comunicar imediatamente a outras autoridades em caso de ocorrências que requeram intervenção imediata delas, dando ciência ao titular da instalação;

VII - Coordenar o treinamento, orientar e avaliar o desempenho dos indivíduos ocupacionalmente expostos, sob o ponto de vista da radioproteção e segurança radiológica;

VIII - Atuar em situações de emergência nuclear ou radiológica, de acordo com o previsto no plano de emergência da instalação ou atividade aprovado pela CNEN, investigando e implementando as ações corretivas e preventivas aplicáveis;

IX - Elaborar ou coordenar a elaboração do plano de radioproteção da instalação, mantê-lo atualizado e assegurar sua aplicação;

X - Estabelecer e garantir a aplicação de procedimentos para recebimento, manuseio, uso, acondicionamento, transporte e armazenamento de fontes de radiação e de rejeitos radioativos;

XI – Estabelecer, avaliar e manter atualizados e disponíveis para verificação os registros referentes ao serviço de radioproteção da instalação;

XII - Manter-se atualizado sobre a evolução de conceitos e tecnologias relacionados à segurança nuclear ou radiológica, à radioproteção e aos regulamentos aplicáveis;

XIII - Comunicar à CNEN, no prazo estabelecido em norma específica, seu desligamento de qualquer instalação ou atividade em que atue como supervisor de radioproteção;

XIV - Estar atento aos fatores humanos e organizacionais, zelando pela manutenção da cultura de segurança na organização;

XV - Comunicar ao titular da instalação eventual deterioração nas ações relacionadas à cultura de segurança; e

XVI - Cumprir disposições estabelecidas em normas específicas.

### **3.5 Indivíduo Ocupacionalmente Exposto**

Conforme norma CNEN-NN-3.01 - Art. 20 <sup>[10]</sup>, os IOE devem:

I - Seguir as regras e procedimentos aplicáveis à radioproteção e segurança radiológica especificados pelas partes responsáveis, incluindo a participação em treinamentos relativos à radioproteção e segurança radiológica, que os capacite a conduzir suas tarefas de acordo com os requisitos desta Norma;

II - Fornecer às partes responsáveis quaisquer informações sobre seu trabalho, passado e atual, incluindo histórico de dose, de forma que as doses recebidas em distintas instalações não excedam os limites anuais;

III - Fornecer às partes responsáveis a informação de ter sido ou estar sendo submetido a tratamento médico ou diagnóstico que utilize radiação ionizante; e

IV - Abster-se de quaisquer ações intencionais que possam colocá-lo, ou a terceiros, em situações que contrariem os requisitos desta Norma.

### **3.6 Classificação de Área**

De acordo com a norma CNEN-NN-3.01 <sup>[10]</sup>, as áreas podem ser classificadas como:

- Área Controlada - área sujeita a regras especiais de proteção e segurança, com a finalidade de controlar as exposições normais, prevenir a disseminação de contaminação radioativa e prevenir ou limitar a amplitude das exposições potenciais;

- Área Supervisionada - área para a qual as condições de exposição ocupacional são mantidas sob supervisão, mesmo que as medidas de proteção e segurança específicas não sejam necessárias;
- Área Livre - qualquer área que não seja classificada como área controlada ou área supervisionada. (qualquer figura, tabela ou quadro que surge no texto, é necessário que seja “chamada” no corpo do texto. Neste sentido, tem de chamar a figura 5).

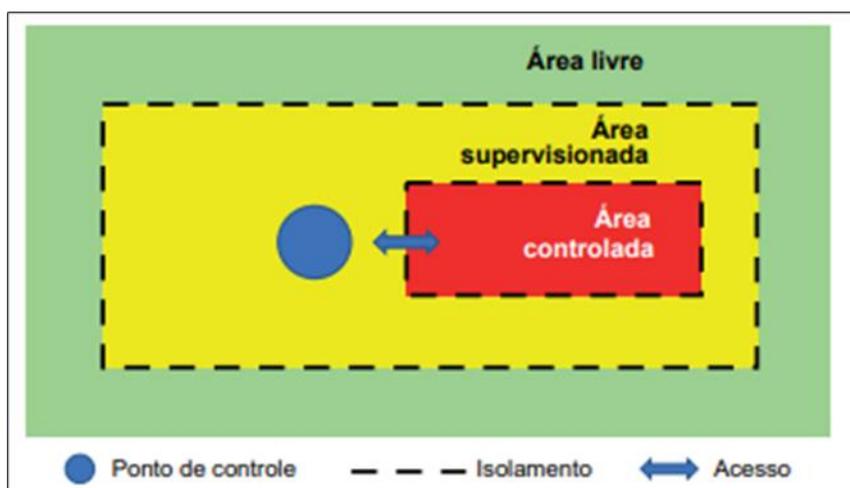


Figura 5 - Esquema de classificação de áreas. Fonte: Adaptado de [31]

### 3.7. Limitação de Dose

De acordo com a norma CNEN-NN-3.01 - Art. 52 <sup>[10]</sup>, a exposição de indivíduos em situações de exposição planejada deve ser restringida de tal modo que o acréscimo da dose efetiva, ou dose equivalente em órgãos ou tecidos de interesse, causada pela possível combinação de exposições não exceda os limites de dose especificados, conforme indicado na Tabela 5, salvo em circunstâncias especiais autorizadas pela CNEN.

Tabela 5 - Principais locais com ocorrência de acúmulos com presença de NORM

Limite de dose Anuais <sup>[a]</sup>			
Grandeza	Órgão	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto	Indivíduo do público
Dose efetiva	Corpo inteiro	20 mSv <sup>[b]</sup>	1mSv <sup>[c]</sup>
Dose equivalente	Cristalino	20 mSv <sup>[b]</sup>	15 mSv
	Pele <sup>[d]</sup>	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	-

Fonte: [10]

[a] Para fins de controle administrativo efetuado pela CNEN, o termo dose anual deve ser considerado como dose no ano calendário, isto é, no período decorrente de janeiro a dezembro de cada ano.

[b] Este valor de limite de dose efetiva para corpo inteiro ou dose equivalente para cristalino pode, alternativamente, ser a média aritmética em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.

[c] Se a CNEN considerar pertinente poderá autorizar um valor de dose efetiva de até 5 mSv em um ano, desde que a dose efetiva média em um período de 5 anos consecutivos, não exceda a 1 mSv por ano.

[d] Valor médio em 1 cm<sup>2</sup> de área, na região mais irradiada.

## **CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Principais aspectos do gerenciamento do NORM**

Este trabalho identifica o público-alvo e apresenta a metodologia atualmente empregada para o controle da NORM, com o objetivo de orientar a compreensão e a aplicação da tecnologia proposta. Para que o gerenciamento seja eficaz, é essencial observar os seguintes aspectos:

- **Avaliação:** Realizar avaliações de risco detalhadas para determinar a concentração de radionuclídeos e os potenciais impactos na saúde humana e no meio ambiente, com base em dados coletados nas áreas de trabalho e no tipo de atividade industrial.
- **Monitoramento:** Implementar um programa sistemático de monitoramento que inclua medições regulares de níveis de radiação e de concentrações de NORM em equipamentos, materiais e áreas de trabalho, utilizando instrumentos calibrados e métodos padronizados.
- **Controle de Exposição:** Adotar medidas específicas para minimizar a exposição dos IOE a NORM, como o uso de Equipamentos de Proteção Individual - EPIs, a realização de dosimetria individual, o controle de acesso a áreas restritas e a capacitação sobre os riscos associados.
- **Gestão de Resíduos:** Gerenciar adequadamente os resíduos contendo NORM, incluindo a coleta, armazenamento temporário, transporte e disposição final, em conformidade com as regulamentações nacionais e internacionais, para evitar contaminação ambiental e riscos à saúde.
- **Regulamentação Vigente:** Cumprir rigorosamente as diretrizes e normas estabelecidas por órgãos reguladores, como a Agência Internacional de Energia Atômica - AIEA e a CNEN, para garantir a segurança radiológica e ambiental.
- **Treinamentos:** Promover treinamentos regulares e contínuos para todos os envolvidos, com foco na identificação de riscos, no manejo seguro de NORM e nas melhores práticas para reduzir a exposição, promovendo uma cultura de segurança.
- **Descontaminação:** Quando níveis elevados de NORM forem detectados, implementar procedimentos eficazes de descontaminação em equipamentos, instalações e áreas afetadas, utilizando técnicas apropriadas e minimizando resíduos secundários.

No conjunto, essas ações refletem as boas práticas para o manejo de NORM e proporcionam uma estrutura sólida para a mitigação de riscos. A combinação dessas

medidas integradas assegura um ambiente de trabalho mais seguro e a conformidade com as regulamentações, além de minimizar os impactos negativos ao meio ambiente. Essa abordagem é um essencial para a sustentabilidade e a eficiência operacional nas atividades que envolvem materiais radioativos de ocorrência natural.

## **4.2 Aplicabilidade**

Este estudo foca nas operações realizadas em unidades marítimas destinadas à exploração, perfuração e produção de petróleo e gás em ambientes offshore. Essas unidades desempenham um papel essencial na cadeia produtiva de hidrocarbonetos, oferecendo suporte técnico e operacional em condições desafiadoras, como águas profundas e ultra profundas. As principais categorias de unidades marítimas abordadas incluem:

- Plataformas Fixas desenhadas para produção ou perfuração: São estruturas utilizadas na indústria de petróleo e gás para a produção ou perfuração em águas rasas. Elas são construídas diretamente no leito marinho e são projetadas para suportar os equipamentos necessários para a extração de hidrocarbonetos.
- Semissubmersível desenhadas para produção ou perfuração: São plataformas flutuantes projetadas para a perfuração e produção de petróleo e gás em águas profundas. Elas são caracterizadas por sua estrutura, que é parcialmente submersa e flutua na água, proporcionando estabilidade e resistência a ondas e ventos.
- Navio sonda desenhadas para perfuração: São embarcações projetadas especificamente para a perfuração de petróleo e gás em águas profundas. Eles combinam a capacidade de navegação de um navio com a tecnologia de perfuração necessária para acessar reservas submarinas. Os navios sondas são particularmente valiosos em áreas onde a profundidade do mar torna impraticável o uso de plataformas fixas ou semissubmersíveis.
- FPSO (Floating Production Storage Offloading / unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência) desenhada para produção: É uma embarcação projetada para a produção, armazenamento e descarregamento de petróleo e gás em alto-mar.

Essas unidades são essenciais na indústria de petróleo, especialmente em águas profundas e em áreas onde a construção de plataformas fixas não é viável, na Figura 6 uma representação de cada unidade marítima e algumas de suas características.



	Fixa	Autoelevável (ou autoelevatória ou jack-up)	Semissubmersível	FPSO	FPSO Monocolumna	TLWP (plataforma de pernas atrinçadas)	Navio-Sonda
Lâmina d'água (profundidade no local da instalação/operação)	Até 300 metros.	Até 150 metros.	Mais de 2.000 metros (pode ser instalada em grandes profundidades graças aos sistemas de ancoragem modernos).	Mais de 2.000 metros (pode ser instalada em grandes profundidades graças aos sistemas de ancoragem modernos).	Mais de 2.000 metros.	Até 1.500 metros.	Mais de 2.000 metros.
Como é	Funciona como uma estrutura rígida, fixada no fundo do mar por um sistema de estacas cravadas.	Tem pernas que se autoelevam. Ao chegar à locação, um mecanismo faz as pernas descerem e serem assentadas no solo marinho.	Plataforma flutuante, estabilizada por colunas. Pode ser ancorada no solo marinho ou dotada de sistema de posicionamento dinâmico, que mantém a posição da plataforma de forma automática.	Plataforma flutuante, convertida a partir de navios petroleiros, na maioria dos casos. Assim como a semissubmersível, é ancorada no solo marinho.	Tem as mesmas características da FPSO, mas seu casco tem formato cilíndrico.	Plataforma flutuante, de casco semelhante a uma semissubmersível. É ancorada no fundo do mar por cabos ou tendões de aço tracionados.	Plataforma flutuante com casco em forma de navio, usada para perfuração de poços. Pode ser ancorada no solo marítimo ou dotada de sistema de posicionamento dinâmico, que mantém a posição da embarcação de forma automática.
Atividade de perfuração	Sim.	Sim.	Sim (algumas podem ser só de produção).	Não.	Não.	Sim (só para a manutenção dos poços).	Sim.
Atividade de produção	Sim.	Não.	Sim (algumas podem ser só de perfuração).	Sim.	Sim (geralmente são unidades de perfuração ou de produção).	Sim.	Não.

Figura 6 – Tipos de Unidade Marítima. Fonte: [62]

### 4.3 Métodos manuais para o monitoramento do NORM

Este estudo para o monitoramento em tempo real foi implementado devido ao histórico de incrustações radioativas em unidades marítimas (produção offshore de óleo e gás) na Bacia de Campos e Bacia de Santos.

Neste trabalho fazemos a apresentação de diversos cenários na qual os processos se interligarão em algum momento após o comissionamento da unidade marítima; estes seguem são:

- Monitoramento na fase I – Construção.

Esta prática ocorre no ato em que a unidade marítima está em seu processo de vistorias para aprovação de documentos e justificativa para início de operações. Poderá acontecer no próprio estaleiro atracada ou quando a unidade marítima está fundeada. Em geral, esse tipo de monitoração acontece com a utilização de monitor de radiação devidamente calibrado e aferido, através do especialista.

- Monitoramento na fase II – Operação.

Esta prática ocorre em diferentes cenários, sendo eles: em estruturas da unidade marítima, em ferramentas que são retiradas do poço, em equipamentos instalados na planta de produção. Poderá acontecer na unidade marítima já em operação ou por período de reparo. Em geral, esse tipo de monitoração acontece com a utilização de monitor de radiação devidamente calibrado e aferido, através do especialista.

- Monitoramento na fase III – Manutenção.

Esta prática ocorre em diferentes cenários, sendo eles: limpeza de tanques com incrustações, em tambores preenchidos com os rejeitos, em manipulação de materiais oriundos de intervenção de ferramentas. Em geral, esse tipo de monitoração acontece com a utilização de monitor de radiação devidamente calibrado e aferido, através do especialista.

- Análise de Radionuclídeos.

Os radionuclídeos mais importantes a serem determinados nas amostras de borras e incrustações são  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{228}\text{Th}$ , uma vez que a exposição a estes radionuclídeos pode acarretar uma dose significativa nos trabalhadores, aumentando os riscos à saúde deles.

#### **4.4 Tecnologia de Medição com SuperSense**

O equipamento SuperSense é um sistema de medição de densidade que consiste em detector de cintilação e unidade de avaliação numa só invólucro. O funcionamento ocorre da seguinte forma representado na figura 7:

- Os raios Gama interagem com o cintilador;
- O cintilador gera “flash” de luz;
- Essa luz incide no fotocátodo da fotomultiplicadora;
- Pelo efeito fotoelétrico gera um elétron, onde esse elétron é emitido no vácuo;
- O elétron é acelerado em direção ao 1º dínodo;
- O elétron se multiplica ao atingir cada dínodo;
- Altíssima multiplicação.

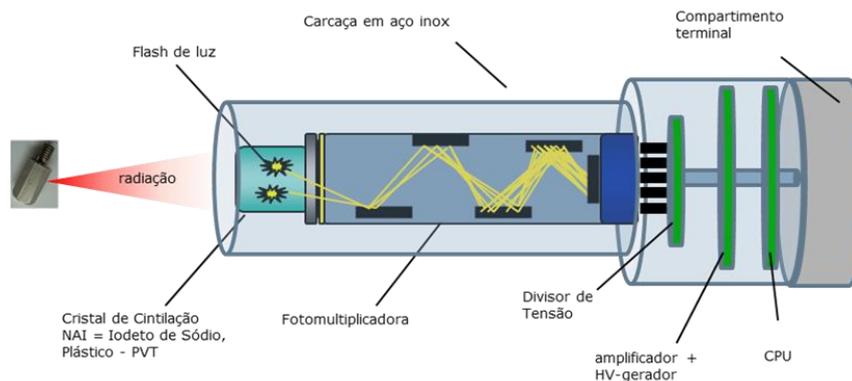


Figura 7- Esquema de funcionamento. Fonte: O autor e [64]

A fotomultiplicadora, que transforma os sinais luminosos produzidos pela radiação, usualmente muito fracos, em sinais elétricos com intensidade conveniente para serem processados em um sistema de contagem.



Figura 8 - Esquema interno do equipamento. Fonte: O autor e [64]

O medidor de densidade utiliza o método de medição radiométrica, ou seja, absorção da radiação Gama que passa através do produto a ser medido. A fim de obter um ótimo efeito de medição para cada local (vaso, linhas entre outros...). Vantagens estruturais do equipamento:

- Grandes diâmetros de tubo ou recipiente.
- Espessuras de parede elevadas.

O sistema é composto por: Unidade Eletrônica LINCE LB480 SuperSens Cristal PVT de 150x150mm com as características (A), (B) e (C), em que a calibração inicial ocorre segundo o diagrama representado na Figura 9.

(A) Faixa de Medição: 0% – 50% – 100%.

(B) Alarme sonoro.

(C) Caixa de display.

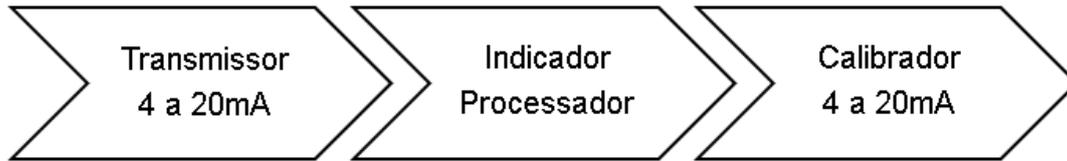


Figura 9 - Esquema de calibração. Fonte: O autor e [64]

O equipamento é composto por Cristal PVT de 150x150mm, conforme a Figura 10.



Figura 10 - Imagem do cristal PVT

O equipamento é composto por uma parte eletrônica embarcada e isolada, conforme a Figura 11.



Figura 11 – Vaso contendo eletrônica. Fonte: O autor e [64]

É possível acoplar o equipamento SuperSens em uma linha de tubos, conforme a Figura 12.

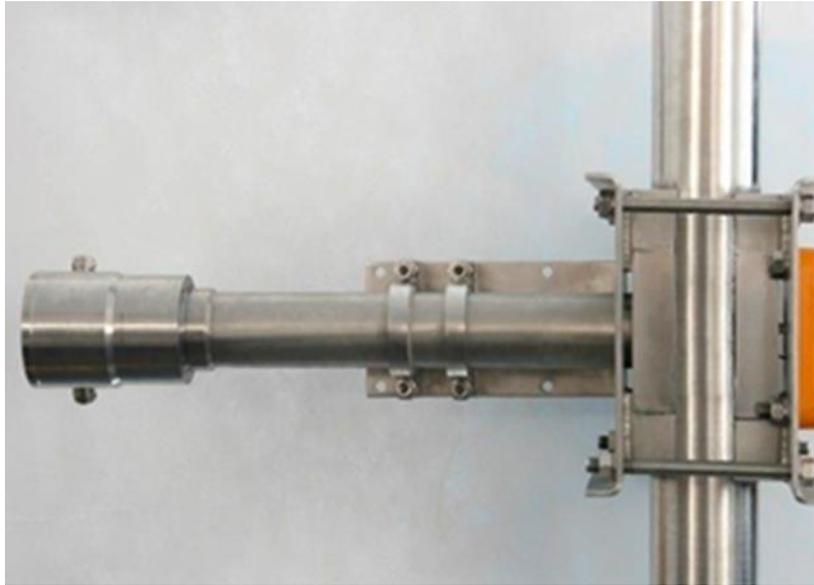


Figura 12 - Equipamento instalado em tubulação. Fonte: O autor e [64]

#### **4.5 Proposta referente ao Uso de Tecnologia para o Monitoramento do NORM**

Por fim para estudo da viabilidade da metodologia, a implementação ocorre no ato da construção naval das unidades marítimas. A utilização do equipamento SuperSense, como a principal técnica, está atrelado a sua eficiência e disponibilidade no mercado.

O benefício é que a medição pode ser em grandes recipientes ou tubos com paredes grossas. Este detector possui um grande colimador na qual blinda radiações externas, medindo somente a radiação emitida pelo NORM do local. Na Figura 7, um diagrama esquemático da utilização do equipamento SuperSense em uma unidade marítima.



Figura 13 – Diagrama esquemático de monitoramento. Fonte: O Autor e [64]

#### 4.6 Redução do risco de contaminação NORM

A redução dos riscos associados ao NORM em operações offshore exige uma abordagem integrada que equilibre as necessidades de proteção do meio ambiente, preservação do patrimônio operacional e a saúde e segurança dos trabalhadores. Estudos apontam os principais riscos da radiação ionizante, incluindo irradiação e contaminação interna ou externa, destacando a importância de medidas eficazes de controle. A Figura 14 ilustra a interação da radiação ionizante com o corpo humano, reforçando a relevância de práticas preventivas e de mitigação [31, 65].

- Irradiação.
- Contaminação interna ou externa.

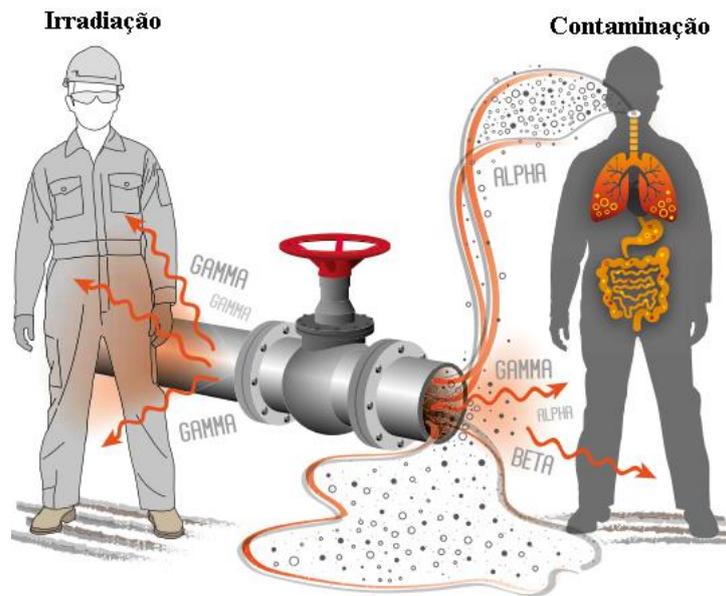


Figura 14 - Representação da interação da radiação ionizante com o corpo humano. Fonte: [42]

A redução eficaz da contaminação por NORM em operações offshore requer um esforço coordenado entre reguladores, operadores e trabalhadores. A adesão às regulamentações, o uso de tecnologias avançadas e a implementação de práticas operacionais seguras são cruciais para minimizar os riscos associados ao NORM e proteger o meio ambiente e a saúde dos trabalhadores. As medidas podem ser <sup>[31,65]</sup>.

- Mapeamento de NORM: Realizar levantamentos geológicos e avaliações radiológicas para identificar áreas e equipamentos que podem estar contaminados.
- Monitoramento Contínuo: Implementar programas de monitoramento regular para medir os níveis de radiação em instalações offshore.
- Tecnologias de Mitigação.
- Equipamentos de Filtragem: Utilização de filtros específicos para remover NORM da água produzida e de outros efluentes.
- Sistemas de Contenção: Emprego de sistemas de contenção para impedir a disseminação de NORM durante as operações de extração e processamento.
- Segregação de Resíduos: Separar resíduos contaminados por NORM de outros resíduos para facilitar o tratamento e descarte seguro.
- Tratamento de Resíduos: Utilização de tecnologias de tratamento, como processos químicos e físicos, para reduzir a radioatividade dos resíduos antes do descarte.
- Manutenção de Equipamentos: Realizar manutenção regular de equipamentos para evitar o acúmulo de NORM.

- Procedimentos de Trabalho Seguros: Implementar procedimentos operacionais que minimizem a exposição dos trabalhadores ao NORM, incluindo o uso de Equipamentos de Proteção Individual - EPIs.
- Treinamentos e Programa de Conscientização.

#### **4.7 Redução dos Impactos Ambientais**

A proteção ambiental nas operações que geram NORM exige avaliações detalhadas e bem planejadas antes do início de qualquer projeto. A identificação precoce de riscos ambientais e a adoção de estratégias de gestão e mitigação são essenciais para minimizar os impactos e proteger a biodiversidade [31,64-71].

O monitoramento contínuo dos níveis de NORM em áreas de produção, transporte e descarte de resíduos radioativos é uma prática indispensável para evitar a contaminação do solo, da água e da biota local. Além disso, ações de remediação ambiental devem ser implementadas em áreas já contaminadas, com o objetivo de restaurar a qualidade do ambiente e proteger ecossistemas vulneráveis [31,65-71].

Essas medidas incluem a utilização de tecnologias avançadas de monitoramento e remediação, como [31,65-71].

- Métodos de bioremediação, que utilizam microrganismos para reduzir a radioatividade em ambientes contaminados;
- Técnicas de contenção geológica, como barreiras físicas para evitar a dispersão de radionuclídeos;
- Tratamentos químicos para a neutralização de resíduos radioativos, adaptados às características geológicas e climáticas da área afetada.

A adoção de práticas sustentáveis, alinhadas às diretrizes ambientais internacionais e às regulamentações locais, é indispensável para garantir a compatibilidade entre as operações industriais e a conservação ambiental. Assim, o compromisso com a proteção ambiental não apenas contribui para a preservação da biodiversidade, mas também reforça a sustentabilidade das atividades relacionadas ao NORM [31,65-71].

## 4.8 Apresentação do Protótipo

Protótipo instalado em um tanque de unidade marítima.

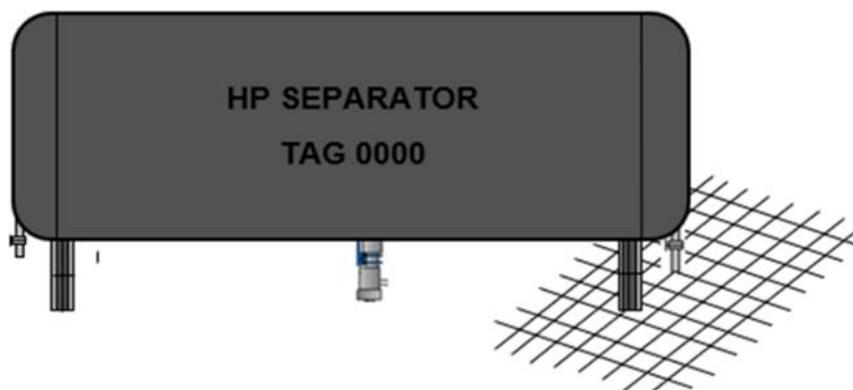


Figura 15 - Simulação do Equipamento instalado em Vaso. Fonte: O autor

O experimento realizado aconteceu no laboratório funcional de uma instalação radiativa privada. Durante o período de teste, obtivemos diversas respostas, incluindo a sensibilidade de leitura da radiação de fundo (Background).

O resultado apresentou níveis de radiação ionizante provenientes das amostras. O referencial a ser utilizado é de  $0,50 \mu\text{Sv}$  para que possamos garantir o limite atribuído ao indivíduo do público, assim como para o IOE, ademais também foram considerados:

- Leituras para classificação de área.
- Dose acumulada em (mSv) para o dia, semana, mês e ano.

O procedimento adotado possui as seguintes etapas e avaliações:

- Realizar a tomada de valor do Background. O background corresponde a radiação de fundo característica a cada ponto do ambiente.
- A durabilidade do teste foi de aproximadamente 24 (vinte e quatro) horas.
- Após, são realizadas 10 (dez) medições de Contagens por segundo - CPS e  $\mu\text{Sv/h}$ .
- Após a tomada das 10 (dez) medições, é calculada a média aritmética destas medições e, este será o valor apresentado, através da conversão.
- As leituras em CPS e  $\mu\text{Sv/h}$  obtidas em tempo real serão fixadas em planilha para automática conversão.

## CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise de Dados e Classificação de Áreas

Este item apresenta a análise dos dados obtidos a partir de medições realizadas em dois cenários distintos, classificados conforme os limites estabelecidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Os resultados foram organizados em quadros e ilustrados por meio de figuras, permitindo uma avaliação detalhada das condições de exposição radiológica e da classificação de áreas.

#### Cenário 1 – Contaminado

A tabela 6 apresenta as leituras obtidas no primeiro cenário, identificado como contaminado. Este cenário reflete as condições de maior concentração de radiação devido à presença de incrustações e resíduos contendo NORM.

Tabela 6 - Leituras obtidas no primeiro cenário.

LOCAL INSTALADO	CPS	SUPERFÍCIE	CLASSIFICAÇÃO DE ÁREA	DOSE ACUMULADA (mSv)			
		$\mu\text{Sv/h}$		DIA	SEMANA	MÊS	ANO
HP SEPARATOR TAG 0000	72.01	0,94	Supervisionada	0,0074	0,0372	0,2232	1,860
	74.59	1,56	Supervisionada	0,0124	0,0620	0,3720	3,100
	79.98	2,97	Controlada	0,0237	0,1184	0,7104	5,920
	82.46	3,05	Controlada	0,0243	0,1216	0,7296	6,080
	90.56	2,53	Controlada	0,0202	0,1008	0,6048	5,040
	90.78	3,01	Controlada	0,0240	0,1200	0,7200	6,000
	84.31	1,78	Supervisionada	0,0142	0,0708	0,4248	3,540
	77.25	2,98	Controlada	0,0238	0,1188	0,7128	5,940
	80.03	2,95	Controlada	0,0235	0,1176	0,7056	5,880
	75.18	2,66	Controlada	0,0212	0,1060	0,6360	5,300

Fonte: O autor

A Figura 13 ilustra a incrustação identificada no interior do equipamento "HP Separator". Essas incrustações podem acumular NORM, sendo uma fonte potencial de exposição.

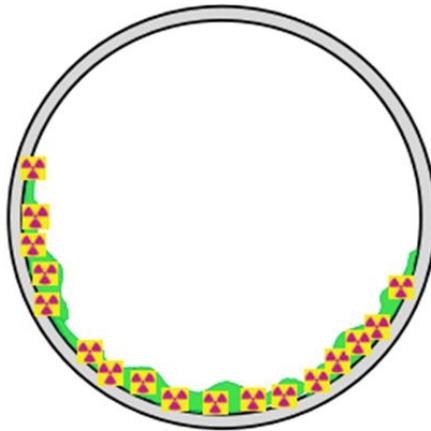


Figura 16 - Incrustação interna. Fonte: O autor

Com base nos limites de taxa de exposição definidos pela CNEN, as Figuras 14, 15 e 16 sugerem ações de controle e classificação das áreas analisadas. Essas medidas são fundamentais para a adequação das condições operacionais aos padrões de proteção radiológica.

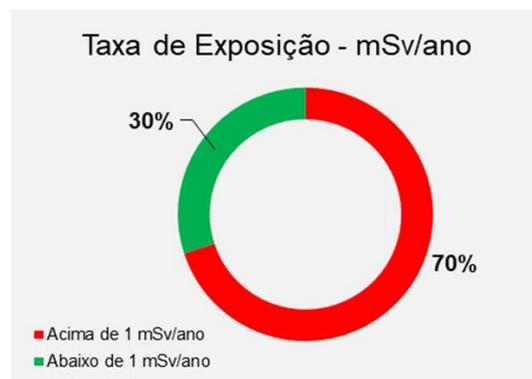


Figura 17 - Controle da taxa de exposição. Fonte: O autor



Figura 18 - Controle de CPS. Fonte: O autor



Figura 19 - Controle da classificação de área. Fonte: O autor

### Cenário 2 – Não contaminado

O segundo cenário avaliado refere-se a condições não contaminadas, onde as leituras de radiação permanecem dentro dos limites estabelecidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Este cenário foi utilizado como referência para comparar os níveis de exposição radiológica com áreas contaminadas, destacando a eficácia das práticas de controle e mitigação em operações offshore.

Os dados obtidos foram organizados na Tabela 7, enquanto as Figuras 17, 18 e 19 ilustram medidas de controle propostas para manter os níveis de radiação dentro dos limites regulamentares.

Tabela 7 - Leituras obtidas no segundo cenário

LOCAL INSTALADO	CPS	SUPERFÍCIE	CLASSIFICAÇÃO DE ÁREA	DOSE ACUMULADA (mSv)			
		μSv/h		DIA	SEMANA	MÊS	ANO
HP SEPARATOR TAG 0000	30.23	0,46	Livre	0,0036	0,0180	0,1080	0,900
	45.13	0,50	Livre	0,0039	0,0196	0,1176	0,980
	50.48	0,39	Livre	0,0030	0,0152	0,0912	0,760
	62.08	0,49	Livre	0,0038	0,0192	0,1152	0,960
	33.60	0,34	Livre	0,0026	0,0132	0,0792	0,660
	40.01	0,29	Livre	0,0022	0,0112	0,0672	0,560
	69.08	0,44	Livre	0,0034	0,0172	0,1032	0,860
	43.72	0,37	Livre	0,0029	0,0144	0,0864	0,720
	39.67	0,39	Livre	0,0030	0,0152	0,0912	0,760
41.95	0,50	Livre	0,0039	0,0196	0,1176	0,980	

Fonte: O autor

Considerando os limites apresentados pela CNEN para Taxa de Exposição e Classificação de área, mediante aos valores encontrados, as imagens abaixo sugerem:



Figura 20 - Controle da taxa de exposição. Fonte: O autor

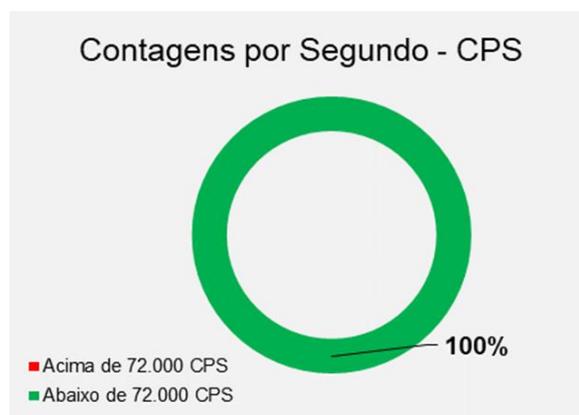


Figura 21 - Controle de CPS. Fonte: O autor



Figura 22 - Controle da classificação de área. Fonte: O autor

## CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO

### Conclusões

A presente pesquisa explorou o monitoramento de radiação ionizante proveniente de Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (NORM) na indústria de óleo e gás, com foco no desenvolvimento e na aplicação de tecnologias inovadoras. O estudo destacou a relevância do controle preditivo na gestão de riscos radiológicos, evidenciando como a implementação de soluções avançadas pode contribuir para a segurança ocupacional e ambiental.

Embora a gestão de resíduos de NORM ainda enfrente desafios globais, conforme apontado pela IAEA em 2013 <sup>[71]</sup>, a pesquisa mostrou que a reciclagem e a utilização de subprodutos estão sendo cada vez mais aceitas, representando uma oportunidade para minimizar os impactos ambientais. A aplicação da tecnologia proposta neste trabalho reforça o potencial de integrar práticas sustentáveis com operações industriais seguras, garantindo a viabilidade técnica e econômica em unidades marítimas de exploração offshore.

Os resultados indicam que o investimento inicial em sistemas de monitoramento baseados na tecnologia SuperSense é compensado ao longo da vida útil das unidades, devido à redução de riscos e à eficiência operacional. Além disso, o estudo abre caminho para a realização de testes em campo, possibilitando validar a eficácia do método em diferentes instalações do setor de óleo e gás.

Conclui-se que fomentar uma cultura que valorize a responsabilidade ambiental e a saúde ocupacional é essencial para alinhar as operações industriais aos princípios de sustentabilidade. Este trabalho contribui significativamente para o avanço do conhecimento na área, ao propor soluções práticas e eficazes para o monitoramento de NORM, e reforça a necessidade de continuidade em pesquisas e colaborações entre academia e indústria.

### Sugestão para Trabalhos Futuros

Este estudo abre caminhos para possibilidades de pesquisas futuras no contexto do monitoramento e gerenciamento de NORM. Entre os aspectos que podem ser aprofundados, destacam-se:

- **Testes de Campo:** Implementação da tecnologia desenvolvida em ambientes reais e diversos segmentos industriais, com foco na validação e ajuste de parâmetros operacionais.

- **Expansão para Outros Setores:** Aplicação da metodologia proposta em indústrias além do setor de petróleo e gás, como mineração, energia nuclear e agricultura.
- **Desenvolvimento Tecnológico:** Aperfeiçoamento do protótipo SuperSense, incluindo maior integração com sistemas de automação industrial e aumento da precisão em ambientes com altos níveis de interferência.
- **Avanços Regulatórios:** Colaboração com órgãos reguladores para aprimorar as diretrizes relacionadas à gestão de NORM, incluindo a padronização de métodos de monitoramento e descarte.
- **Sustentabilidade e Educação:** Estímulo à adoção de práticas que reforcem a cultura de responsabilidade ambiental e saúde ocupacional, bem como o desenvolvimento de programas educativos para conscientizar trabalhadores e gestores.

Essas direções destacam a continuidade do trabalho, contribuindo não apenas para a evolução tecnológica, mas também para a ampliação do impacto social, ambiental e econômico da pesquisa.

## Referências

- [1] TISSOT, B. P.; WELTE, D. H. **Petroleum formation and occurrence**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1984. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-87813-8>. Acessado em: maio 2024.
- [2] PETERS, K. E. et. al. **The petroleum system - from source to trap**. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, p. 93-120, 1994.
- [3] YERGIN, D. **O petróleo: uma história mundial de conquistas, poder e dinheiro**. Rio de Janeiro: Editora Paz e Terra, 2010. 1080 p. ISBN 8577531295.
- [4] SPEIGHT, J. G. **The chemistry and technology of petroleum**. 5. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. 984 p. ISBN 9780429118494.
- [5] HUNT, J. M. **Petroleum Geochemistry and Geology**. 2. ed. New York: W.H. Freeman and Company, 1995. Disponível em: [https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference\\_id/8737015](https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/8737015). Acessado em: maio 2024
- [6] MILANI, Edison José; ZALÁN, Pedro V. **Bacias Sedimentares Brasileiras: Cartas Estratigráficas**. Rio de Janeiro: Petrobras, 1999. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/261949152\\_Bacias\\_Sedimentares\\_Brasileiras\\_-\\_Cartas\\_Estratigraficas](https://www.researchgate.net/publication/261949152_Bacias_Sedimentares_Brasileiras_-_Cartas_Estratigraficas). Acessado em: maio 2024.
- [7] ZIELINSKI, R. A.; OTTON, J. K. **Naturally occurring radioactive materials (NORM) in produced water and oil-field equipment - An issue for the energy industry**. U.S. Geological Survey, 1999. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/fs/fs-0142-99/fs-0142-99.pdf>. Acessado em: novembro 2024.
- [8] GAZINEU, M. H. P. et al. **Radioactivity concentration in liquid and solid phases of scale and sludge generated in the petroleum industry**. Journal of Environmental Radioactivity, Amsterdam, v. 81, n. 1, p. 47-54, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.12.002>. Acessado em: novembro 2024.
- [9] INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - IPEN. **Aspects of NORM in the oil and gas industry**. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2003. Disponível em: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1171\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1171_web.pdf). Acessado em: novembro 2024.

[10] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN. **Diretrizes básicas de proteção radiológica.** Norma CNEN-NN-3.01. Rio de Janeiro: CNEN, 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/acesso-rapido/normas/grupo-3/grupo3-nrm301.pdf>. Acessado em: novembro 2024.

[11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA. **Radiation protection and NORM residue management in the oil and gas industry.** Safety Reports Series No. 34. Vienna: IAEA, 2003. Disponível em: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1171\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1171_web.pdf). Acessado em: novembro 2024.

[12] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION - ICRP. **Radiological protection against radon exposure.** ICRP Publication 126. Ottawa: ICRP, 2014. Disponível em: <https://www.icrp.org/page.asp?id=150>. Acessado em: novembro 2024.

[13] AMARAL, E. C. S.; FERNANDES, H. M.; PRIMO, R. G. **Management of NORM residues in Brazil: A review.** *Journal of Environmental Radioactivity*, Amsterdam, v. 77, n. 3, p. 325-336, 2004. Disponível em: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1712\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1712_web.pdf). Acessado em: novembro 2024.

[14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA. **Radiation, People and the Environment.** Vienna. 2004. Disponível em: <https://www.iaea.org/sites/default/files/radiation0204.pdf>. Acessado em: novembro 2024.

[15] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. **Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes.** New York: United Nations, 2000. Disponível em: [https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR\\_2000\\_Report.pdf](https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report.pdf). Acessado em: novembro 2024.

[16] UNSCEAR. **Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2000 report to the General Assembly, with scientific annexes.** New York: United Nations, 2000. Disponível em:

[https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR\\_2000\\_Report\\_Vol.I.pdf](https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf).

Acessado em: novembro 2024.

[17] BECKER, J. S. **Inorganic Mass Spectrometry: Principles and Applications**. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 520 p. ISBN 0470012005.

[18] KRANE, K. S. **Introductory Nuclear Physics**. New York: John Wiley & Sons, 1988. 864 p. ISBN 047180553X.

[19] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION - ICRP. **The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. ICRP Publication 103. Oxford: Pergamon Press, 2007. Disponível em: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>. Acessado em: novembro 2024.

[20] KATHREN, R. L. **NORM sources and their origins**. Applied Radiation and Isotopes, v. 49, n.3, pp. 149-168, 1998. DOI 10.1016/S0969-8043(97)00237-6 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804397002376>. Acessado em: novembro 2024.

[21] LI J, LIU Z, CHEN Z, GAO Y, HAO Y AND GU H. **The role of gas emissions (He, Rn, and CO<sub>2</sub>) from fault zones in understanding fault and seismic activity**. Front. Earth Sci. 12:1488690, 2024. DOI 10.3389/feart.2024.1488690. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/385424575\\_The\\_role\\_of\\_gas\\_emissions\\_He\\_Rn\\_and\\_CO<sub>2</sub>\\_from\\_fault\\_zones\\_in\\_understanding\\_fault\\_and\\_seismic\\_activity](https://www.researchgate.net/publication/385424575_The_role_of_gas_emissions_He_Rn_and_CO2_from_fault_zones_in_understanding_fault_and_seismic_activity). Acessado em: novembro 2024.

[22] ICRP. **The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. ICRP Publication 103. Oxford: Pergamon Press, 2009. Disponível em: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>. Acessado em: novembro 2024.

[23] BEIR VII. **Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation**. Washington, DC: National Academies Press, 2006.

[24] EISENBUD, M.; GESELL, T. **Environmental radioactivity: from natural, industrial, and military sources**. 4. ed. San Diego: Academic Press, 1997. 688 p. ISBN 0122351541.

- [25] LIMA, R. A. **Avaliação da Dose na População da Região Urano-Fosfática do Nordeste que utiliza os Recursos Hídricos da Região**. IPEN- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. 1996. 187p. Tese D.Sc., Doutorado em Ciências. (SP), São Paulo. 1996. Disponível em: <https://repositorio.ipen.br/entities/publication/766e76c9-de32-4413-ad58-7949b452466b>. Acessado em: novembro 2024.
- [26] FOGAÇA, J. R. V. **Radioatividade artificial**. 2019. Disponível em: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/química/radioatividade-artificial.htm>. Acessado em: maio 2023.
- [27] VALERY, N.; JACQUES, V. **The discovery of the neutron and its consequences (1930–1940)**. Comptes Rendus. Physique, v. 18, n. 10, p. 592-600, 2017 DOI: 10.1016/j.crhy.2017.11.001. Disponível em: <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/physique/articles/10.1016/j.crhy.2017.11.001/>. Acessado em: novembro 2024.
- [28] CARL, D. A., **The Apparent Existence of Easily Deflectable Positives**. Science, v. 76, n. 1967, p.238-239, 1932. DOI:10.1126/science.76.1967.238. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.76.1967.238>. Acessado em: novembro 2024.
- [29] JOLIOT, F., CURIE, I. **Artificial Production of a New Kind of Radio-Element**. Nature v. 133, p. 201–202, 1934. DOI: <https://doi.org/10.1038/133201a0>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/133201a0>. Acessado em: novembro 2024.
- [30] MAHESH, M. **The Essential Physics of Medical Imaging**, Third Edition. Med. Phys., v. 40 n. 7, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1118/1.4811156>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28524933/>. Acessado em: novembro 2024.
- [31] CHRISTOVAM, A. C. M., MACHADO, O. **Manual de física e proteção radiológica**. Difusão Editora; 1. ed. 232 p. 2013. ISBN: 978-8578081324.
- [32] IBP, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. **Diretrizes para Gerenciamento de Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (NORM)**. Caderno de Boas Práticas de E&P, Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2021/06/cadernoboaspraticasep-versaodigital-v2.pdf>. Acessado em: agosto 2023.

- [33] DE-PAULA-COSTA, G.T., GUERRANTE, I.C., COSTA-DE-MOURA, J. et al. **Geochemical Signature of NORM Waste in Brazilian Oil and Gas Industry**, Journal of Environmental Radioactivity, v. 189, pp. 202-206, 2018. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.04.014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X17309566>. Acessado em: agosto 2023.
- [34] INTERNATIONAL AGENCY ATOMIC ENERGY - IAEA. **Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry**, Training Course Series n. 40, 2010. Disponível em: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-40\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-40_web.pdf). Acessado em: novembro 2024.
- [35] ALI, M.M.M., ZHAO, H., LI, Z. et al. **Concentrations of TENORMs in the Petroleum Industry and Their Environmental and Health Effects**, Royal Society of Chemistry Advances, v. 9, n. 67, 2019. DOI 10.1039/c9ra06086c. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9076086/>. Acessado em: novembro 2024.
- [36] LABORATORIE NATIONAL HENRI BECQUEREL - LNHB. **“Atomic and Nuclear Data”**. Disponível em: <http://www.lnhb.fr/home/nuclear-data/>. Acessado em: fevereiro 2023.
- [37] DOYI, I., ESSUMANG, D.K., DAMPARE, S. et al. **“Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials (TENORM) in the Oil and Gas Industry: A Review”**, Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, v. 238, p. 107-119, 2015. DOI: 10.1007/398\_2015\_5005. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/317231100\\_Technologically\\_Enhanced\\_Naturally\\_Occurring\\_Radioactive\\_Materials\\_TENORM\\_in\\_the\\_Oil\\_and\\_Gas\\_Industry\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/317231100_Technologically_Enhanced_Naturally_Occurring_Radioactive_Materials_TENORM_in_the_Oil_and_Gas_Industry_A_Review). Acessado em: fevereiro 2023.
- [38] HARTO, C. B. et al. **Radiological dose and risk assessment of landfill disposal of technologically enhanced naturally occurring radioactive materials (tenorm) in North Dakota**. Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States), 2014. Disponível em: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2014/11/110063.pdf>. Acessado em: fevereiro 2023.
- [39] TESTA, C., DESIDERI, D., MELI, M.A., et al. **Radiation Protection and radioactive Scales in Oil and Gas Production**, Health Physics, v. 67, n. 1, pp. 34-38,

1994. DOI: 10.1097/00004032-199407000-00004. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8200799/>. Acessado em: fevereiro 2023.

[40] AUSTRALIAN PETROLEUM PRODUCTION & EXPLORATION ASSOCIATION - APPEA. **Guidelines for Naturally Occurring Radioactive Materials**, 2002. Disponível em: [https://covacontro.org/wp-content/uploads/2016/10/en\\_norm\\_APPEA-GUIDELINES-FOR-NORM-australia-2.pdf](https://covacontro.org/wp-content/uploads/2016/10/en_norm_APPEA-GUIDELINES-FOR-NORM-australia-2.pdf). Acessado em: novembro 2024.

[41] BETTS, S.H., WRIGHT, N.H. **NORM Management and Disposal – Options, Risks, Issues and Decision Making**, Society of Petroleum Engineers - SPE 8661, 2004. DOI: [doi.org/10.2118/86661-MS](https://doi.org/10.2118/86661-MS). Disponível em: <https://onepetro.org/SPEHSE/proceedings/04HSE/04HSE/SPE-86661-MS/72025>. Acessado em: novembro 2024.

[42] INTERNATIONAL ASSOCIATION OF OIL & GAS PRODUCERS - IOGP. **Managing Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in the oil and gas industry**. Report 412, 2016.

[43] WILSON, A.J., SCOTT, L.M. **Characterization of Radioactive Petroleum Piping Scale with an Evaluation of Subsequent Land Contamination**, Health Physics, v. 63, n. 6, p. 681-685, 1992. DOI: 10.1097/00004032-199212000-00009. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1428889/>. Acessado em: abril 2024.

[44] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA. **Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil & Gas Industry**. Safety Reports Series n. 34. Vienna, Austria, 2003. Disponível em: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1171\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1171_web.pdf). Acessado em: junho 2023.

[45] NÍCOLI, IÊDA GOMES et. al. **Ocorrência de radônio-222 nas águas subterrâneas do distrito federal—dados preliminares**. Águas Subterrâneas, 2004. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23564>. Acessado em: novembro 2024.

[46] ARGONNE NATIONAL LABORATORY - ANL. **An Overview of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in the Petroleum Industry**, ANL/EAIS-7, 1992. Disponível em: <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph241/logan2/docs/smith.pdf>. Acessado em: novembro 2024.

- [47] SIANIPAR, M. et al. **The Application of Biosurfactant Produced by Azotobacter sp. for Oil Recovery and Reducing the Hydrocarbon Loading in Bioremediation Process.** International Journal of Environmental Science and Development, v. 7, n. 7, 2016. DOI: 10.18178/ijesd.2016.7.7.827. Disponível em: <https://www.ijesd.org/vol7/827-Q0054.pdf>. Acessado em: novembro 2024.
- [48] LANDSBERGER, S. et al. **Analysis of Naturally Occurring Radioactive Material Using Neutron Activation Analysis and Passive Compton Suppression Gamma-Ray Spectrometry.** Nukleonika, v. 57, n. 4, p. 461-465, 2012. Disponível em: [file:///C:/Users/admin/Desktop/Analysis\\_of\\_naturally\\_occurring\\_rad.pdf](file:///C:/Users/admin/Desktop/Analysis_of_naturally_occurring_rad.pdf). Acessado em: novembro 2024.
- [49] BASSIGNANI, A., DI LUISE, G., FENZI, A. **Radioactive Scales in Oil and Gas Production Centers,** Society of Petroleum Engineers - SPE 23380, 1991. DOI: 10.2118/23380-MS. Disponível em: <https://onepetro.org/SPEHSE/proceedings/91HSE/91HSE/SPE-23380-MS/53361>. Acessado em: novembro 2024.
- [50] VARSKOG, P., AAMLID, H. **Assessment, Treatment and Management of NORM in the Norwegian Oil and Gas Industry,** Proceedings of the 9th EAN ALARA Workshop, 18 - 21 de outubro de 2005, Alemanha. Disponível em: [https://www.eu-alara.net/images/stories/pdf/DosAugsburg/Final\\_doc/Session\\_3/S3\\_05\\_Varskog.pdf](https://www.eu-alara.net/images/stories/pdf/DosAugsburg/Final_doc/Session_3/S3_05_Varskog.pdf). Acessado em: novembro 2024.
- [51] ABDEL-SABOUR, M.F. **NORM in waste derived from oil and gas production.** In: Conference: Middle East Waste Management Summit, Egypt, December 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/286620239\\_NORM\\_in\\_Waste\\_Derived\\_From\\_Oil\\_and\\_Gas\\_Production](https://www.researchgate.net/publication/286620239_NORM_in_Waste_Derived_From_Oil_and_Gas_Production). Acessado em: novembro 2024.
- [52] ATTALLAH, M.F. et. al. **Comparative Study on the Radioactivity of TE-NORM in Different Components of Oil Separator Tanks.** Radiochimica Acta, v. 101, pp. 57-65, 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/233850467\\_Comparative\\_study\\_on\\_the\\_radioactivity\\_of\\_TE-NORM\\_in\\_different\\_components\\_of\\_oil\\_separator\\_tanks](https://www.researchgate.net/publication/233850467_Comparative_study_on_the_radioactivity_of_TE-NORM_in_different_components_of_oil_separator_tanks). Acessado em: novembro 2024.

[53] GODOY, J.M., CRUZ, R.P. **226Ra e 228Ra in Scale and Sludge Samples and their Correlation with the Chemical Composition.** Journal of Environmental Radioactivity, v. 70, n. 3, p. 199-206, 2003. DOI: 10.1016/S0265-931X(03)00104-8. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/10580442\\_Ra-226\\_and\\_Ra-228\\_in\\_scale\\_and\\_sludge\\_samples\\_and\\_their\\_correlation\\_with\\_the\\_chemical\\_composition](https://www.researchgate.net/publication/10580442_Ra-226_and_Ra-228_in_scale_and_sludge_samples_and_their_correlation_with_the_chemical_composition). Acessado em: novembro 2024.

[54] GAZINEU, M.H.P. **Teores de Radionuclídeos em Processos de Extração e de Produção de Petróleo no Nordeste do Brasil.** UFPE. 2005. 164 f. Tese de D.Sc, Curso de Tecnologias Energéticas Nucleares. (PE), Recife. 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/9644>. Acessado em: novembro 2024.

[55] GARNER, J., CAIRNS, J., READ, D. **NORM in the East Midlands Oil and Gas Producing Region of the UK,** Journal of Environmental Radioactivity, v. 150, p. 49-56, 2015. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2015.07.016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X15300588#:~:text=NORM%20has%20now%20been%20discovered,and%20thorium%20series%20decay%20chains>. Acessado em: novembro 2024.

[56] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Diffuse NORM: Waste Characterization and Preliminary Risk Assessment,** 1991. Disponível em: <https://nepis.epa.gov>. Acessado em: dezembro 2021.

[57] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Assessment of Potential Technical and Regulatory Issues Relating to Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Class II Wells,** 1995. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/cadmus-normreport.pdf>. Acessado em: dezembro 2021.

[58] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Management of Exploration, Development and Production Wastes: Factors Informing a Decision on the Need for Regulatory Action,** 2019. Disponível em: <https://www.epa.gov/hw/management-oil-and-gas-exploration-development-and-production-wastes-factors-informing-decision>. Acessado em: novembro 2024.

[59] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **TENORM: Oil and Gas Production Wastes.** Disponível em:

<https://www.epa.gov/radiation/tenorm-oil-and-gas-production-wastes>. Acessado em: novembro 2021.

[60] KOPPEL, D.J. et al. **Current Understanding and Research Needs for Ecological Risk Assessments of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Subsea Oil and Gas Pipelines**, Journal of Environmental Radioactivity, v. 241, 2022. DOI 10.1016/j.jenvrad.2021.106774. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X21002460>. Acessado em: novembro 2024.

[61] CNEN. **Serviços de Radioproteção Norma CNEN-NE-3.02**. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/grupo3nrm302.pdf>. Acessado em: janeiro 2024.

[62] Petrobras-Brasil. (19 de janeiro de 2017). **Tipos de plataformas utilizadas na indústria do Petróleo**. Fonte: Petrobras. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/infograficos/tiposde-plataformas/desktop/index.html>. Acessado em novembro 2024.

[63] LINCE INSTRUMENTOS E RADIOPROTEÇÃO. Equipamentos de medição radio nuclear 2023. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira, 2023. Disponível em: <https://lincebrasil.com/>. Acessado em: maio 2023.

[64] XAVIER, A. M., MORO, J. T. HEILBRON, T. F. **Princípios básicos de segurança e proteção radiológica. UFRS. Comissão Nacional de Energia Nuclear**. 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/centro-de-informacoes-nucleares/material-didatico-1/principios-basicos-de-seguranca-e-protecao-radiologica-terceira-edicao-revisada.pdf>. Acessado em: maio 2024.

[65] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN. **Seleção e Escolha de Locais para Depósitos de Rejeitos Radioativos**, Norma CNEN NE 6.06, 1990. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-6/grupo6-nrm606.pdf>. Acessado em: novembro 2021.

[66] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN. **Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação**, Norma CNEN NN 6.09, 2002. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-6/grupo6-nrm609.pdf>. Acessado em: novembro 2021.

- [67] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN. **Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação**, Norma CNEN NN 8.01, 2014b. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/acessorapido/normas/grupo-8/grupo8-nrm801.pdf>. Acessado em: novembro 2021.
- [68] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN. **Licenciamento de Depósitos de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação**, Norma CNEN NN 8.02, 2014c. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/acessorapido/normas/grupo-8/grupo8-nrm802.pdf>. Acessado em: novembro 2021.
- [69] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN. **Glossário do Setor Nuclear e Radiológico Brasileiro**, 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/acesso-rapido/normas/glossario/glossario-do-setornuclear-e-radiologico-rasileiro.pdf>. Acessado em: novembro 2021.
- [70] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN. **Resolução n. 288, de 20 de dezembro de 2021b**. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/ptbr/acesso-rapido/normas/grupo-8/grupo8-resolucao288.pdf>. Acessado em: fevereiro 2022.
- [71] INTERNATIONAL AGENCY ATOMIC ENERGY - IAEA. **Management of NORM Residues**, IAEA-TECDOC-1712, 2013.