

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA - CAMPUS MONTE CARMELO
CURSO DE GEOLOGIA

TATIANA MAYUMI TAMURA

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE CENÁRIOS DE EXPOSIÇÃO DE
TRABALHADORES DURANTE PERFILAGEM DE POÇOS DE PETRÓLEO**

MONTE CARMELO - MG

2023

TATIANA MAYUMI TAMURA

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE CENÁRIOS DE EXPOSIÇÃO DE
TRABALHADORES DURANTE PERFILAGEM DE POÇOS DE PETRÓLEO**

Monografia final da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 (TCC2) apresentado ao curso de Geologia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de geóloga na Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Orientador: Prof. Dr. William de Souza Santos

MONTE CARMELO - MG

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

T159 2023	<p>Tamura, Tatiana Mayumi, 1984- MODELAGEM COMPUTACIONAL DE CENÁRIOS DE EXPOSIÇÃO DE TRABALHADORES DURANTE PERFILAGEM DE POÇOS DE PETRÓLEO [recurso eletrônico] / Tatiana Mayumi Tamura. - 2023.</p> <p>Orientador: William de Souza Santos. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Geologia. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Geologia. I. Santos, William de Souza ,1979-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Geologia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 551</p>
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE CENÁRIOS DE EXPOSIÇÃO DE
TRABALHADORES DURANTE PERFILAGEM DE POÇOS DE PETRÓLEO**

Monografia final da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 (TCC2) apresentado ao curso de Geologia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de geólogo na Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Orientador: Prof. Dr. William de Souza Santos

Monte Carmelo, 04 de agosto de 2023.

Prof. Dr. William de Souza Santos – Orientador
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Prof.^a Dra. Ana Paula Perini
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Prof. Dr. Felix Nannini
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Dedico este trabalho àqueles que decidiram embarcar em uma jornada de mudança e tiveram que me suportar e sustentar ao longo do caminho. Agradeço especialmente a Fernando Luiz de Paula Santil por sempre me manter ocupada neste curso. Também dedico esta conquista à minha família e amigos, que mesmo estando distantes geograficamente, permaneceram ao meu lado de forma inabalável.

AGRADECIMENTOS

Prezados,

É com grande satisfação e gratidão que expresso meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, sou imensamente grata ao meu orientador, Dr. William de Souza Santos, pelo seu suporte, orientação e dedicação ao longo de todo o processo de desenvolvimento deste trabalho. Sua experiência, conhecimento e disponibilidade foram fundamentais para a condução deste estudo.

Gostaria de agradecer também aos professores do Campus Monte Carmelo, especialmente aos do curso de Geologia, que compartilharam seus conhecimentos, por meio de suas aulas e feedbacks que ao longo desses anos contribuíram para a minha formação.

Agradeço à coordenação do curso, à equipe administrativa e técnicos, que sempre estive pronta a auxiliar e proporcionar um ambiente acadêmico propício ao aprendizado e à pesquisa.

Expresso minha gratidão a todos os profissionais da Universidade Federal de Uberlândia.

Em especial, agradeço aos professores Doutores Claudionor, Aracy e Tatiane, a Tia Lu da cantina e a técnica Sandra (PROEXC), que me apoiaram durante o curso em Monte Carmelo.

Ao meu pai acadêmico e companheiro Prof. Fernando Luiz de Paula Santil.

Não posso deixar de mencionar meus amigos e colegas de turma, que compartilharam comigo os desafios e momentos de estudo ao longo desses anos.

E aos amigos que se mantenha além da graduação: Bruno, Douglas, Elaine, Ian, Luiz e Patrícia. Seu suporte emocional e palavras de incentivo foram essenciais para que eu pudesse superar desafios e perseverar em momentos de dúvida.

A todos vocês, meu sincero agradecimento. A conclusão deste trabalho não seria possível sem o apoio, a colaboração e o incentivo de cada um de vocês.

Atenciosamente,

Tatiana Mayumi Tamura

MENSAGEM AOS AMIGOS

*“Até aqui viajamos juntos.
Passaram vilas e cidades, cachoeiras e rios, pastagens e matas,
nos quais não faltaram os obstáculos.
Frequentes foram as cercas, voçorocas e morros.
As subidas e descidas foram realidade sempre presente,
tanto em campo quanto curso.
Juntos, percorremos retas, nos apoiamos nas curvas e encontramos os pontos.
Chegou o momento de cada um seguir viagem sozinho.
Que as experiências compartilhadas no percurso até aqui sejam a alavanca para
alcançarmos a alegria de chegar ao destino projetado.
O meu agradecimento àqueles que, mesmo de fora,
quiseram bem e apoiaram nos bons e nos maus momentos.
Divido os méritos desta conquista, porque ela também pertence a vocês.”*

Adaptado de autor desconhecido

RESUMO

O uso de fonte de radiação ionizante na indústria de prospecção de petróleo apresenta um desafio na segurança radiológica dos trabalhadores. Durante os procedimentos de perfilagem de poços de petróleo, os trabalhadores ficam expostos à radiação emitida por fontes radioativas usadas para obter informações de tipo de rochas, espessuras das camadas dos reservatórios, porosidade, permeabilidade e outros. Dentre várias fontes de radiação ionizante, o $^{241}\text{Am-Be}$ é uma das mais utilizadas. O objetivo desta pesquisa foi desenvolver cenários computacionais de exposição envolvendo trabalhadores durante a perfilagem de poços de petróleo com sondas nucleares e determinar as doses radioativas que estes indivíduos ficam expostos. Foi calculado um conjunto de fatores de conversão para dose equivalente e efetiva para o operador de sonda e o motorista do veículo de transporte da sonda. As doses absorvidas nos órgãos e tecidos dos trabalhadores e a fluência de partículas em volta do poço de petróleo foram determinadas usando o código de transporte de radiação MCNPX2.7.0. Os indivíduos expostos foram representados por simuladores antropomórficos computacionais de referência da ICRP 110. Foram determinados mapas de fluência de partículas para caracterizar o campo de radiação, em volta do poço, gerado pela fonte $^{241}\text{Am-Be}$. Considerando um tempo de exposição de 10 minutos e uma atividade típica de 333 GBq obteve-se uma dose efetiva de 73 mSv para o operador, que é maior do que o limite de dose recomendado pela ICRP de 20 mSv por ano. Os mapas de fluência de partículas mostraram que os pontos mais críticos para os trabalhadores foram quando a fonte é operada na entrada do poço. Portanto, os resultados mostraram que o manuseio de fonte de nêutron deve seguir procedimentos operacionais, treinamento, manuseio, verificação regular de dispositivos e controle regulatório.

Palavras-chave: Sonda de perfilagem, prospecção de petróleo, dosimetria, método Monte Carlo, simuladores antropomórficos computacionais.

ABSTRACT

The use of ionizing radiation sources in the oil prospecting industry poses a challenge to workers' radiological safety. During oil well logging procedures, workers are exposed to radiation emitted by radioactive sources used to obtain information on rock types, reservoir layer thicknesses, porosity, permeability, and others. Among several sources of ionizing radiation, $^{241}\text{Am-Be}$ is one of the most used. The objective of this research was develop computational exposure scenarios involving workers during the logging of oil wells with nuclear probes and to determine the radioactive doses that these individuals are exposed to. A set of conversion factors for equivalent and effective dose was calculated for the tube operator and the driver of the vehicle transporting the tube. The absorbed doses in the workers' organs and tissues and the fluence of particles around the oil well were determined using the radiation transport code MCNPX2.7.0. The exposed individuals were represented by computational anthropomorphic phantoms of ICRP 110 reference. Particle fluence maps were determined to characterize the radiation field, around the well, generated by the $^{241}\text{Am-Be}$ source. Considering an exposure time of 10 minutes and a typical activity of 333 GBq, an effective dose of 73 mSv for the operator was obtained, which is higher than the dose limit recommended by the ICRP of 20 mSv per year. Particle fluence maps showed that the most critical points for the workers were when the source is operated at the well entrance. Therefore, the results showed that the neutron source handling must follow operational procedures, training, handling, regular verification of devices and regulatory control.

Keywords: Profiling probe, oil prospecting, dosimetry, Monte Carlo method, computational anthropomorphic simulators.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1- TIPOS DE PETRÓLEO E SUA PROFUNDIDADE	19
FIGURA 2.2 - A) OPERAÇÃO DE PERFILAGEM <i>ONSHORE</i> . EQUIPAMENTO DE RIGUP MONTADO E FERRAMENTAS DENTRO DO POÇO. B) ESQUEMA DE UMA OPERAÇÃO DE PERFILAGEM	22
FIGURA 2.3 - EXEMPLO DE CONJUNTO DE PERFIS, REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE DIFERENTES FERRAMENTAS, PARA A ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS ASSOCIADOS, OBTIDOS DURANTE A PERFILAGEM	22
FIGURA 2.4 - EXEMPLO ESQUEMÁTICO DE INTERVALOS DE MEDIÇÃO PARA DIFERENTES FERRAMENTAS DE PERFILAGEM	23
FIGURA 2.5 - MODELO DE FERRAMENTA DE PERFILAGEM NEUTRÔNICA.....	26
FIGURA 2.6 - AGÊNCIAS INTERNACIONAIS E NACIONAIS	37
FIGURA 3.1- SIMULADORES ANTROPOMÓRFICOS MASCULINO NA POSTURA DE PÉ E SENTADO (À ESQUERDA) E FEMININO NA POSTURA DE PÉ E SENTADA (À DIREITA).	43
FIGURA 3.2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA SONDA COM FONTE DE NÊUTRON	44
FIGURA 3.3 - ESQUEMA DE OPERAÇÃO DE PERFILAGEM: VISTA EXTERNA (A) E INTERNA (B) DA UNIDADE DE PERFILAGEM	45
FIGURA 4.1 - CONTRIBUIÇÃO DE NÊUTRONS E FÓTONS SOBRE AS DOSES DE RADIAÇÃO DO MOTORISTA DO VEÍCULO E DO OPERADOR DE SONDA PARA A SONDA POSICIONADA NA ENTRADA NO POÇO DE PETRÓLEO	52
FIGURA 4.2 - FLUÊNCIA DE PARTÍCULA NA SUPERFÍCIE DO SOLO COM A FONTE LOCALIZADA NA ENTRADA DO POÇO (0 CM DE PROFUNDIDADE).....	53
FIGURA 4.3 - FLUÊNCIA DE PARTÍCULA NA SUPERFÍCIE DO SOLO COM A FONTE LOCALIZADA NA A 20 CM DE PROFUNDIDADE NO POÇO DE PETRÓLEO	53
FIGURA 4.4 - FLUÊNCIA DE PARTÍCULA NA SUPERFÍCIE DO SOLO COM A FONTE LOCALIZADA NA A 40 CM DE PROFUNDIDADE NO POÇO DE PETRÓLEO	54
FIGURA 4.5 - FLUÊNCIA DE PARTÍCULA NA SUPERFÍCIE DO SOLO COM A FONTE LOCALIZADA NA A 60 CM DE PROFUNDIDADE NO POÇO DE PETRÓLEO	54
FIGURA 4.6 - FLUÊNCIA DE PARTÍCULA NA SUPERFÍCIE DO SOLO COM A FONTE LOCALIZADA NA A 80 CM DE PROFUNDIDADE NO POÇO DE PETRÓLEO	55
FIGURA 4.7 - FLUÊNCIA DE PARTÍCULA NA SUPERFÍCIE DO SOLO COM A FONTE LOCALIZADA NA A 100 CM DE PROFUNDIDADE NO POÇO DE PETRÓLEO	55

LISTA DE QUADRO

QUADRO 2.1- RESUMO DOS TIPOS DE DISPOSITIVO DE CABOS DE PERFILAGEM	24
QUADRO 2.2 – RADIOISÓTOPOS MAIS USADOS EM MEDIDORES NUCLEÔNICOS.....	27
QUADRO 2.3 APRESENTA FONTES USADAS EM SONDAS RADIOLÓGICAS.....	28
QUADRO 2.4 - CATEGORIZAÇÃO DAS FONTES E SUA PERICULOSIDADE	29
QUADRO 2.5 - GRUPOS DE SEGURANÇA BASEADOS NA CATEGORIZAÇÃO DAS FONTES.....	30
QUADRO 2.6 - FATOR DE PONDERAÇÃO PARA DIFERENTES TIPOS DE RADIAÇÃO IONIZANTE (ICRP 103, 2007).....	31
QUADRO 2.7 - VALORES DO FATOR DE PESO, W_T , PARA TECIDO OU ÓRGÃO DEFINIDO NA ICRP 103	32
QUADRO 2.8 - LIMITES DE DOSE INDIVIDUAL ESTABELECIDOS PELA NORMA CNEN NN-3.01 – MARÇO/2014	33
QUADRO 3.1 - CARACTERÍSTICAS DA MATRIZ DE VOXEL DOS SIMULADORES ANTROPOMÓRFICO MASCULINO E FEMININO DE REFERÊNCIA DA PUBLICAÇÃO ICRP 110 (ICRP, 2009).....	43
QUADRO 4.1- FCs PARA DOSE EQUIVALENTE NORMALIZADOS PELA ATIVIDADE INICIAL DA FONTE (EM mSv/GBq.s) PARA A PROFUNDIDADE DA FONTE NO POÇO DE PETRÓLEO (0 CM). ENTRE PARÊNTESES ESTÃO OS ERROS RELATIVOS PERCENTUAIS	48
QUADRO 4.2 - COEFICIENTES DE CONVERSÃO PARA DOSE EQUIVALENTE NORMALIZADOS PELA ATIVIDADE DA FONTE (EM mSv/GBq.s) EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DA FONTE NO POÇO DE PETRÓLEO. ENTRE PARÊNTESES ESTÃO OS ERROS RELATIVOS PERCENTUAIS.....	49
QUADRO 4.3 - COEFICIENTES DE CONVERSÃO PARA DOSE EQUIVALENTE NORMALIZADOS PELA ATIVIDADE DA FONTE (EM mSv/GBq.s) EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DA FONTE NO POÇO DE PETRÓLEO. ENTRE PARÊNTESES ESTÃO OS ERROS RELATIVOS PERCENTUAIS.....	50
QUADRO 4.4 - FCs PARA DOSE EFETIVA PARA EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DA FONTE NO POÇO DE PETRÓLEO. ENTRE PARÊNTESES ESTÃO OS ERROS RELATIVOS PERCENTUAIS.....	51
QUADRO 4.5 - DOSE EQUIVALENTE E EFETIVA PARA A FONTE LOCALIZADA NA ENTRADA DO POÇO DE PETRÓLEO (PROFUNDIDADE 0 CM). ENTRE PARÊNTESES ESTÃO OS ERROS RELATIVOS PERCENTUAIS.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AF	ADULT FEMALE
ALARA	AS LOW AS REASONABLY ACHIEVABLE
AM	ADULT MALE
ANP	AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
CNEN	COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
D_T	DOSE ABSORVIDA
DGNAA	DELAYED GAMMA NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS
D_M	ENERGIA MÉDIA DEPOSITADA EM UMA MASSA ELEMENTAR
E	DOSE EFETIVA
FC	FATORES DE CONVERSÃO
GLP	GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO
GY	GRAY
H_T	DOSE EQUIVALENTE
IAEA	AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA
ICRP	COMISSÃO INTERNACIONAL DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA
ICRU	COMISSÃO INTERNACIONAL DE UNIDADES E MEDIDAS DE RADIAÇÃO
IOE	INDIVÍDUO OCUPACIONALMENTE EXPOSTO
ISO	ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL PARA PADRONIZAÇÃO
MCTIC	MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
NCS	CONTROLE NUCLEÔNICO
PGNAA	PROMPT GAMMA NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS
RG	RAIOS GAMA
SI	SISTEMA INTERNACIONAL
SP	POTENCIAL ESPONTÂNEO
T	TECIDOS
W_R	FATOR DE PONDERAÇÃO DA RADIAÇÃO
W_T	FATOR DE PESO
$d\bar{\epsilon}$	ENERGIA MÉDIA DEPOSITADA

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	O PETRÓLEO E A PERFILAGEM DE POÇOS	18
2.1.1	Tipos de Perfis.....	23
2.1.2	Radioatividade na perfilagem de poços	24
2.2	PERFIL NEUTRÔNICO	25
2.2.1	Princípio da ferramenta neutrônica.....	25
2.2.2	Princípio de funcionamento	26
2.3	INSTRUMENTAÇÃO RADIOLÓGICAS	27
2.3.1	Fontes utilizadas em sondas radiológicas	27
2.3.2	Risco radiológico das instalações radiativas.....	28
2.3.3	Risco Físico das instalações radiativas.....	29
2.4	GRANDEZAS DOSIMÉTRICAS NA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA.....	30
2.4.1	Dose absorvida	30
2.4.2	Dose equivalente.....	31
2.4.3	Dose efetiva.....	32
2.4.4	Medidas técnicas essenciais para proteção contra radiação.....	32
2.4.5	Classificação de áreas	34
2.4.6	Fatores de Proteção Radiológica: distância, blindagem, tempo.....	35
2.5	LEI E NORMAS DE SEGURANÇA RADIOLÓGICA	36
2.5.1	Agências	36
2.5.2	Regulamentação no Brasil.....	37
2.5.3	Normas de proteção radiológica.....	38
2.5.4	Lacunas e contribuições do estudo	40
2.5.5	Modelagem computacional	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	DESENVOLVIMENTO DO MODELO COMPUTACIONAL DE EXPOSIÇÃO POR MEIO DO CÓDIGO MCNPX2.7.0	42
3.2	REPRESENTAÇÃO DOS INDIVÍDUOS EXPOSTOS	43
3.3	MODELAGEM DOS DETECTORES E DA FONTE DE NÊUTRON	44
3.4	MODELAGEM DO CENÁRIO COMPUTACIONAL DE EXPOSIÇÃO	44
3.5	CÁLCULOS DOSIMÉTRICOS.....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5	CONCLUSÕES	58
	REFERÊNCIA	60

1 INTRODUÇÃO

O petróleo desempenha um papel fundamental na matriz energética, sendo indispensável nos setores de transporte e petroquímica (HINRICHS, 2016). A indústria petrolífera é estratégica e essencial para a economia mundial, responsável pela extração, produção e distribuição do petróleo e seus derivados. Ela opera em diversos ambientes, como campos terrestres, águas rasas e profundas, e engloba processos complexos, como perfuração, produção, refino e transporte. O ciclo de produção do petróleo começa com a exploração, cujo objetivo é viabilizar a identificação e avaliação de reservatórios de hidrocarbonetos (MARQUES, 2005). Nesse sentido, são buscadas formações geológicas promissoras que possam conter petróleo (SOUZA *et al.*, 2011).

A exploração do petróleo depende da perfuração de poços para acesso aos depósitos subterrâneos. Nesse contexto, as técnicas de perfilagem têm um papel fundamental na interpretação dos intervalos perfurados. Ao fornecer uma visão detalhada das propriedades das formações, a perfilagem de poços contribui para identificar e aproveitar eficientemente os recursos petrolíferos existentes, sendo uma etapa essencial no processo de exploração de petróleo (ALMEIDA *et al.*, 2020). Esses dados são importantes para avaliar o potencial de produção do reservatório e tomar decisões estratégicas na indústria petrolífera.

O uso de técnicas geofísicas, como neutrônico (NPHI), com propriedades radioativas, complementa a análise dos poços. Com o uso de sondas e equipamentos especializados, a perfilagem de poços coleta dados sobre as características das formações geológicas. Essas abordagens combinadas permitem uma análise abrangente do subsolo, contribuindo com as operações de exploração de petróleo (NERY, 2013).

As fontes radioativas são compostas por isótopos radioativos, também conhecidos como radioisótopos, que possuem núcleos instáveis e altamente energéticos. Essas radiações têm a capacidade de atravessar materiais ou serem absorvidas por eles. Essa propriedade torna as fontes radioativas aplicáveis em diversas áreas de estudo, onde podem ser utilizadas para fins de diagnóstico médico, tratamentos terapêuticos, análises de materiais e inspeções industriais, entre outros (TAUHATA *et al.*, 2013, 2014). Além disso, a radiação emitida pode interagir com as formações geológicas do subsolo e composição de fluidos. Esses dados são indispensáveis para avaliar a viabilidade de um reservatório de petróleo e aperfeiçoar as operações de produção (NERY, 2013).

Durante a técnica de perfilagem com sondas, o isótopo $^{241}\text{Am-Be}$, também conhecido como amerício-241, é utilizado em sondas de perfilagem na indústria de petróleo. Dentre várias

fontes existentes, o isótopo $^{241}\text{Am-Be}$ - fonte de nêutron -, é uma das mais utilizadas (CARVALHO, 2015; CHILIUTTI *et al.*, 2015; SOUZA *et al.*, 2011). Estas fontes são blindadas e armazenadas dentro de contêineres, e quando são utilizadas sua blindagem é retirada e transportada por um sistema de cabo de aço ao longo da profundidade do poço para obter dados dos perfis litológicos, entre outros (CARVALHO, 2015; CHILIUTTI *et al.*, 2015; CNEN, 2023).

A exposição ocupacional à radiação ionizante na indústria do petróleo, especialmente por meio do uso de sondas radioativas, pode representar um risco significativo à saúde dos trabalhadores. Estudos científicos, como os realizados por Tauhata *et al.* (2013, 2014) e Clarke (1999), destacam os efeitos biológicos adversos que podem ser causados pela exposição à radiação ionizante, incluindo alterações no sistema nervoso, esterilidade, efeitos cardiovasculares e o “desenvolvimento” de câncer. É fundamental, portanto, conduzir pesquisas para investigar a exposição ocupacional a esses isótopos radioativos e desenvolver estratégias eficazes de avaliação, monitoramento e mitigação de riscos. Além disso, há questionamentos levantados por Russo (2012) sobre a proteção radiológica relacionada à exposição crônica e/ou prolongada, mesmo em baixas doses de radiação, que podem desencadear respostas adaptativas, bioquímicas e celulares, mesmo em níveis considerados seguros para exposição. Essas preocupações destacam a importância de adotar medidas de proteção radiológica adequadas na indústria do petróleo.

Para garantir a segurança dos trabalhadores, é necessário adotar medidas de proteção adequadas, como o uso de equipamentos de proteção individual, o monitoramento da dose de radiação, a implementação de procedimentos operacionais seguros e a conscientização dos perigos da radiação (CARVALHO, 2015; COSTA, 2009). Para mais, é fundamental seguir as regulamentações e diretrizes estabelecidas por órgãos de segurança radiológica, como a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e a International Atomic Energy Agency (IAEA), para garantir a proteção dos trabalhadores e minimizar os riscos associados à utilização de sondas radioativas na radiografia industrial e da indústria do petróleo. Deste modo, para obtenção dos valores dosimétricos, uma alternativa é a simulação computacional, que é uma ferramenta para auxiliar e avaliar a exposição ambiental e dos indivíduos a radiações (LIN, 2016).

A modelagem computacional é uma abordagem promissora para analisar a exposição ocupacional em atividades de perfuração de poços de petróleo. Utilizando técnicas computacionais, é possível simular a propagação da radiação ionizante, calcular os níveis de exposição e identificar medidas de proteção adequadas. Além disso, oferece vantagens como:

a realização de estudos detalhados sem a exposição direta dos trabalhadores a riscos reais e a capacidade de analisar diferentes cenários e condições operacionais. No entanto, é importante considerar a qualidade dos dados de entrada, a calibração dos modelos e as incertezas inerentes ao processo de modelagem para garantir a confiabilidade dos resultados (DE SOUZA GUIMARÃES e BARROS, 2005) e que contribuam à segurança dos trabalhadores na indústria de perfuração de poços de petróleo. Assim, o problema abordado é a avaliação da exposição dos trabalhadores durante a atividade de perfilagem de poços de petróleo utilizando sondas de fontes de nêutrons $^{241}\text{Am-Be}$ (Americício 241 - Berílio) por meio da modelagem computacional.

A justificativa para a realização deste projeto baseia-se na escassez de estudos na literatura que forneçam informações sobre a dose de radiação adquirida pelos trabalhadores durante o processo em que a fonte radioativa é retirada da blindagem e inserida no poço a ser inspecionado. Essa lacuna de conhecimento limita a compreensão dos riscos envolvidos e dificulta a implementação de medidas de proteção adequadas.

A importância desse estudo para os geólogos e profissionais envolvidos na indústria do petróleo é significativa. A análise da exposição ocupacional durante a perfilagem de poços permite compreender os níveis de risco aos quais os trabalhadores estão expostos. Isso contribui para o desenvolvimento de estratégias de proteção radiológica mais eficaz, garantindo a segurança e a saúde dos profissionais envolvidos. Além disso, o conhecimento obtido a partir deste estudo contribuirá para o avanço da área de segurança radiológica na indústria do petróleo, fornecendo subsídios à formulação de diretrizes e regulamentações mais precisas e atualizadas. Isso beneficiará não apenas os geólogos, mas também toda a equipe envolvida nas operações de perfuração e perfilagem de poços, promovendo um ambiente de trabalho mais seguro e sustentável.

1.1 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho foi realizar um estudo de modelagem computacional da exposição ocupacional durante a perfilagem de poços terrestres de petróleo, com foco na investigação dos isótopos radioativos $^{241}\text{Am-Be}$. Para alcançar os objetivos, foi utilizado o código de transporte de radiação MCNPX2.7.0 (Monte Carlo N-Particle eXtended), para simular o transporte de partículas e radiação ionizante em diferentes profundidades, a fim de compreender a distribuição e os níveis de exposição ocupacional aos isótopos $^{241}\text{Am-Be}$ nos ambientes de trabalho relacionados à perfuração de poços terrestres.

Os objetivos específicos deste estudo são: a) coletar informações teóricas e dados sobre prospecção e perfuração de poços de petróleo, com enfoque sobre sondas de radiação de nêutrons; b) desenvolver modelos para fontes de radiação de nêutrons ($^{241}\text{Am-Be}$) em diferentes profundidades de perfuração; c) quantificar as doses de radiação nos órgãos e tecidos dos trabalhadores envolvidos no ambiente de perfuração; e, por fim, d) comparar os resultados simulados com dados existentes na literatura.

Além deste primeiro capítulo introdutório, trabalho de conclusão de curso está estruturado e dividido nos seguintes capítulos:

- No Capítulo 2, são apresentados aspectos teóricos relacionados ao petróleo e a perfuração de poços de petróleo utilizando sondas radioativas, além das medidas de radioproteção de fontes radioativas. Também são abordados os limites e princípios estabelecidos pelos órgãos reguladores (ICRP, CNEN) para garantir a segurança radiológica em relação à interação e exposição ocupacional nesses ambientes;
- O Capítulo 3 descreve o material e método utilizados para realizar simulações experimentais com base nos objetivos específicos;
- No Capítulo 4 são abordadas as aplicações específicas das fontes radioativas, com foco no isótopo $^{241}\text{Am-Be}$. São apresentados os resultados experimentais obtidos por meio de modelagem computacional e simulações Monte Carlo utilizando o software MCNPX2.7.0. Neste capítulo, estão disponíveis os mapas que mostram a distribuição de fluxo e dose ao redor da instrumentação estudada e
- por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões da pesquisa realizada, resumindo os principais achados e suas implicações.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O PETRÓLEO E A PERFILAGEM DE POÇOS

O petróleo tem participação em registros remotos, desde os tempos bíblicos com progresso até a atualidade. A palavra petróleo, tem sua origem, do latim "petra" (pedra) e "oleum" (óleo), que em estado líquido é uma substância oleosa, inflamável e menos densa que a água. Sua cor varia do negro ao castanho-claro e possui um cheiro peculiar. Essa substância é composta principalmente por hidrocarbonetos, que são compostos químicos orgânicos. Em condições normais de temperatura e pressão, quando a mistura contém uma maior porcentagem de moléculas pequenas, o petróleo se apresenta no estado gasoso e, quando a mistura contém moléculas maiores, o petróleo se encontra no estado líquido (THOMAS, 2004).

O petróleo desempenha um papel de extrema relevância na economia global, sendo amplamente utilizado em diversos setores, como transporte, indústria e geração de energia elétrica (HINRICHS, 2016). E de acordo com o Statistical Review of World Energy (2023), a produção global de petróleo aumentou em 3,8 milhões de barris por dia (b/d) em 2022, e o consumo de petróleo continuou a crescer em 2,9 milhões de b/d, atingindo um total de 97,3 milhões de b/d. A produção mundial totalizou 93.848 b/d, representando uma taxa de crescimento de 4,2%. No Brasil, a produção foi de 3.107 b/d, com uma taxa de crescimento de 3,9%.

Além de seu uso como combustível, o petróleo desempenha um papel fundamental na produção de uma ampla gama de produtos petroquímicos, como plásticos, borrachas, tintas e solventes, entre outros. No Brasil, os derivados de petróleo têm uma participação significativa na matriz energética, correspondendo a 43% do consumo energético em 2017, uma participação acima da média mundial. É importante ressaltar que a demanda por derivados de petróleo é predominantemente impulsionada pelo setor de transporte, representando 65% do total (EPE, 2018).

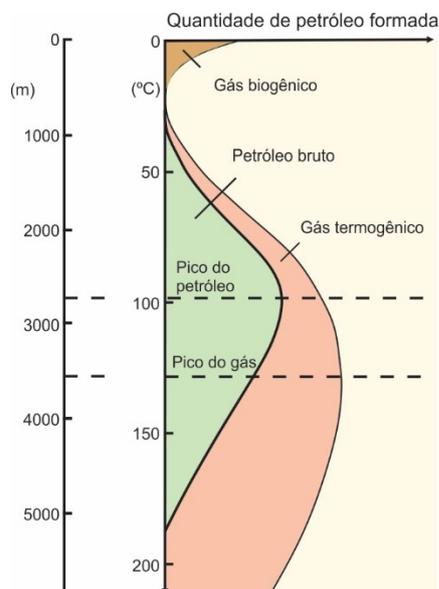
No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) foi criada por meio do Decreto nº 2.455/1998, em consonância com a Lei nº 9.478/1997, conhecida como a Lei do Petróleo. Essa legislação estabeleceu as bases para a exploração e produção de recursos petrolíferos no país, definindo os direitos e responsabilidades das empresas do setor, bem como as diretrizes a serem seguidas.

A ANP, como agência reguladora, tem como objetivo implementar e fiscalizar a política nacional para o setor de petróleo, gás natural e biocombustíveis. Suas atribuições abrangem a

concessão de áreas para exploração e produção, a regulação e fiscalização das atividades das empresas, a promoção de leilões para aquisição de áreas de exploração, a definição de normas técnicas e de segurança, entre outras responsabilidades. A ANP, também atua na área de exploração e produção de petróleo e gás, e promove estudos geológicos e geofísicos para ampliar o conhecimento sobre as reservas brasileiras de petróleo e gás; guarda e organiza os dados coletados nestes estudos; sugere ao governo as áreas a serem licitadas; promove as rodadas de licitações e assina os contratos de concessão em nome da União. Além disso, ANP (2023) define o petróleo como um material fóssil, oleoso e inflamável, com alto valor energético e uma ampla gama de aplicações. O petróleo é composto principalmente de hidrocarbonetos, com proporções variáveis de carbono (82%), hidrogênio (12%), nitrogênio (4%), oxigênio (1%), sais (0,5%) e metais 0,5% - ferro, cobre, etc. –, considerados como resíduos. Durante o processo de refino, os diferentes hidrocarbonetos são separados de acordo com suas faixas de temperatura de ebulição, gerando produtos como gás de petróleo, gás liquefeito de petróleo (GLP), nafta, gasolina, querosene, óleo diesel, óleo lubrificante, óleo combustível e resíduos.

A formação do petróleo envolve o acúmulo de material orgânico ao longo de milhares de anos, em camadas do subsolo de bacias sedimentares, sujeito a condições específicas de pressão e isolamento. Sendo necessário que haja uma combinação de fatores, incluindo a presença de uma rocha reservatório porosa e uma rocha seladora que impeça a fuga do óleo para a superfície. Por essa razão a sua formação leva milhões de anos. A Figura 2.1 ilustra os tipos de petróleo e os seus derivados existentes na subsuperfície e a respectiva profundidade que ocorrem (ANP, 2020; JAHN, 2012; SELLEY e SONNENBERG, 2016; THOMAS, 2004).

Figura 2.1- Tipos de petróleo e sua profundidade



Fonte: Adaptado de Goessa (2017, p.5).

O petróleo encontra-se aprisionado em rochas porosas e ou fraturados, sua extração requer o uso de equipamentos de perfuração que penetrem nas camadas rochosas e apliquem pressão para trazer o óleo até a superfície, muitas vezes misturado com sedimentos e gás. Quando a rocha-reservatório não possui boa permeabilidade, técnicas como a fratura hidráulica podem ser necessárias para recuperar o petróleo. No entanto, mesmo quando a presença de petróleo é confirmada, pode haver casos em que sua extração não seja comercialmente viável ou tecnicamente possível (ANP, 2020; JAHN, 2012; SELLEY e SONNENBERG, 2016; THOMAS, 2004).

A prospecção e a futura exploração comercial do petróleo podem ocorrer em terra (*onshore*) ou abaixo do leito do mar (*offshore*). As atividades relacionadas à exploração e produção de petróleo exigem uma cuidadosa preparação e investimentos significativos. Diversos estudos e fontes, como ANP (2020), Jahn (2012) Lima (2003), Santos (2022), Selley (2016) e Thomas (2004), ressaltam a importância de considerar a localização e as características dos reservatórios ao realizar tais investimentos.

A extração do petróleo requer uma preparação que pode levar anos e demanda grandes investimentos, que se tornam progressivamente mais altos dependendo dos diversos aspectos que influenciam seu custo. Entre eles estão: a porosidade da rocha reservatório, as dimensões da jazida, a profundidade em que o petróleo está localizado, a dureza da rocha, a localização de acesso, a presença de rochas solúveis e a quantidade de reserva recuperável. Esses fatores, combinados, aumentam a complexidade da perfuração e resultam em desafios técnicos e logísticos durante a exploração (De Queirós Mattoso, 2008). Além disso, a tecnologia utilizada no processo de extração desempenha um papel fundamental no custo total da operação. A perfuração, por exemplo, pode representar de 5% a 15% do custo total do poço. É importante garantir que o custo de aquisição dessa tecnologia possa ser justificado pelo valor dos dados gerados e que esses sejam efetivamente gerenciados (JAHN, 2012).

Na indústria de exploração de petróleo, a identificação de possíveis regiões com presença de hidrocarbonetos é realizada por métodos sísmicos. No entanto, para confirmar os resultados obtidos e validar os prognósticos feitos durante a prospecção, é necessário dar início à perfuração de poços. Para que essa avaliação seja realista, ela deve ser iniciada nos primeiros metros perfurados do poço. Por meio da análise e estudo dos fragmentos triturados da broca, testemunhos, extravasões (*kicks* ou *blowouts*) de fluidos, anomalias observadas e eventuais perfis geofísicos durante a perfuração (NERY, 2013). Essa etapa pode estabelecer um caminho físico entre a superfície e o reservatório subterrâneo, que será utilizado posteriormente para a extração de fluidos.

Após cada fase da perfuração, a segunda etapa da avaliação exploratória - antes do poço ser revestido ou completado, é realizada pela perfilagem geofísica (elétrica acústica e/ou radioativa); teste de formação e amostras laterais. E depois da avaliação exploratória ou de produção – poço considerado de interesse e/ou revestido, é realizado os estudos de perfis geofísicos específico para o poço já revestido e os testes de produção (NERY, 2013). Esse processo de caracterização, conhecido como avaliação da formação, é conduzido por meio de testes de formação e perfilagem de poços.

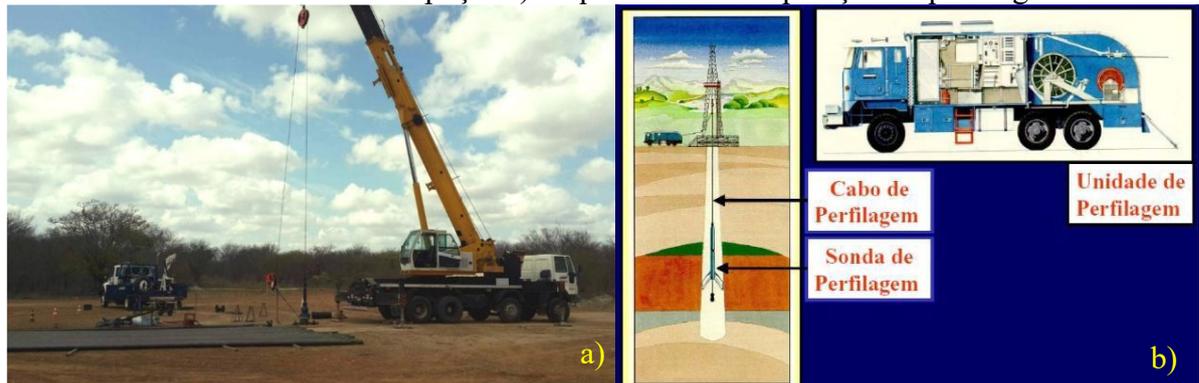
A perfilagem de poços de petróleo é uma técnica que permite obter informações detalhadas sobre as camadas geológicas, como litologia e propriedade das rochas (composição e estrutura das rochas); e identificar as propriedades dos fluidos presentes, determinar a porosidade das rochas e avaliar a permeabilidade dos reservatórios, em diferentes profundidades. Além disso, a perfilagem permite identificar possíveis barreiras ou canais de fluxo de fluidos, auxiliando na compreensão da capacidade de produção do reservatório e fornecendo dados importante para o planejamento e a otimização das operações de exploração e produção de petróleo (JAHN, 2012; NERY, 2013; SELLEY e SONNENBERG, 2016 e THOMAS, 2004).

No processo de obtenção de dados durante a perfilagem de poços de petróleo, ferramentas especializadas são descidas pelo poço, e as informações são transmitidas por meio de um cabo de perfilagem até a unidade de superfície, onde os dados são adquiridos. Esse processo resulta na criação de uma representação gráfica conhecida como perfil. A seleção dos tipos de perfis a serem gerados varia de acordo com as propriedades das rochas avaliadas, que podem ser elétricas (resistividade elétrica, potencial eletroquímico natural), acústicas (tempo de trânsito das ondas sonoras) ou radioativas (radioatividade natural e induzida) (THOMAS, 2004; JAHN, 2012; SELLEY e SONNENBERG, 2016; NERY, 2013).

A Figura 2.2 ilustra esquematicamente o processo de perfilagem, mostrando a descida das ferramentas (a) e a transmissão dos dados para a unidade de superfície (b).

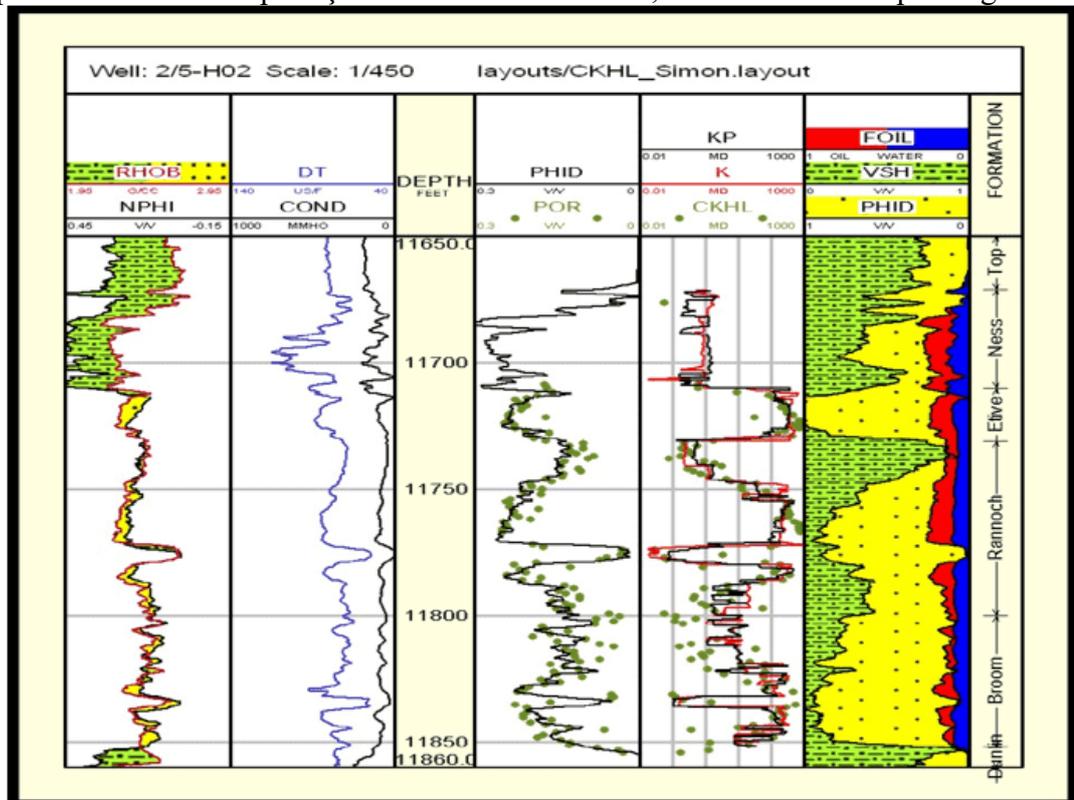
Já a Figura 2.3 apresenta um exemplo de perfis, exemplificando como as informações são visualizadas graficamente, permitindo a análise e interpretação dos dados obtidos durante a perfilagem.

Figura 2.2 - a) Operação de perfilagem *onshore*. Equipamento de rigup montado e ferramentas dentro do poço. b) Esquema de uma operação de perfilagem



Fonte: Carvalho (2015, p.16 e 28).

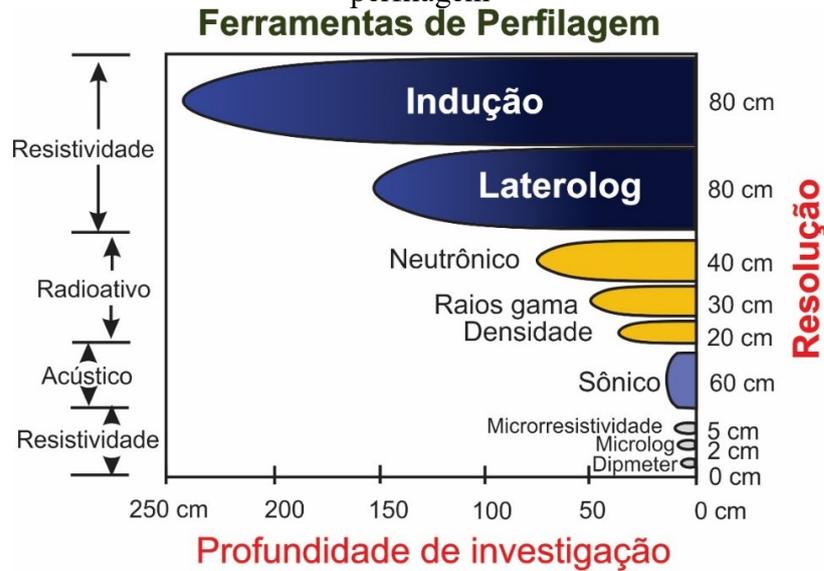
Figura 2.3 - Exemplo de conjunto de perfis, representação gráfica de diferentes ferramentas, para a análise e interpretação dos dados associados, obtidos durante a perfilagem



Fonte: Assaife (2022, p.56).

Para qualquer que seja o tipo de perfil empregado na avaliação de um poço de petróleo, não são fornecidas diretamente as propriedades de interesse, como porosidade, permeabilidade ou saturação de fluidos. Essas propriedades são calculadas a partir de parâmetros de medições elétricas, acústicas e radioativas, tendo cada uma dessas um intervalo de medidas variável para a ferramenta de perfilagem (THOMAS, 2001), como ilustra a Figura 2.4.

Figura 2.4 - Exemplo esquemático de intervalos de medição para diferentes ferramentas de perfilagem



Fonte: adaptado de Assaife (2022, p.57).

2.1.1 Tipos de Perfis

A perfilagem de poços de petróleo é uma técnica essencial na indústria do petróleo para avaliar as características geológicas e fluidas dos reservatórios. Ela consiste na coleta de dados detalhados ao longo do poço, utilizando sondas e sensores especializados. Esses dados, são interpretados para entender a estrutura do reservatório, a presença de hidrocarbonetos, a permeabilidade das rochas e outras propriedades importantes para a exploração e produção de petróleo.

Conforme mencionado por Thomas (2004), a perfilagem de poços envolve o uso de diversos instrumentos e técnicas, que são selecionados com base nas propriedades das rochas e nas características geométricas do poço. Existindo muitos outros tipos de perfis e o Quadro 2.1 apresenta alguns tipos de dispositivos de cabos de perfilagem.

Este trabalho se concentrará nas sondas de propriedade radioativa, com destaque para as sondas de neutrões que utilizam a radiação $^{241}\text{Am-Be}$ como fonte.

Quadro 2.1- Resumo dos tipos de dispositivo de cabos de perfilagem

Dispositivo genérico	Tipos de medição	Aplicação
Gama	Radiação gama natural	Litologia, correlação
SP	Potencial espontâneo	Litologia, permeabilidade de (indicador)
Massa específica	Densidade aparente	Porosidade, litologia
Nêutron	Índice de hidrogênio	Litologia, porosidade, indicador de gás
Acústico	Tempo de percurso, forma de onda acústica	Porosidade, calibração sísmica
Resistividade	Resistência elétrica de formação	Saturação, indicador de permeabilidade
Indução	Corrente elétrica de induzida	Saturação (OBMs)
Imagem	Resistividade ou imagem pixelada acústica	Sedimentologia, análise de fraturas/falhamento
Ressonância Nuclear magnética	Ressonância Nuclear Magnética	Porosidade, permeabilidade, saturação
Testador de formação	Pressão de poros	Tipos de fluido, pressões e contatos

Fonte: Jahn (2012 p.171).

2.1.2 Radioatividade na perfilagem de poços

As sondas radioativas são utilizadas para medir a radioatividade natural das rochas e identificar a presença de hidrocarbonetos. Elas emitem radiação gama ou nêutrons para o subsolo e registram as respostas das formações rochosas. A partir dessas respostas, é possível determinar a porosidade, densidade e composição das rochas, auxiliando na identificação dos locais com maior potencial de acumulação de petróleo. Três tipos de perfis que medem a radioatividade são comumente utilizados: raios gama, densidade e neutrônico. Estes estão descritos, conforme (THOMAS, 2014):

- a) Sondagens de raios gama (RG): são usadas para detectar a radioatividade total da formação geológica. Elas são utilizadas na identificação da litologia, minerais radioativos e no cálculo do volume de argilas ou argilosidade presentes na formação;
- b) O perfil de densidade (RHOB): é uma ferramenta usada na análise de poços que detecta os raios gama refletidos pelos elétrons orbitais dos elementos presentes nas rochas. Esses raios gama são emitidos por uma fonte colimada localizada dentro do poço. Além de medir a densidade das camadas, o perfil de densidade permite calcular a porosidade e identificar zonas de gás. Também é utilizado em conjunto com a sismologia para o cálculo do sismograma sintético e,

- c) O perfil neutrônico (NPHI): Os perfis mais antigos utilizam a medição da quantidade de raios gama capturados após a excitação artificial por meio de bombardeio de nêutrons rápidos direcionados. Já os perfis mais modernos medem a quantidade de nêutrons epitérmicos e/ou térmicos da rocha após o bombardeio. Esses perfis são empregados para estimar a porosidade, determinar a litologia e detectar hidrocarbonetos leves ou gás na formação geológica.

A partir desse contexto, iremos focar na análise das aplicações das fontes radioativas no perfil neutrônico como parte do estudo da perfilagem de poços.

2.2 PERFIL NEUTRÔNICO

O perfil neutrônico é um método utilizado para medir a porosidade das formações geológicas por meio do bombardeio de nêutrons. Esse processo envolve a emissão de nêutrons por uma fonte radioativa, como o amerício-berílio, que interagem com as rochas. Como resposta a esse bombardeio, as rochas emitem raios gama, cuja quantidade está relacionada com o teor de hidrogênio presente nelas. Essa radiação gama é registrada pela ferramenta de perfil neutrônico (SELLEY e SONNENBERG, 2016).

A porosidade é uma propriedade fundamental que está diretamente relacionada com a resposta do perfil neutrônico, uma vez que o hidrogênio está presente nos fluidos de formação dos reservatórios, como óleo, gás ou água, mas não nos minerais sólidos (SELLEY e SONNENBERG, 2016).

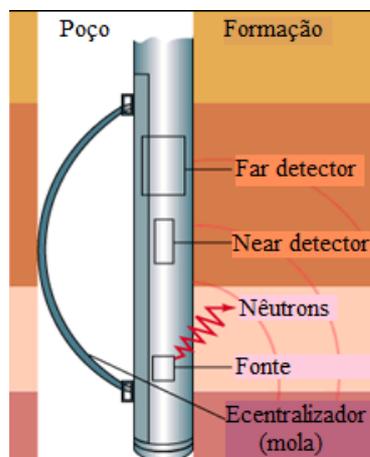
Uma vantagem do perfil neutrônico é que ele pode ser executado em poços revestidos, uma vez que os nêutrons conseguem atravessar o aço durante o bombardeio (SELLEY e SONNENBERG, 2016). Isso amplia a aplicabilidade do método e permite obter informações de porosidade mesmo em poços com revestimento metálico.

2.2.1 Princípio da ferramenta neutrônica

De acordo com o trabalho de Carvalho (2015), a sonda de perfilagem neutrônica é um dispositivo mecânico utilizado para movimentar a fonte e os detectores no poço, bem como transmitir os resultados para os equipamentos de aquisição na superfície. Isso é possível por meio da conexão com o dispositivo de telemetria e o cabo de perfilagem. Além da fonte e dos detectores, a sonda também possui uma mola localizada na lateral, que permite que ela desça

em contato com a parede do poço, minimizando os efeitos da lama e do revestimento na resposta do perfil. A Figura 2.5 ilustra o esquema da ferramenta utilizada para obter o perfil neutrônico.

Figura 2.5 - Modelo de ferramenta de perfilagem neutrônica



Fonte: Carvalho (2015, p. 33).

A fonte radioativa mais comumente utilizada para gerar o perfil neutrônico é o $^{241}\text{Am-Be}$ (Amerício 241 - Berílio). Nessa configuração, o Amerício é o elemento radioativo e o Berílio fornece nêutrons fracamente ligados. O isótopo do Amerício bombardeia o núcleo de Berílio com partículas alfa, resultando na liberação de alguns nêutrons que são emitidos para a formação. Essa fonte emite nêutrons rápidos na formação devido ao seu alto nível de energia, que está em torno de 2 MeV. Conseqüentemente, as interações mais significativas com a matéria serão de espalhamento.

2.2.2 Princípio de funcionamento

De acordo com as pesquisas de Nery (2013) e Carvalho (2015), a determinação da porosidade das rochas é baseada no índice de hidrogênio presente na formação, que é a quantidade de gramas de hidrogênio por unidade de volume.

Para isso, são utilizadas as ferramentas neutrônicas que são compostas por uma fonte de nêutrons com um ou até quatro detectores. Nas quais as fontes emitem nêutrons rápidos que colidem com os átomos nas camadas próximas ao poço, perdendo parte de sua energia nessas colisões. Essa perda de energia varia de acordo com o tipo de átomo com o qual os nêutrons colidem, sendo mais significativa quando ocorre a colisão com átomos de hidrogênio.

2.3 INSTRUMENTAÇÃO RADIOLÓGICAS

2.3.1 Fontes utilizadas em sondas radiológicas

De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica (International Atomic Energy Agency - IAEA) (2005), há atualmente várias centenas de milhares de sistemas de controle nucleônico (NCS) ou medidores nucleônicos instalados em indústrias ao redor do mundo. Esses sistemas têm sido amplamente utilizados em diversas indústrias para aprimorar a qualidade do produto, otimizar processos e economizar energia e materiais, conforme ilustra o Quadro 2.2. Os sistemas de controle nucleônico (NCS) são definidos como "controle por meio de medição e análise instrumental baseada na interação entre radiação ionizante e matéria". Existem várias formas de aplicação da NCS, como o uso em tempo real (online) durante o processo, o uso offline, em que ocorre a medição fora do processo, a utilização *in situ* para perfilagem de poços, a aplicação em laboratórios para análise de amostras e o uso de medidores portáteis para medições no local.

Quadro 2.2 – Radioisótopos mais usados em medidores nucleônicos

Parâmetro para medir	Fonte
Espessura do papel	^{85}Kr , ^{90}Sr , ^{147}Pm e ^{204}Tl
Espessura da camada metálica	^{141}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co
Densidade líquida	^{137}Cs
Nível de líquido	^{137}Cs , ^{60}Co
Densidade do solo	^{137}Cs
Umidade do solo	$^{241}\text{Am} - \text{Be}$, ^{252}Cf
Concentração suspensa de sedimentos	^{109}Cd , ^{241}Am
Concentração de cinza de carvão	$^{137}\text{Cs} + ^{241}\text{Am}$
Medidor de fluxo multifásico	$^{137}\text{Cs} + ^{241}\text{Am}$

Fonte: IAEA (2005).

Um medidor nucleônico é composto por uma ou mais fontes adequadas de radiação alfa, beta, gama, nêutron ou raios X dispostas em uma relação geométrica fixa com um ou mais detectores de radiação, como se mostra no Quadro 2.3. A maioria dos medidores nucleônicos é baseada em técnicas nucleares comuns (IAEA, 2005).

Uma das técnicas utilizadas é a análise de ativação de nêutrons gama, que pode ser imediata - Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (PGNAA) ou atrasada - Delayed Gamma Neutron Activation Analysis (DGNAA). A análise de ativação de nêutrons gama imediata utiliza os primeiros raios gama produzidos pela interação, enquanto a análise de ativação de nêutrons gama atrasada aproveita os raios gama resultantes do decaimento da

radioatividade induzida. A mesma sonda pode ser utilizada tanto para a análise elementar PGNAA quanto para a DGNAA (IAEA, 2005).

Quadro 2.3 Apresenta fontes usadas em sondas radiológicas

Radionuclídeo	Tipo de radiação
Promécio - 147	Beta
Tálio-204	Beta
Kripton-85	Beta
Ítrio-90	Beta
Americio-241	Gama
Césio-137	Gama
Cobalto-60	Gama
Americio-241/Berílio	Neutrões
Cd-252	Neutrões
Ferro-55	Raios X
Cádmio-109	Raios X

Fonte: IAEA (2005).

As fontes de nêutrons $^{241}\text{Am-Be}$ são comumente usadas nas técnicas de PGNAA e DGNAA. A fonte $^{241}\text{Am-Be}$ fornece nêutrons de energia mais alta, que também podem ser utilizados para projetar analisadores elementares que empregam a reação de espalhamento inelástico de nêutrons. As atividades comuns variam de 20 GBq para registro de poços até 100 GBq para processamento em massa em tempo real (IAEA, 2005).

2.3.2 Risco radiológico das instalações radiativas

A categorização de fontes estabelecida pela IAEA (2005) oferece um sistema para classificar as fontes e práticas de acordo com seu potencial de causar danos à saúde humana. Essa categorização é baseada no conceito de periculosidade das fontes, que é quantificado usando valores D. O valor D representa a atividade de um radionuclídeo em uma fonte que, se estivesse fora de controle, poderia causar efeitos determinísticos graves. Os valores D são usados como fatores de normalização para fornecer uma referência na comparação de riscos.

O conceito de fonte perigosa está relacionado ao seu potencial de causar danos à saúde e é determinado pela relação A/D , em que A representa a atividade do material radioativo contido na fonte de uma determinada prática, e D é o valor normalizador estabelecido com base na atividade específica do radionuclídeo. O resultado dessa divisão indica a posição na respectiva categoria. O Quadro 2.4 apresenta a categorização das fontes, juntamente com o nível de periculosidade correspondente.

Quadro 2.4 - Categorização das fontes e sua periculosidade

Categoria	Relação A/D	Descrição
Categoria 1 Irradiadores de grande porte e fontes de tele terapia	$A/D \geq 1000$	Fonte extremamente perigosa; Pode causar lesões permanentes em alguns segundos; Pode levar ao óbito em exposições de alguns minutos;
Categoria 2 Fontes de gamagrafia industrial e fontes de branquiterapia de alta e média taxa de dose	$1000 > A/D \geq 10$	Fonte muito perigosa; Pode causar lesões permanentes em alguns minutos; Pode levar ao óbito em exposições de horas ou dias;
Categoria 3 Medidores industriais com fontes de altas atividades e fontes utilizadas em perfilagem de poços	$10 > A/D \geq 1$	Fonte perigosa; Pode causar lesões permanentes em algumas horas; Pode levar ao óbito em exposições de dias ou semanas;
Categoria 4 Fontes de branquiterapia de baixa taxa de dose; Medidores industriais com fontes de baixas atividades/moderadas	$1 > A/D \geq 0,01$	Fonte pouco perigosa; Nenhuma lesão permanente é esperada devido à sua manipulação; Pouca probabilidade de ocorrência de efeitos temporários devido à sua manipulação por períodos de semanas
Categoria 5 Dispositivos de fluorescopia de raios X(FRX); Dispositivos de captura eletrônica	$0,01 > A/D$ e $A >$ Nível de isenção	Fonte não perigosa; Muito próxima ou abaixo do nível de isenção; Nenhuma lesão ou efeito são esperados.

Fonte: IAEA, (2005).

2.3.3 Risco Físico das instalações radiativas

Após uma série de acidentes resultantes fora do controle regulatório de fontes radioativas, a questão da segurança das fontes tem sido amplamente discutida pelos Estados-membros da IAEA. Isso levou os governos a tomarem medidas para garantir e estabelecer sistemas nacionais de controle efetivos, a fim de assegurar a segurança das fontes de radiação e dos materiais radioativos (GOESSA, 2017).

O Grupo A compreende fontes classificadas na categoria 1, consideradas extremamente perigosas. O Grupo B inclui fontes classificadas nas categorias 2 e 3, consideradas muito perigosa e perigosas, respectivamente. O Grupo C abrange fontes classificadas na categoria 4, classificadas como pouco perigosas, e o Grupo D inclui fontes classificadas como não perigosas.

No Quadro 2.5 estão apresentados os grupos com base em sua categorização por práticas. A perfilagem de poços de petróleo, objeto da presente pesquisa, é parte integrante

dessa classificação e pertence à categoria 3, considerada perigosa. Em caso de acidente, representa um nível de risco radiológico maior. Portanto, essa prática está no Grupo de Segurança B, exigindo a implementação de medidas para prevenir e detectar o acesso não autorizado e responder a eles prontamente.

Quadro 2.5 - Grupos de segurança baseados na categorização das fontes

Grupo de segurança	Categoria	Fontes e práticas	Razão das atividades (A/D)
A	1 Extremamente perigosas	Irradiadores de grande porte e fontes de teleterapia	$A/D \geq 1000$
B	2 Muito perigosas	Fontes de gamagrafia industrial e fontes de branquiterapia de alta e média taxa de dose	$1000 > A/D \geq 10$
	3 Perigosas	Medidores industriais com fontes de altas atividades e fontes utilizadas em perfilagem de poços	$10 > A/D \geq 0.01$
C	4 Provavelmente não perigosas	Fontes de branquiterapia de baixa taxa de dose; Medidores industriais com fontes de baixas atividades/moderadas	$1 > A/D \geq 0.01$
D	5 Não perigosas	Dispositivos de fluoroscopia de raios X(FRX); Dispositivos de captura eletrônica	$0.01 > A/D$

Fonte (IAEA, 2003).

2.4 GRANDEZAS DOSIMÉTRICAS NA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Neste estudo, o enfoque será nas grandezas radiológicas relevantes para a radiação externa, considerando a natureza da radiação analisada. As grandezas radiológicas são parâmetros que nos permitem quantificar e avaliar a radiação, fornecendo dados importantes sobre sua intensidade, dose absorvida, exposição e outros aspectos relevantes. Essas grandezas são expressas em unidades específicas, que possibilitam uma avaliação precisa e padronizada dos níveis de radiação. Neste caso, usaremos a referência de Tauhata (2013, 2014) que define e explica grandezas aplicadas nesse estudo.

2.4.1 Dose absorvida

A dose absorvida (D) é uma grandeza que quantifica a quantidade de energia depositada nos tecidos humanos pela radiação ionizante. Quando a radiação interage com a matéria, ocorre transferência de energia para os átomos e moléculas do material atingido. A dose absorvida é

definida como a relação entre a energia absorvida e a massa do volume do material atingido. Em outras palavras, representa a energia média depositada em uma massa elementar (dm) do tecido, como mostra a Equação 2.1.

$$D = \frac{\overline{d\varepsilon}}{dm} [Gy] \quad (Eq. 2.1)$$

Sendo: $d\bar{\varepsilon}$ é a energia média depositada pela radiação no ponto P de interesse, num meio de massa dm .

A unidade de medição padrão no Sistema Internacional (SI) é o gray (Gy), que é igual a um joule por quilograma (J/kg). Essa unidade é amplamente utilizada para expressar a dose absorvida.

2.4.2 Dose equivalente

A dose equivalente (H_T) é uma grandeza fundamental no campo da radioproteção. Ela está relacionada a um tecido ou órgão específico, H_T , definida pela equação 2.2 será considerada igual à dose absorvida no órgão ou tecido, pois para fótons o fator de peso da radiação, w_R , é igual a 1 (ICRP 103, 2007), conforme pode ser observado no Quadro 2.6.

$$H_T = \sum_T w_R \times D_T [Sv] \quad (Eq. 2.2)$$

Em que w_R representa os principais fatores de peso para diferentes tipos de radiação.

Quadro 2.6 - Fator de ponderação para diferentes tipos de radiação ionizante (ICRP 103, 2007)

Tipo de Radiação	Fator de peso da radiação w_R
Fótons, elétrons e múons	1
Prótons	2
Partículas alfa, íons pesados	20
Nêutrons	$\left\{ \begin{array}{l} 2,5 + 18,2e^{-\frac{[\ln(E_n)]^2}{6}}, E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5 + 17e^{-\frac{[\ln(2E_n)]^2}{6}}, 1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \\ 2,5 + 3,25e^{-\frac{[\ln(0,04E_n)]^2}{6}}, E_n > 50 \text{ MeV} \end{array} \right\}$

Fonte: ICRP 103 (2007).

2.4.3 Dose efetiva

A dose efetiva (E) é uma grandeza que representa a soma das doses equivalentes ponderadas em diferentes órgãos e tecidos (T). É calculada multiplicando o valor da dose equivalente de cada órgão ou tecido, pelo respectivo fator de ponderação (w_T) e somando esses produtos. O fator de ponderação varia de acordo com a sensibilidade e importância de cada órgão ou tecido em relação à radiação, como indicado pela Equação 2.3.

$$E = \sum_T w_T \times H_T [Sv] \quad (Eq. 2.2)$$

Os valores de w_T estão associados à radiosensibilidade do órgão à radiação e seus valores estão no Quadro 2.7.

Quadro 2.7 - Valores do fator de peso, w_T , para tecido ou órgão definido na ICRP 103

Órgão e tecido	w_T	$\sum_T w_T$
Medula óssea, cólon, pulmão, estômago, mama e restantes*	0,12	0,72
Gônadas	0,08	0,08
Bexiga, esôfago, fígado e tireoide	0,04	0,16
Superfície óssea, cérebro, glândulas salivares e pele	0,01	0,04
Total		1,00
*Adrenais, região extratorácica, vesícula biliar, coração, rins, nódulos linfáticos, músculos, mucosa oral, pâncreas, próstata, intestino delgado, baço, timo e útero.		

Fonte: ICRP 103 (2007).

2.4.4 Medidas técnicas essenciais para proteção contra radiação

Os efeitos biológicos podem ocorrer devido ao uso inadequado e à falta de cuidado no manuseio de fontes radioativas, é necessário abordar os aspectos de radioproteção relacionados à atividade de perfilagem radiativa. De acordo com Okuno (2013) e Santos (2018), a proteção radiológica se baseia em três princípios: justificativa, otimização e limitação de dose:

Justificativa: qualquer atividade que envolva qualquer exposição à radiação deve ser justificada, ou seja, deve trazer benefícios positivos para a sociedade. Antes de realizar qualquer procedimento radiológico, é importante avaliar se os benefícios superam os riscos envolvidos.

Otimização: é um requisito básico de proteção radiológica que busca manter as exposições à radiação tão baixas quanto razoavelmente exequíveis, levando em consideração fatores econômicos e sociais. Esse princípio, conhecido como - As Low As Reasonably

Achievable (ALARA) ou Tão Baixo Quanto Razoavelmente Exequível, visa minimizar a dose de radiação sem comprometer a qualidade do procedimento ou do resultado obtido.

Limitação de dose: A exposição normal dos indivíduos deve ser controlada de forma a garantir que nem a dose efetiva, nem a dose equivalente nos órgãos ou tecidos de interesse, excedam os limites de dose estabelecidos pela Norma CNEN NN 3.01 março / 2014, a menos que em circunstâncias especiais autorizadas.

O Quadro 2.8 apresenta os limites de dose individual estabelecidos pela norma aplicável, definindo os valores máximos permitidos para a dose efetiva e a dose equivalente nos órgãos ou tecidos específicos. Esses limites são estabelecidos com o objetivo de proteger os indivíduos contra os potenciais efeitos prejudiciais da exposição à radiação ionizante.

Quadro 2.8 - limites de dose individual estabelecidos pela norma CNEN NN-3.01 – março/2014

Limites de dose anuais ^[a]			
Grandeza	Órgão	Indivíduo ocupacionalmente exposto	Indivíduo do público
Dose efetiva	Corpo inteiro	20 mSv ^[b]	1 mSv ^[c]
Dose equivalente	Cristalino	20 mSv ^[b] (Alterado pela Resolução CNEN 114/2011)	15 mSv
	Pele ^[d]	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	-

[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] Média aritmética em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano; [c] Em circunstâncias especiais, a CNEN 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 1 mSv por ano e [d] Valor médio em 1 cm² de área, na região mais irradiada.

Fonte: CNEN (2014).

A ICRP (Comissão Internacional de Proteção Radiológica) estabelece três categorias de exposição que ocorrem em diferentes grupos da população. São elas: a exposição do público, que se refere à exposição de indivíduos a fontes e práticas autorizadas ou em situações de intervenção, excluindo a exposição ocupacional, médica e natural local. Já a exposição médica, em que envolve a exposição de pacientes para fins de diagnóstico ou terapia, a exposição voluntária e ocasional de indivíduos que assistem pacientes durante procedimentos radiológicos de terapia e a em destaque neste trabalho a exposição ocupacional.

A exposição ocupacional é definida pela ICRP como qualquer exposição à radiação, seja de origem natural ou artificial, que ocorre devido à atividade profissional de um trabalhador. Um trabalhador exposto é aquele que, devido à sua ocupação, pode exceder os limites de dose anual estabelecidos para o público em geral. Esses trabalhadores têm direitos e responsabilidades relacionados à proteção radiológica ocupacional. De acordo com a

classificação estabelecida pela ICRP, os trabalhadores expostos a radiações ionizantes são categorizados em duas classes com base nas suas condições habituais de trabalho. Essa classificação é determinada por meio de uma avaliação prévia da exposição. As categorias são as seguintes:

Categoria A

- Esta categoria abrange trabalhadores envolvidos em atividades profissionais que envolvem o manuseio de fontes de radiação ionizante, como na área médica (radioterapia, medicina nuclear) e na área industrial (uso de medidores nucleares, gamagrafia, perfuração de poços de petróleo etc.) e
- Também inclui trabalhadores que lidam com materiais radioativos, como materiais contaminados em atividades com fontes radioativas abertas, bem como NORM (Material Naturalmente Radioativo) presente em atividades de petróleo e gás.

Essa categoria se refere a trabalhadores cujas atividades habituais envolvem níveis de radiação ionizante acima de 1/10 dos limites anuais estabelecidos pela CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear). Além disso, também inclui trabalhadores que têm o potencial de receber uma dose efetiva superior a 6 mSv por ano, ou uma dose equivalente superior a três décimas dos limites anuais de exposição estabelecidos. É necessário realizar o monitoramento individual de sua exposição à radiação e fornecer-lhes treinamento em proteção radiológica.

Categoria B

A categoria B é atribuída a todos os trabalhadores expostos a radiações ionizantes que não se enquadram na classificação da categoria A. Nessa categoria, estão incluídos os trabalhadores cujas atividades habituais envolvem níveis de radiação ionizante abaixo de 1/10 dos limites anuais estabelecidos pela CNEN.

2.4.5 Classificação de áreas

A classificação de áreas é um aspecto fundamental da proteção radiológica. Essa classificação é estabelecida por normas regulamentadoras, como a CNEN NN-3.01, e tem como objetivo garantir a proteção adequada contra a exposição à radiação. As áreas são classificadas em três categorias principais: área livre, área supervisionada e área controlada.

Área Livre: Essa é uma área onde o débito de dose e o risco de contaminação por materiais radioativos são baixos o suficiente para garantir que a proteção radiológica para os trabalhadores seja comparável à proteção exigida para o público em geral. Em outras palavras, é uma área em que não são necessárias medidas especiais de proteção radiológica ocupacional.

Área Supervisionada: Nessa área, não existem barreiras de proteção física, mas a presença e a exposição dos trabalhadores são monitoradas para garantir que a dose de radiação não ultrapasse determinados limites estabelecidos pelas normas. Para exposição ocupacional, uma zona vigiada é definida para doses efetivas anuais que variam de 2 mSv/ano a 6 mSv/ano.

Área Controlada: Essa é uma área é aquela em que existem barreiras de proteção para garantir que a dose de radiação não ultrapasse os limites estabelecidos. Somente pessoas autorizadas podem ter acesso a essa área. A dose efetiva anual para trabalhadores ocupacionalmente expostos em uma área controlada não deve ultrapassar 6 mSv/ano.

2.4.6 Fatores de Proteção Radiológica: distância, blindagem, tempo

Em relação aos cuidados de proteção radiológica, Tauhata *et al.* (2014) estabelece que as radiações externas podem ser controladas ao considerar os seguintes parâmetros: distância, tempo e blindagem (barreira).

Distância: A distância entre as fontes de radiação e as pessoas expostas desempenha um papel significativo na redução da exposição à radiação. No caso de uma fonte pontual, a taxa de dose segue a "lei do inverso do quadrado". Essa lei estabelece que a taxa de dose diminui proporcionalmente ao inverso do quadrado da distância em relação à fonte de radiação. Ao aumentar a distância, a intensidade da radiação diminui, resultando em uma menor dose absorvida pelo indivíduo. Portanto, manter uma distância segura e apropriada das fontes de radiação é uma medida importante a ser adotada.

Tempo: Dose acumulada por uma pessoa exposta a uma determinada taxa de dose em uma área de trabalho é diretamente proporcional ao tempo em que ela permanece nessa área. Isso significa que quanto mais tempo uma pessoa passa exposta à radiação, maior será a dose acumulada.

Para controlar a dose acumulada, é importante limitar o tempo de permanência em áreas de trabalho onde existem materiais radioativos ou fontes de radiação. Dependendo da tarefa a ser realizada, podem ser empregados procedimentos de redução da dose do indivíduo ocupacionalmente exposto (IOE). Dois recursos comumente utilizados são o aumento da distância entre o IOE e a fonte de radiação, bem como a introdução de materiais de blindagem entre o IOE e a fonte.

Blindagem: O uso de barreiras de blindagem é uma maneira eficaz de redução da exposição às radiações ionizantes. Essas barreiras, feitas de materiais com propriedades de absorção de radiação, com materiais com alto número atômico, são projetadas para bloquear ou

atenuar a radiação emitida pelas fontes. Ao utilizar barreiras de blindagem adequadas, é possível reduzir significativamente a dose de radiação recebida pelas pessoas expostas.

2.5 LEI E NORMAS DE SEGURANÇA RADIOLÓGICA

2.5.1 Agências

As duas principais agências responsáveis pela produção de padrões e conceitos em medição e controle da radiação ionizante são a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) e a Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação (ICRU). A ICRP é uma organização internacional independente, fundada em 1928, que continua a desenvolver o Sistema Internacional de Proteção Radiológica, amplamente utilizado em todo o mundo. Esse sistema abrange normas de proteção radiológica, legislação, diretrizes, programas e práticas em radioproteção (ICRP, 2023) (FREITAS, 2016) (ICRU, 2023).

Entre os documentos mais relevantes emitidos pela ICRP para a área de radioterapia, destacam-se as publicações ICRP 26, de 1977, e ICRP 60, de 1990. Esses documentos estabelecem grandezas radiológicas, suas relações e métodos de medição, dentro das limitações conceituais da época. A ICRP 60 representa uma atualização da ICRP 26, abordando a questão da semelhança entre os nomes de algumas grandezas (ICRP, 2007) (FREITAS, 2016).

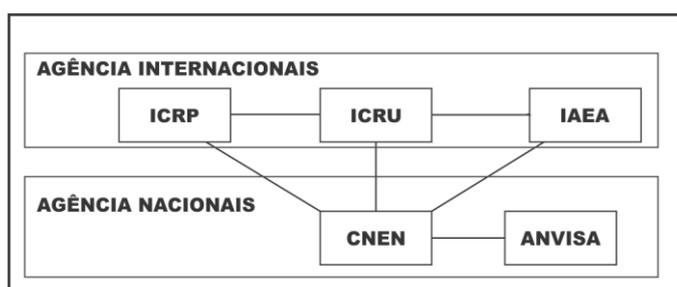
A ICRU, por sua vez, tem como principal objetivo o desenvolvimento de recomendações internacionais relacionadas às quantidades e unidades de radiação e radioatividade, assim como aos procedimentos adequados para medição e aplicação dessas quantidades em diversas áreas, como radiodiagnóstico, radioterapia, medicina nuclear, proteção contra radiações, atividades industriais e ambientais. A ICRU estabelece as unidades, enquanto a ICRP recomenda como essas unidades devem ser utilizadas para a proteção radiológica (Tauhata *et al.*, 2014) (ICRU, 2020).

A Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) é uma organização internacional autônoma que busca promover o uso pacífico e seguro da energia atômica em todo o mundo (IAEA, 2023). A IAEA publicou um documento intitulado "Categorization of Radioactive Sources", que estabelece quais fontes radioativas devem ser projetadas, fabricadas e testadas de acordo com a norma ISO adequada ou norma equivalente nacional para atender aos requisitos de segurança. Além disso, as fontes devem ser testadas quanto a vazamentos de acordo com a norma ISO apropriada e devem possuir um certificado válido de teste de vazamento. A norma ISO-7205 (1986) é específica para o armazenamento de fontes e estabelece aspectos

relacionados ao projeto, construção e uso das sondas para garantir a segurança adequada das pessoas ao redor. A norma ISO 2919:2012 estabelece um sistema de classificação para fontes radioativas seladas com base no desempenho dos testes e especifica os requisitos gerais.

No Brasil, as normas para medição e controle de radiação ionizante são fundamentadas nas recomendações da IAEA e nos relatórios da ICRP e da ICRU. O órgão brasileiro responsável por esses padrões e conceitos é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que possui um papel legal também como órgão regulador. A Figura 2.6 ilustra a relação entre a agência nacional com as internacionais.

Figura 2.6 - Agências Internacionais e Nacionais



Fonte: Freitas (2016, p.5).

2.5.2 Regulamentação no Brasil

Tendo em conta a magnitude de uso de fontes radioativas na prospecção petrolífera, no Brasil, a regulamentação, incluindo o licenciamento das empresas para sua utilização, é feito pela CNEN que através de suas normas gerais e regulamentos específicos, determina ações e procedimentos a serem adotados. No Brasil, a norma específica para a perfilagem de poço de petróleo é Resolução nº 252, de 11 de novembro de 2019. Essa norma foi aprovada pela CNEN que aprovou a Norma CNEN NN-6.07, que estabelece os requisitos de segurança e proteção radiológica para perfilagem de poços. Além disso, essa norma complementa as já existentes:

- Norma CNEN NN-3.01 março/2014 - Diretrizes básicas de proteção radiológica;
- Norma CNEN NN-6.02 abril/2014 - Licenciamento de Instalações Radiativas
- Norma CNEN NE-3.02 agosto/1988 - Serviços de Radioproteção
- Norma CNEN NN-7.01 março/2013 - Certificação da Qualificação de Supervisores de Proteção Radiológica
- Norma CNEN NE-5.01 agosto/1988 - Transporte de Materiais Radioativos

A CNEN é um órgão superior de planejamento encarregado pela fiscalização, licenciamento e regulamentação das normas em radioproteção. A CNEN prolonga-se em

pesquisas e desenvolvimento, dispõe de material didático próprio e busca um uso cada vez mais amplo e seguro das técnicas do setor nuclear. Seu foco é assegurar os benefícios da energia nuclear a um número cada vez maior de brasileiros, sempre com segurança na operação dos materiais e equipamentos radioativos (CNEN, 2015).

A Norma CNEN NE-3.01 de 1988, que trata de Diretrizes Básicas de Radioproteção, foi baseada nos documentos da ICRP 26, sendo que houve problemas relacionados à determinação de algumas grandezas devido à semelhança entre os nomes. Ainda há problemas com a tradução de normas internacionais, como no caso da grandeza Dose Equivalent do ICRP 26, que foi traduzida para como ‘Dose Equivalente’, ao invés de ‘Equivalente de Dose’. Como agravante na ICRP 60, foi introduzido o conceito de grandeza Equivalent Dose, ainda não adotado em norma brasileira, mas cuja tradução deve ser ‘Dose Equivalente’. Isto obrigará a CNEN a modificar o nome da grandeza anterior ou criar uma tradução diferente para esse novo conceito (TAUHATA *et al.*, 2014).

2.5.3 Normas de proteção radiológica

A atividade de perfilagem, que envolve o uso de fontes radioativas, apresenta riscos em todo o processo, desde o armazenamento até a realização do trabalho. Por isso, é importante que cada etapa seja realizada de acordo com as normas estabelecidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). A CNEN é uma entidade autárquica federal subordinada ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC). Foi criada em 1956 e possui sua estrutura definida pela Lei 4.118, de 27 de agosto de 1962, com o objetivo de promover a política nacional de energia nuclear.

No âmbito da radioproteção, a CNEN estabelece normas e regulamentos, além de exercer a função de regulamentar, licenciar e fiscalizar a produção e utilização da energia nuclear no Brasil. Além disso, a CNEN dedica-se a investir em pesquisa e desenvolvimento, com o objetivo de promover o uso seguro e abrangente das técnicas do setor nuclear. A CNEN possui normas que estabelecem diretrizes para a classificação de áreas em relação à proteção radiológica. Essas normas são apresentadas a seguir.

2.5.3.1 Norma CNEN NN-3.01: Diretrizes básicas de proteção radiológica

A Norma CNEN NN-3.01 estabelece os requisitos básicos de proteção radiológica das pessoas em relação à exposição à radiação ionizante. Ela é aplicada em todo o envolvimento de

fontes radioativas nas práticas de manuseio, produção, posse e a utilização de fontes, bem como o transporte, o armazenamento e a deposição de materiais radioativos, abrangendo todas as atividades relacionadas que possam envolver exposição à radiação. A norma se aplica não só às práticas como também às ações de intervenção, como aquelas decorrentes de emergências, que requeiram uma ação protetora para reduzir ou evitar as exposições à radiação.

A Norma CNEN NN-3.01 define as diretrizes básicas de proteção radiológica e estabelece critérios para a classificação de áreas. Ela determina os valores limites de dose efetiva anual para trabalhadores ocupacionalmente expostos e para o público em geral. Além disso, a norma estabelece critérios para a classificação de áreas, como área livre, área supervisionada e área controlada, visando a proteção radiológica adequada.

2.5.3.2 Norma CNEN NE-3.02: Serviços de radioproteção

A norma CNEN NE-3.02, publicada em 1988, estabelece os requisitos essenciais para a qualificação do pessoal, equipamentos, funcionamento e estrutura dos Serviços de Radioproteção em instalações radioativas e nucleares. Essa norma detalha os controles e registros que devem ser realizados em relação às fontes de radiação, indivíduos ocupacionalmente expostos, áreas controladas, meio ambiente, população, rejeitos radioativos, medidores de radiação e programas de treinamento.

O objetivo dessa norma é estabelecer os requisitos necessários para a implantação e o funcionamento dos Serviços de Radioproteção, aplicando-se tanto às Instalações Nucleares quanto às Instalações Radiativas. Ela abrange todas as estruturas do serviço de proteção, incluindo pessoal, instalações e equipamentos. Além disso, a norma trata das qualificações dos técnicos, sejam eles de nível superior, médio ou auxiliares. Também descreve as atividades do serviço de radioproteção, como controle de áreas, controle dos trabalhadores, controle do meio ambiente e controle das fontes de radiação e rejeitos.

2.5.3.3 Norma CNEN NE-5.01: Transporte de material radioativo

A norma CNEN NE-5.01 estabelece requisitos de radioproteção e segurança para o transporte de materiais radioativos. Seu objetivo principal é garantir um nível adequado de controle da exposição de pessoas, bens e meio ambiente à radiação ionizante durante o transporte desses materiais. A norma abrange diversos aspectos relacionados ao transporte de

materiais radioativos e estabelece requisitos específicos para garantir a segurança em todas as etapas do processo.

Além da CNEN NE-5.01, existem outras normas aplicáveis à atividade de perfilagem, como a CNEN NN-6.02, que trata do licenciamento de instalações radiativas, e a CNEN NN-7.01, que trata da certificação da qualificação de supervisores de proteção radiológica. Essas normas complementam as diretrizes de proteção radiológica e segurança para garantir a operação segura das atividades envolvendo materiais radioativos e perfilagem.

2.5.4 Lacunas e contribuições do estudo

A dosimetria pode ser realizada por meio de duas abordagens: experimental e computacional. Na abordagem experimental, as medições dos perfis de dose são feitas em modelos físicos simplificados do corpo humano. Já na abordagem computacional, o transporte de radiação através de um modelo virtual do corpo é simulado em um ambiente de computador, registrando a deposição de energia resultante nas estruturas internas do corpo (TRINDADE e CAMPOS, 2011).

As quantidades dosimétricas calculadas são essenciais para avaliar o risco de indivíduos expostos a fontes externas, como os nêutrons, que são encontrados em diversas áreas de atividade humana, incluindo a exploração de poços de petróleo (IAEA, 2005; CNEN; ICRP).

Perante esse cenário, é evidente a escassez de dados sobre a exposição ocupacional à raios ionizantes, durante a perfilagem de poços de petróleo, bem como a exposição e distribuição do isótopo radioativo $^{241}\text{Am-Be}$ em diferentes cenários de trabalho. A modelagem computacional desempenha um papel importante para preencher essas lacunas de conhecimento.

A modelagem computacional requer consideração de diversos fatores, como a geometria do poço, a composição do solo e da rocha circundante, os materiais de proteção utilizados e as atividades específicas realizadas durante a perfilagem. Além disso, é importante levar em conta a variação das condições de trabalho, que dependem de fatores como o tipo de poço, a localização geográfica e as práticas operacionais.

Este estudo tem o potencial de contribuir para a avaliação de riscos associados à exposição a isótopos radioativos. Com base nos resultados da modelagem computacional, é possível identificar práticas operacionais que resultam em menor exposição ocupacional aos isótopos radioativos. Isso pode levar ao desenvolvimento de procedimentos e diretrizes de trabalho mais seguros, reduzindo o tempo de exposição. Além disso, pode contribuir para o

desenvolvimento de medidas de proteção, permitindo o projeto de equipamentos de proteção adequados e a implementação de práticas de segurança específicas.

2.5.5 Modelagem computacional

A modelagem computacional permite simular o transporte da radiação ionizante, calcular níveis de exposição e identificar medidas de proteção adequadas. Suas vantagens incluem a realização de estudos detalhados, a não exposição direta dos trabalhadores a riscos reais e a capacidade de analisar diferentes cenários e condições operacionais. No entanto, é essencial considerar a qualidade dos dados de entrada, a calibração dos modelos e as incertezas inerentes à modelagem para garantir resultados confiáveis (DE SOUZA GUIMARÃES e BARROS, 2005).

A modelagem computacional, usando o Monte Carlo, é uma técnica de simulação que pode ser utilizada para estudar o transporte de radiação ionizante em diferentes meios, incluindo o corpo humano. Nos últimos anos, ocorreram avanços significativos nos códigos de Monte Carlo, especialmente no que diz respeito às teorias de dispersão múltipla para elétrons. Esses avanços transformaram esses códigos em ferramentas poderosas para compreender todos os processos relacionados à deposição de energia da radiação em materiais (COSTA, 2009).

Os métodos de simulação numérica podem ser descritos como técnicas estatísticas que utilizam números aleatórios como base para realizar simulações de situações específicas. Geralmente, os estudos de simulação apresentam vantagens em relação aos estudos experimentais. Por meio de um determinado modelo, é relativamente simples alterar diferentes parâmetros e observar sua influência no sistema em estudo (COSTA, 2009).

Os objetivos desta pesquisa são duplos: utilizar um modelo de corpo inteiro anatomicamente realista para dosimetria computacional de radiação; e usar este modelo para aproximar as distribuições de dose no corpo humano a partir da exposição à radiação externa de nêutrons. As quantidades dosimétricas calculadas neste projeto são importantes para avaliar o risco dos indivíduos expostos a fontes externas de nêutrons que são encontradas em atividade humana, como durante a perfuração de poços de petróleo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO COMPUTACIONAL DE EXPOSIÇÃO POR MEIO DO CÓDIGO MCNPX2.7.0

As simulações foram realizadas com o código de transporte de radiação MCNPX (Monte Carlo N-Particle), versão 2.7.0, desenvolvido pelo Los Alamos National Laboratory (PELOWITZ, 2011). Este código é capaz de simular o transporte de radiação de partículas em diferentes meios imitando teoricamente processos estatísticos. Por meio deste código é possível modelar cenário computacional de exposição para fótons com energias de 1 keV a 100 GeV e 34 outros tipos de partículas, incluindo nêutrons, elétrons, íons leves e mais de 2000 íons pesados em uma ampla gama de energias. Além disso, o MCNPX2.7.0 oferece um extenso conjunto de bibliotecas de seções de choque e modelos físicos.

Combinado com sua versatilidade na definição de fonte, geometria e materiais, o código MCNPX2.7.0 fornece uma ferramenta eficiente para estudos relacionados à radiação. Nesse código, cada partícula é gerada em uma fonte, onde experimenta inúmeras interações de partículas e terminada em uma contagem onde os dados desejados são registrados, escapam para meio sem importância ou quando a energia da partícula é considerada não mais importante. O resultado de cada interação é determinado pelas regras físicas definidas e governadas por distribuições de probabilidade. Para cada partícula, esse processo desde o nascimento até a morte é chamado de história de partícula. Embora a trajetória de uma única partícula pareça aleatória, conforme mais e mais histórias são executadas, uma simulação MCNPX2.7.0 começa a se assemelhar estatisticamente ao mundo real.

Como mencionado anteriormente, o código MCNPX2.7.0 rastreia cada partícula gerada ao longo de sua história. Para obter um resultado estatisticamente significativo, em muitos casos, são necessárias em cada simulação uma execução da ordem de um bilhão de histórias de partículas, o que significa uma grande utilização de memória e esforço do sistema computacional. Portanto, o principal desafio no desenvolvimento de um modelo de grande escala, como um campo petrolífero, é empregar diferentes técnicas de modelagem para reduzir a variância e melhorar os desempenhos computacionais de modo que os resultados obtidos são representativos da realidade simulada.

3.2 REPRESENTAÇÃO DOS INDIVÍDUOS EXPOSTOS

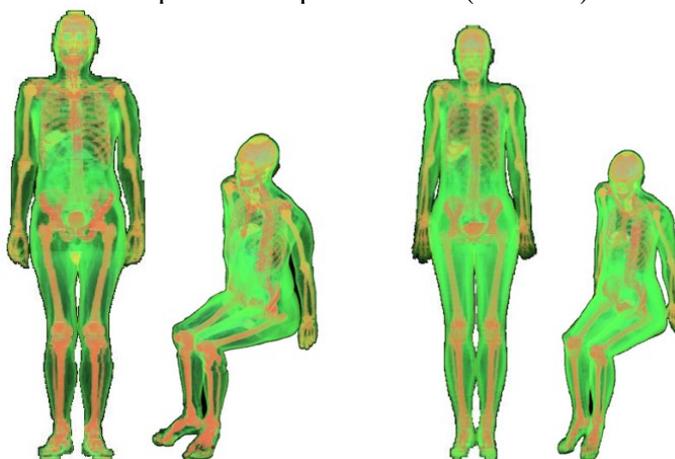
Para determinar as doses equivalentes e efetivas, que o operador de sonda e o motorista do veículo de transporte de sonda receberiam durante o processo de perfilagem, foram usados os simuladores antropomórficos computacional masculino (*Adult Male (AM)*) e feminino (*Adult Female (AF)*) de referência da publicação ICRP 110 (ICRP, 2009) nas posturas de pé e sentado (Figura 3.1). Estes simuladores possuem todos os órgãos com importância dosimétrica para o cálculo de dose efetiva recomendada pela ICRP 103 (ICRP, 2007) e, por isso, foram escolhidos por este estudo. Algumas das informações destes simuladores antropomórficos estão apresentadas na Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Características da matriz de voxel dos simuladores antropomórfico masculino e feminino de referência da publicação ICRP 110 (ICRP, 2009)

Propriedade	De pé		Sentado	
	Macho	Fêmea	Macho	Fêmea
Altura (m)	1,76	1,63	1,39	1,34
Massa (kg)	73,0	60,0	73,0	60,0
Dimensão de voxel em Z (mm)	8,0	4,84	2,0	1,16
Dimensão de voxel em X e Y (mm)	2,137	1,775	2,137	1,775
Volume de voxel (mm ³)	36,54	15,25	9,13	3,66
Número de voxels ao longo do eixo X	254	299	260	310
Número de voxels ao longo do eixo Y	127	137	370	370
Número de voxels ao longo do eixo Z	222	348	696	829

Fonte: autor (2023).

Figura 3.1- Simuladores antropomórficos masculino na postura de pé e sentado (à esquerda) e feminino na postura de pé e sentada (à direita).

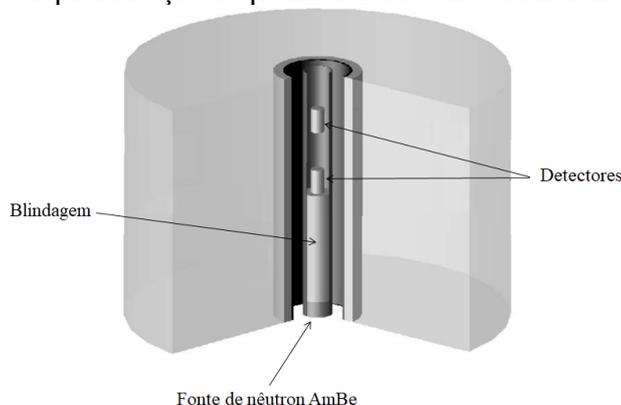


Fonte: autor (2023).

3.3 MODELAGEM DOS DETECTORES E DA FONTE DE NÊUTRON

O sistema a ser analisado no processo de perfilagem consiste em uma fonte de nêutrons $^{241}\text{Am-Be}$, posicionada no eixo de um poço localizado em uma formação calcária. A fonte de nêutron está dentro de um involucro de metal distribuída num cilindro de metal de 8,8 cm de diâmetro e 5,0 cm de comprimento contendo uma atividade inicial de 333 GBq (9 Ci) (STRUB, 2003). A cápsula da fonte fornece uma blindagem em todas as direções, exceto na parte frontal. Alinhados a fonte, há dois detectores enriquecido com 95% de ^6Li que fornecem informações de contagem de fluxo de nêutrons. A sonda tem um cilindro vazado projetado para caber na ferramenta de perfilagem que transporta a fonte para o poço. Quando não estiver em uso, o conjunto da fonte se encaixa dentro de um contêiner de armazenamento blindado que é usado para armazenamento seguro da fonte e para transportar a fonte para os locais de poços. A Figura 3.2 mostra uma visão detalhada dos principais componentes da sonda e da fonte.

Figura 3.2 - Representação esquemática da sonda com fonte de nêutron

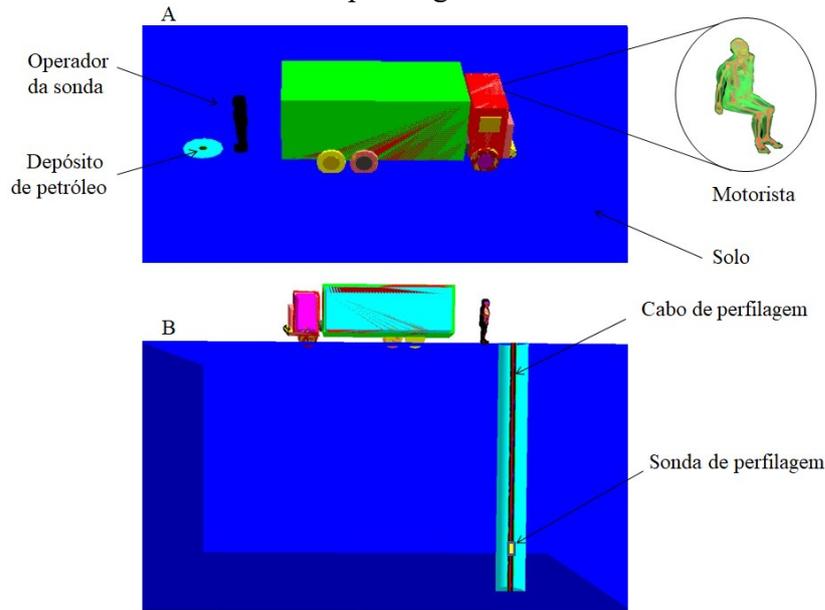


Fonte: autor (2023).

3.4 MODELAGEM DO CENÁRIO COMPUTACIONAL DE EXPOSIÇÃO

Utilizando o código MCNPX2.7.0 foi definido um modelo dos principais equipamentos da operação de perfilagem composto de um veículo para o transporte da unidade de perfilagem, cabo e a sonda de perfilagem. O veículo tem um contêiner formado por ferro e zinco e dimensões (530 x 240 x 200) cm³ e a cabine do motorista de ferro de 120 x 250 x 170 cm³ (CEI-IEC, 2006). As Figuras 3.3A e 3.3B mostram uma vista superior e interior do veículo de transporte da sonda, do poço de petróleo, do operador e das principais estruturas da sonda utilizada no processo de perfilagem. A modelagem do veículo que transporta a sonda foi necessária para avaliação mais precisa da exposição do motorista.

Figura 3.3 - Esquema de operação de perfilagem: vista externa (A) e interna (B) da unidade de perfilagem



Fonte: autor (2023).

3.5 CÁLCULOS DOSIMÉTRICOS

A energia média depositada em cada órgão e tecido dos simuladores antropomórficos AM (*Adult male*) e da AF (*Adult female*) foi determinada utilizando o tally F6 (MeV/g/partícula) do código MCNPX2.7.0. A avaliação dosimétrica apresentada por este estudo será feita com base em fatores de conversão (FC) para dose equivalente (H) e efetiva (E) normalizados pelo a atividade inicial da fonte em GBq.s. A dose equivalente de nêutrons dos órgãos e tecidos foi calculada usando o cartão DF_n iu=2 FAC=-3 ic=99 de cada tally do código MCNPX2.7.0, que converte a dose absorvida de nêutron para taxa de dose equivalente em Sv/h/partícula. As doses absorvidas simuladas para fótons foram calculadas usando o tally F6 que dá o resultado da energia depositada em MeV/g/partícula. Para converter esse resultado para J/kg multiplicou-se pelo fator de conversão: 1 MeV/g = 1,602E-10 J/kg. A dose absorvida (D_T) e a dose equivalente (H_T) foram calculadas usando as Equações 3.1 e 3.2 (ICRP, 2010), respectivamente,

$$D_T = F6 \left(\frac{\text{MeV}}{\text{g}} \right) \times 1.602E - 10 \left(\frac{\text{J}}{\text{MeV}} \right) \quad (\text{Eq. 3.1})$$

$$H_T = \sum_T w_R \times D_T \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Sendo: w_R é o fator de ponderação da radiação, cujo valor para fóton e elétron é 1 e, portanto, neste caso a dose equivalente é igual a dose absorvida, O cálculo da dose efetiva (E) foi feito utilizando a Equação 3.3 (ICRP, 2010):

$$E = \sum_T w_T \left[\frac{H_T^F + H_T^M}{2} \right] \quad (\text{Eq. 3.3})$$

em que H_T^F e H_T^M são as doses equivalentes para os órgãos e tecidos T do simulador fêmea e macho, respectivamente, w_T é um fator de ponderação tecidular derivado da radiosensibilidade relativa de cada órgão ou tecido propostos pela ICRP (ICRP, 2010).

Além do conjunto de FCs em termos da atividade inicial da fonte, neste estudo, apresentamos dados dosimétricos absolutos para um caso hipotético usando uma atividade inicial da fonte de 333 GBq (9 Ci).

Com o intuito de reduzir os erros estatísticas relativos associados à grandeza dosimétrica dos órgãos e tecidos, foram utilizadas em cada cenário um bilhão de histórias de partícula. Todas as simulações foram feitas em um computador de 16 GB de memória RAM com processador Intel Core i7 primeira geração de 2.8 GHz e sistema operacional Windows 7 de 64 bits. O tempo computacional depende da quantidade de voxel do simulador antropomórfico, mas variou entre 30 a 40 h.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste estudo foram determinadas, simultaneamente, as doses equivalentes e efetivas dos trabalhadores, feminino e masculino, envolvidos em atividades de perfilagem de poços de petróleo com uso de sondas que operam com fontes de nêutron ($^{241}\text{Am-Be}$). No mesmo cenário computacional de exposição estavam presentes o operador de sonda e o motorista do caminhão que transporta a sonda até o local da perfilagem. Todos os cenários de irradiação foram simulados com o código de transporte de radiação MCNPX2.7.0, que permite a modelagem precisa de geometrias complexas. Os trabalhadores foram representados por simuladores antropomórficos anatomicamente realístico de referência da ICRP 110 (ICRP, 2010). É importante destacar que as exposições dos trabalhadores foram avaliadas somente quando a sonda foi posicionada a partir da entrada no poço.

Os fatores de conversão para dose equivalente e efetivas foram calculados para as profundidades da fonte na entrada do poço (0 cm), 20, 40, 60, 80 e 100 cm. Devido a blindagem gerada pelas camadas de terra e da distância da fonte ao motorista (aproximadamente 8,0 m), os resultados dosimétricos foram acompanhados com erros relativos percentuais que ultrapassaram 50% para as profundidades da fonte 20 -100 cm e, por este motivo, os dados dosimétricos do motorista do veículo foram apresentados apenas para a fonte localizada na entrada do poço (0 cm), onde os erros gerados foram mais baixos. Os resultados do motorista do veículo masculino e feminino estão apresentados no Quadro 4.1 e para o operador de sonda masculino e feminino, os resultados em função da profundidade da fonte $^{241}\text{Am-Be}$, estão apresentados nos Quadros 4.2 e 4.3, respectivamente.

Como pode ser observado nos Quadros 4.2 e 4.3, os resultados de FCs diminuem drasticamente com a distância do trabalhador à fonte. Além da distância, os materiais das estruturas do veículo contribuem para a diminuição das doses. Comparativamente com os dados dosimétricos do operador de sonda, o motorista obteve valores significativamente inferiores. Como exemplo, o FC para dose efetiva calculado para o motorista foi $7,8\text{E-}07$ mSv/GBq.s e para o operador de sonda foi de $3,7\text{E-}04$ mSv/GBq.s. Isto é, cerca 474 vezes superior do motorista. Esse comportamento sugere que a determinação exata das distâncias dos trabalhadores da fonte é um aspecto importante no cálculo para uma boa estimativa dosimétrica.

Quadro 4.1- FCs para dose equivalente normalizados pela atividade inicial da fonte (em mSv/GBq.s) para a profundidade da fonte no poço de petróleo (0 cm). Entre parênteses estão os erros relativos percentuais

Órgãos	Motorista	
	Macho	Fêmea
Estômago	5,9E-07 (9,7)	8,3E-07 (7,7)
Cólon	1,7E-07 (6,8)	1,8E-07 (5,9)
Fígado	6,8E-07 (4,0)	9,4E-07 (3,8)
Pulmões	3,4E-07 (3,2)	4,9E-07 (3,3)
Esôfago	8,8E-07 (15)	1,0E-06 (16)
Cérebro	1,7E-06 (3,6)	2,1E-06 (3,6)
Medula vermelha	3,6E-06 (1,3)	2,2E-06 (1,5)
Tireoide	1,0E-06 (20)	1,5E-06 (22)
Gônadas	8,3E-07 (18)	4,9E-07 (35)
Bexiga	3,1E-07 (16)	4,9E-07 (18)
Superfície óssea	1,3E-06 (1,3)	1,6E-06 (1,5)
Demais tecidos	1,0E-07 (0,8)	9,7E-08 (1,0)
Glândulas salivares	2,7E-06 (8,4)	2,1E-06 (10)
Pele	1,7E-06 (1,1)	1,8E-06 (1,2)
Mama	9,9E-07 (17)	8,1E-07 (4,8)
Dose efetiva	7,8E-07 (8,7)	

Fonte: autor (2023).

Os resultados também mostram que a posição do órgão em relação ao solo é um aspecto importante. O operador de sonda tem 176 cm de altura e a operadora 163 cm. A distância do chão até as gônadas e bexiga destes indivíduos é cerca de 90 cm. A distância da fonte até esses órgãos é aproximadamente 135 cm, conseqüentemente, menor distância da fonte-órgão traduz em maiores exposições dos órgãos próximos do solo, principalmente, para as gônadas do homem que é externa e não possuem blindagem natural dos órgãos e de outras estruturas do corpo. Devido a menor distância dos órgãos ao solo, a maioria dos órgãos do simulador antropomórfico feminino foi mais irradiado do que os órgãos do simulador antropomórfico masculino. Para ambos os gêneros, outro aspecto importante é o tamanho e a distribuição dos órgãos no corpo, assim, órgãos de maiores volumes e distribuídos em todo corpo como, por exemplo, medula vermelha, superfície óssea e estômago foram bastante irradiados.

Quadro 4.2 - Coeficientes de conversão para dose equivalente normalizados pela atividade da fonte (em mSv/GBq.s) em função da profundidade da fonte no poço de petróleo. Entre parênteses estão os erros relativos percentuais

Órgãos	Operador masculino de sonda					
	0 cm	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm
Estômago	2,5E-04 (0,6)	1,1E-04 (0,7)	2,6E-05 (1,3)	7,2E-06 (2,3)	2,2E-06 (3,9)	1,1E-06 (5,9)
Cólon	7,3E-05 (0,3)	3,1E-05 (0,4)	7,3E-06 (0,8)	2,0E-06 (1,3)	6,7E-07 (2,2)	2,8E-07 (3,5)
Fígado	2,0E-04 (0,3)	9,2E-05 (0,4)	2,0E-05 (0,6)	5,7E-06 (1,1)	1,9E-06 (1,8)	7,8E-07 (2,8)
Pulmões	1,9E-05 (0,3)	8,7E-06 (0,4)	1,9E-06 (0,7)	5,3E-07 (1,3)	1,8E-07 (2,1)	7,7E-08 (3,2)
Esôfago	1,3E-04 (1,3)	6,3E-05 (1,7)	1,3E-05 (3,1)	3,8E-06 (5,5)	1,3E-06 (9,4)	4,3E-07 (15)
Cérebro	1,0E-04 (0,4)	6,5E-05 (0,5)	1,3E-05 (0,9)	3,8E-06 (1,5)	1,3E-06 (2,5)	5,1E-07 (3,9)
Medula óssea vermelha	2,0E-03 (0,1)	4,9E-04 (0,1)	1,2E-04 (0,2)	3,4E-05 (0,4)	1,1E-05 (0,6)	4,4E-06 (0,9)
Tireoide	2,2E-04 (1,7)	1,1E-04 (2,1)	2,0E-05 (3,7)	8,1E-06 (6,2)	2,2E-06 (11)	1,5E-06 (16)
Gônadas	4,0E-04 (0,8)	1,4E-04 (1,1)	3,6E-05 (1,9)	1,1E-05 (3,3)	3,1E-06 (5,4)	1,2E-06 (8,3)
Bexiga	4,1E-04 (0,7)	1,4E-04 (1,0)	3,3E-05 (1,8)	8,3E-06 (3,2)	2,7E-06 (5,2)	1,2E-06 (8,1)
Superfície óssea	7,1E-04 (0,1)	1,8E-04 (0,1)	4,2E-05 (0,2)	1,2E-05 (0,4)	4,0E-06 (0,6)	1,6E-06 (0,9)
Demais tecidos	1,2E-05 (0,1)	3,6E-06 (0,1)	8,6E-07 (0,1)	2,5E-07 (0,3)	8,1E-08 (0,4)	3,2E-08 (0,7)
Glândulas salivares	1,7E-04 (0,8)	1,1E-04 (0,9)	2,6E-05 (1,6)	7,5E-06 (2,7)	2,6E-06 (4,5)	9,4E-07 (7,0)
Pele	1,2E-04 (0,1)	3,7E-05 (0,1)	9,5E-06 (0,2)	2,9E-06 (0,4)	9,7E-07 (0,6)	3,8E-07 (1,0)
Mama	1,4E-04 (1,1)	8,1E-05 (1,3)	2,0E-05 (2,2)	5,8E-06 (3,7)	2,0E-06 (6,1)	8,3E-07 (9,8)

Fonte: autor (2023).

Quadro 4.3 - Coeficientes de conversão para dose equivalente normalizados pela atividade da fonte (em mSv/GBq.s) em função da profundidade da fonte no poço de petróleo. Entre parênteses estão os erros relativos percentuais

Órgãos	Operador feminino de sonda					
	0 cm	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm
Estômago	3,8E-04 (0,6)	1,8E-04 (0,7)	4,0E-05 (1,3)	1,1E-05 (2,4)	3,9E-06 (3,9)	1,5E-06 (6,2)
Cólon	1,1E-04 (0,3)	4,6E-05 (0,4)	1,1E-05 (0,8)	3,1E-06 (1,3)	1,0E-06 (2,3)	4,0E-07 (3,5)
Fígado	3,1E-04 (0,3)	1,4E-04 (0,4)	3,2E-05 (0,7)	8,9E-06 (1,2)	3,1E-06 (1,9)	1,2E-06 (3,0)
Pulmões	3,1E-05 (0,3)	1,4E-05 (0,4)	3,1E-06 (0,7)	8,9E-07 (1,3)	3,1E-07 (2,1)	1,2E-07 (3,4)
Esôfago	2,0E-04 (1,3)	9,2E-05 (1,7)	2,0E-05 (3,1)	5,0E-06 (5,6)	1,9E-06 (9,1)	8,8E-07 (15)
Cérebro	1,8E-04 (0,4)	1,2E-04 (0,5)	2,5E-05 (0,8)	7,4E-06 (1,4)	2,6E-06 (2,3)	1,0E-06 (3,6)
Medula óssea vermelha	1,5E-03 (0,1)	4,1E-04 (0,1)	9,8E-05 (0,2)	2,8E-05 (0,4)	9,3E-06 (0,6)	3,7E-06 (1,0)
Tireoide	3,8E-04 (1,7)	2,0E-04 (2,0)	4,4E-05 (3,7)	1,5E-05 (6,2)	3,9E-06 (11)	1,9E-06 (17)
Gônadas	2,1E-04 (1,7)	6,6E-05 (2,5)	1,5E-05 (4,5)	3,7E-06 (8,2)	1,3E-06 (14)	3,9E-07 (21)
Bexiga	7,4E-04 (0,6)	2,8E-04 (0,9)	7,0E-05 (1,6)	1,9E-05 (2,8)	6,3E-06 (4,6)	2,5E-06 (7,4)
Superfície óssea	1,1E-03 (0,1)	3,0E-04 (0,1)	7,2E-05 (0,2)	2,1E-05 (0,4)	6,8E-06 (0,6)	2,7E-06 (1,0)
Demais tecidos	1,5E-05 (0,1)	4,7E-06 (0,1)	1,1E-06 (0,2)	3,2E-07 (0,3)	1,0E-07 (0,5)	4,1E-08 (0,8)
Glândulas salivares	2,2E-04 (0,9)	1,5E-04 (1,0)	3,4E-05 (1,6)	1,0E-05 (2,8)	3,0E-06 (4,7)	1,3E-06 (7,2)
Pele	1,6E-04 (0,1)	5,3E-05 (0,1)	1,3E-05 (0,2)	4,0E-06 (0,4)	1,4E-06 (0,7)	5,4E-07 (1,1)
Mama	1,6E-04 (0,4)	9,5E-05 (0,4)	2,3E-05 (0,7)	6,8E-06 (1,2)	2,3E-06 (2,1)	9,0E-07 (3,2)

Fonte: autor (2023).

Os modelos de simuladores antropomórficos usados neste estudo contêm todos os órgãos, tecidos e ossos importantes, e a combinação do programa MCNPX2.7.0 com os simuladores antropomórficos permitem o cálculo das doses para cada um dos órgãos do corpo. As doses de órgãos calculadas são ponderadas pelos fatores de ponderação de tecidos utilizados pelo ICRP para obtenção da dose efetiva, que é a quantidade avaliada para cada trabalhador neste caso. No Quadro 4.4 estão apresentados os FCs para dose efetiva para os operadores de sonda derivados da média dos órgãos dos simuladores antropomórficos masculino e feminino obtidos dos dados dos Quadros 4.2 e 4.3.

Quadro 4.4 - FCs para dose efetiva para em função da profundidade da fonte no poço de petróleo. Entre parênteses estão os erros relativos percentuais

Profundidade da fonte no poço (cm)	Dose efetiva (mSv/GBq.s)
0	3,7E-04 (0,1)
20	1,2E-04 (0,7)
40	2,9E-05 (1,3)
60	8,4E-06 (2,3)
80	2,7E-06 (3,9)
100	1,1E-06 (6,0)

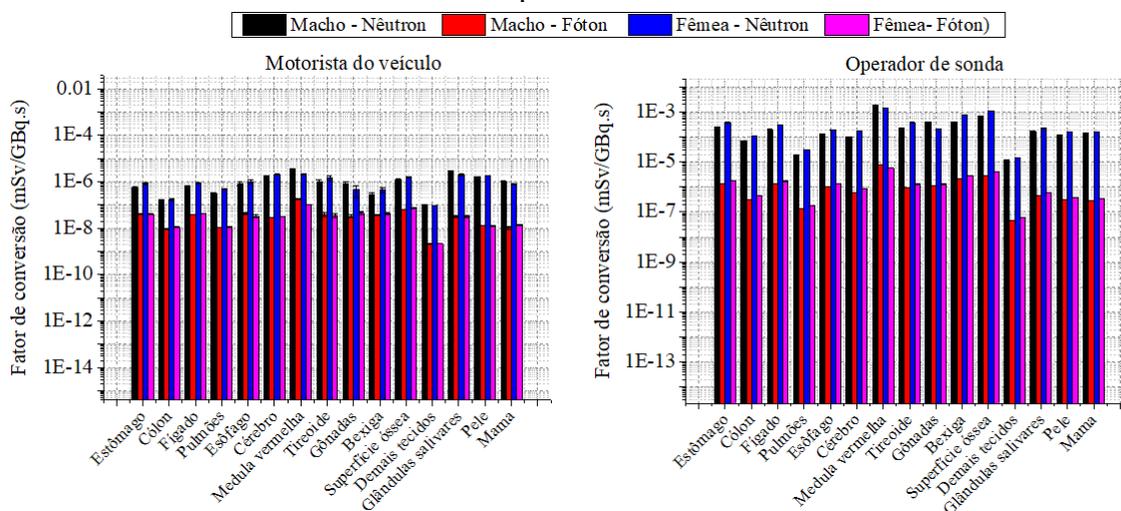
Fonte: autor (2023).

Como esperado e comprovado, os maiores resultados foram calculados para a fonte na entrada do poço (0 cm). Neste caso, não houve blindagem gerada pelas camadas de terra e, portanto, a intensidade da radiação que chega nos trabalhadores foi maior. Para todas as situações, os cálculos mostram que os FCs diminuem à medida que a profundidade da fonte no poço aumenta. Outra informação importante é que os cálculos foram realizados assumindo que os operadores foram expostos pela parte frontal do corpo durante todo o período de exposição, que acreditamos ser a postura mais crítica.

A Figura 4.1 mostra os resultados dos FCs de nêutrons e fótons para o motorista do veículo que transporta a sonda e para o operador de sonda. Em todos os casos simulados, observa-se que os nêutrons foram as partículas que mais contribuíram para a exposição dos indivíduos. A interpretação dos resultados para irradiações de nêutrons é mais complexa e sutil do que a de fótons. Além das diferenças anatômicas típicas, entre os simuladores masculino e feminino, outra característica que acreditamos impactar nas diferenças dosimétricas é o tamanho do voxel. Assim, parte destas diferenças pode ser devido ao efeito combinado das diferentes resoluções espaciais e das proximidades dos órgãos do simulador antropomórfico feminino com o solo. Para a situação mais crítica, a

fonte na entrada do poço, os resultados para os simuladores antropomórficos feminino foram, em média, superiores em 39 e 29% para nêutrons e fótons, respectivamente.

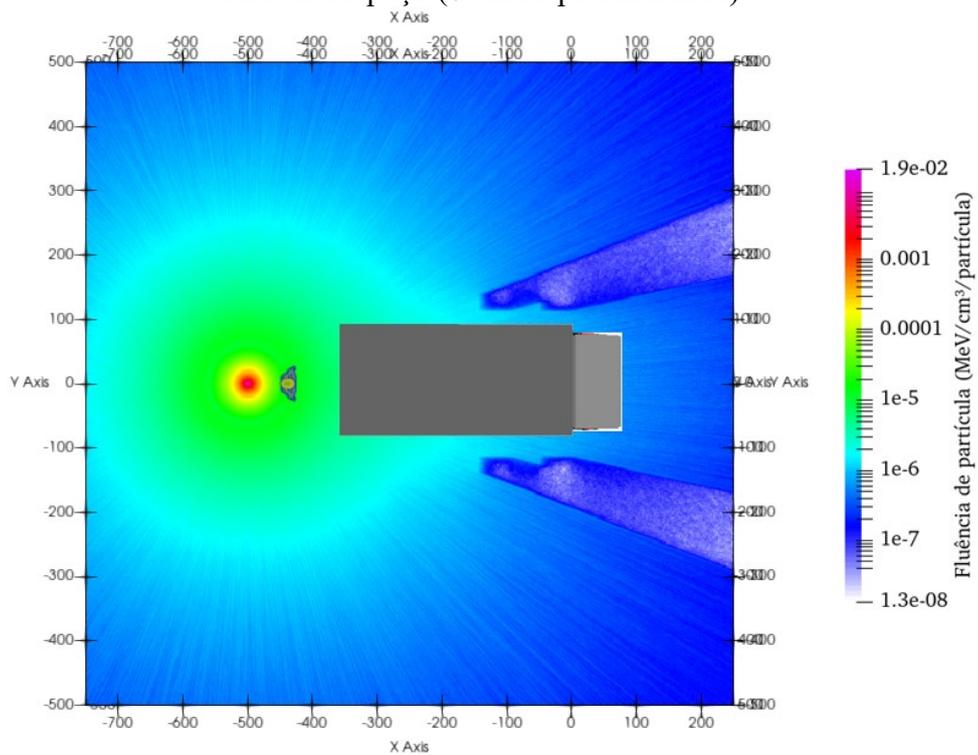
Figura 4.1 - Contribuição de nêutrons e fótons sobre as doses de radiação do motorista do veículo e do operador de sonda para a sonda posicionada na entrada no poço de petróleo



Fonte: autor (2023).

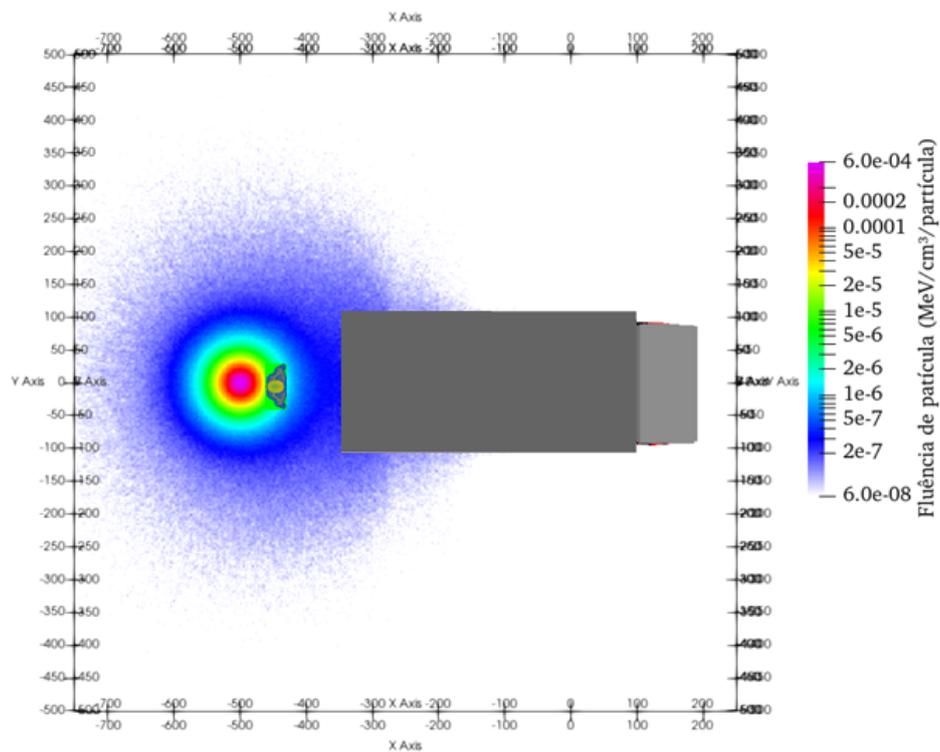
Neste estudo, foi utilizado o cartão *mesh tally* do código MCNPX2.7.0 para determinar a fluência de partículas (em MeV/cm³/partícula) na superfície do solo em função da profundidade da fonte no poço de petróleo. Os resultados para as profundidades 0, 20, 40, 60, 80 e 100 cm estão apresentados nas Figuras 4.2 a 4.6, respectivamente. Como pode ser observado, a intensidade da radiação diminui à medida que a profundidade da fonte aumenta. Devido a blindagem natural gerada pelas camadas de terra e da distância do epicentro da fonte, a exposição do motorista é baixa. Panorama diferente foi encontrado para a operadora de sonda, já que esta encontra-se apenas a 1m do contorno do poço e, por isso, foi a profissional mais irradiada.

Figura 4.2 - Fluência de partícula na superfície do solo com a fonte localizada na entrada do poço (0 cm de profundidade)



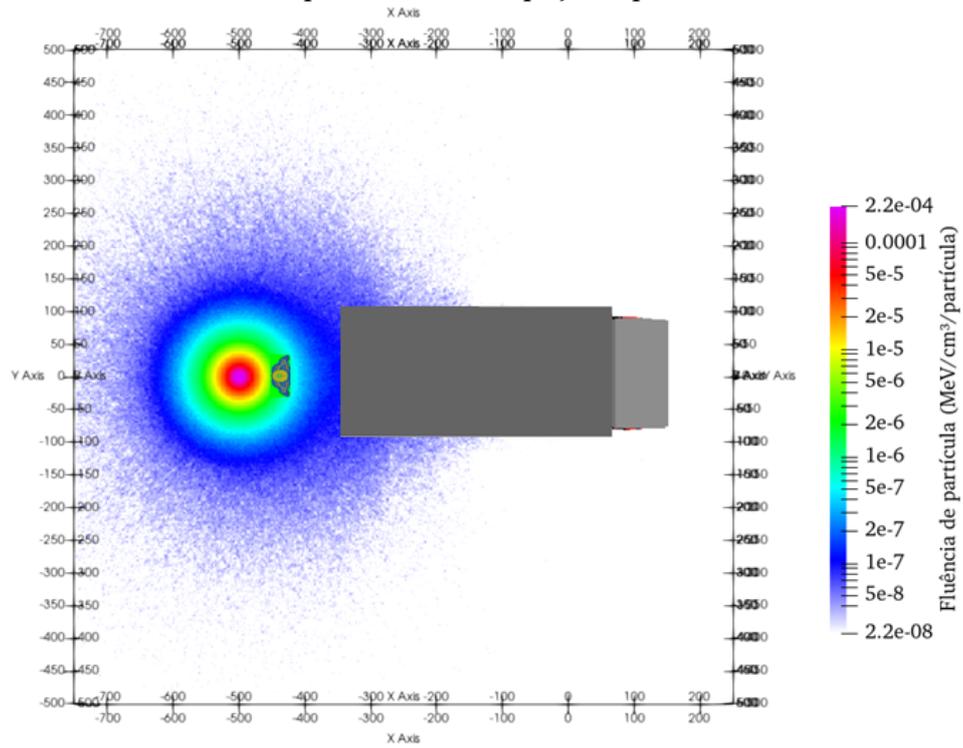
Fonte: autor (2023).

Figura 4.3 - Fluência de partícula na superfície do solo com a fonte localizada na a 20 cm de profundidade no poço de petróleo



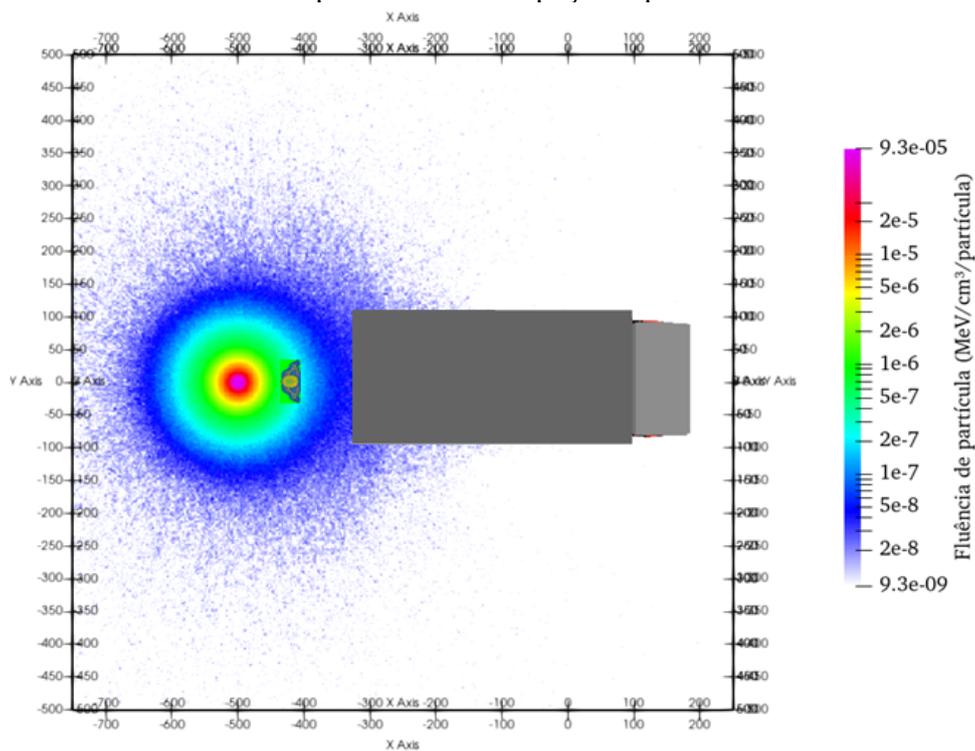
Fonte: autor (2023).

Figura 4.4 - Fluência de partícula na superfície do solo com a fonte localizada na a 40 cm de profundidade no poço de petróleo



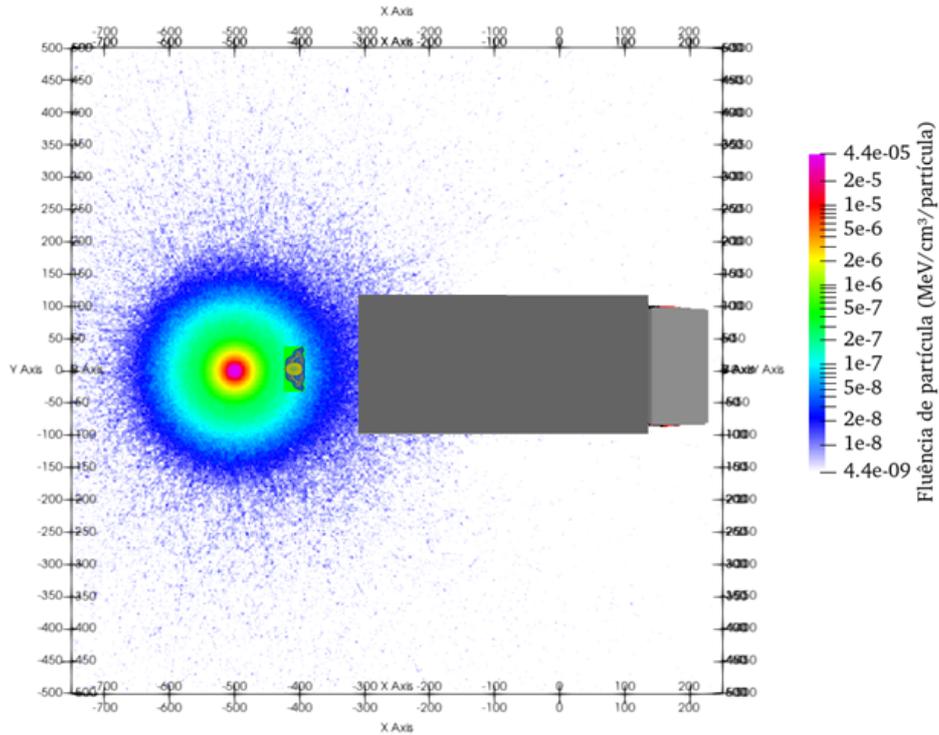
Fonte: autor (2023).

Figura 4.5 - Fluência de partícula na superfície do solo com a fonte localizada na a 60 cm de profundidade no poço de petróleo



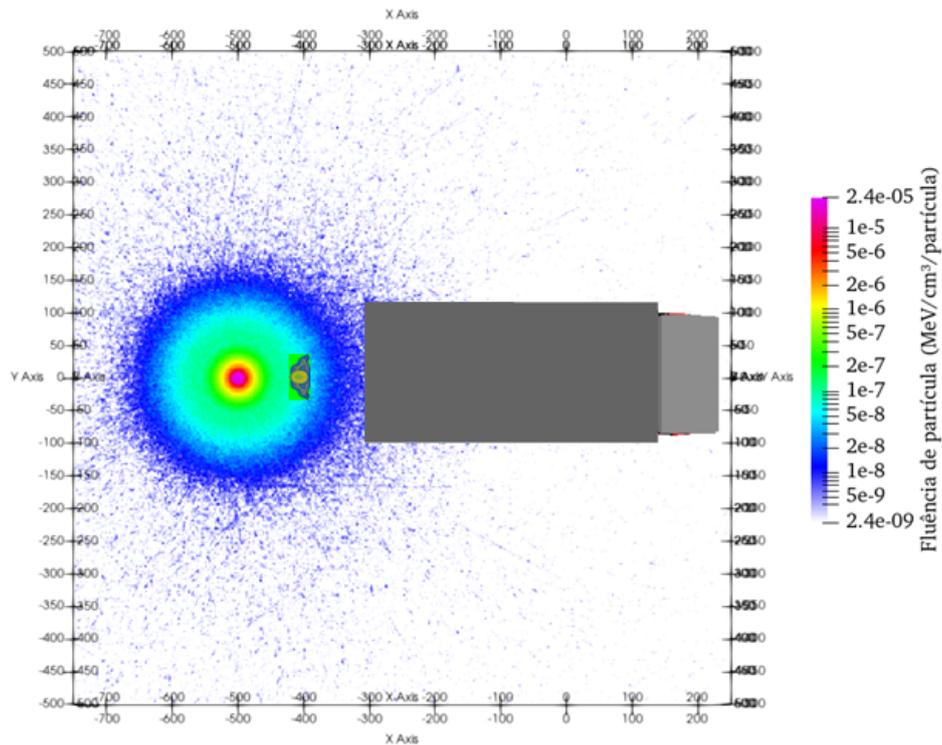
Fonte: autor (2023).

Figura 4.6 - Fluência de partícula na superfície do solo com a fonte localizada na a 80 cm de profundidade no poço de petróleo



Fonte: autor (2023).

Figura 4.7 - Fluência de partícula na superfície do solo com a fonte localizada na a 100 cm de profundidade no poço de petróleo



Fonte: autor (2023).

Este estudo assumiu um caso hipotético. Foi considerado o cenário de exposição mais crítico para os trabalhadores, ou seja, quando a fonte de radiação estava posicionada na entrada do poço (profundidade da fonte de 0 cm). Além desta consideração, foi definida uma atividade típica da fonte de 333 GBq e 10 minutos de exposição. Aplicando estes dados nos resultados dos FCs de dose equivalente e de dose efetiva para o motorista do veículo (Quadro 4.1) e do operador de sonda (Quadros 4.2 e 4.3), obtém-se os valores dosimétricos absolutos, que estão apresentados na Quadro 4.5.

Quadro 4.5 - Dose equivalente e efetiva para a fonte localizada na entrada do poço de petróleo (profundidade 0 cm). Entre parênteses estão os erros relativos percentuais

Órgãos e tecidos	Motorista do veículo		Operador de sonda	
	Macho	Fêmea	Macho	Fêmea
Estômago	1,2E-01 (9,7)	1,7E-01 (7,7)	5,0E+01(0,6)	7,6E+01 (0,6)
Cólon	3,4E-02 (6,8)	3,5E-02 (5,9)	1,5E+01 (0,3)	2,2E+01 (0,3)
Fígado	1,4E-01 (4,0)	1,9E-01 (3,8)	4,1E+01 (0,3)	6,2E+01 (0,3)
Pulmões	6,8E-02 (3,2)	9,7E-02 (3,3)	3,9E+00 (0,3)	6,2E+00 (0,3)
Esôfago	1,8E-01 (15)	2,1E-01 (16)	2,5E+01 (1,3)	3,9E+01 (1,3)
Cérebro	3,4E-01 (3,6)	4,2E-01 (3,6)	2,0E+01 (0,4)	3,6E+01 (0,4)
Medula vermelha	7,3E-01 (1,3)	4,4E-01 (1,5)	3,9E+02 (0,1)	3,0E+02 (0,1)
Tireoide	2,1E-01 (20)	2,9E-01(22)	4,3E+01 (1,7)	7,6E+01 (1,7)
Gônadas	1,7E-01 (18)	9,9E-02 (35)	8,1E+01 (0,8)	4,1E+01 (1,7)
Bexiga	6,2E-02 (16)	9,8E-02 (18)	8,2E+01 (0,7)	1,5E+02 (0,6)
Superfície óssea	2,6E-01 (1,3)	3,2E-01 (1,5)	1,4E+02 (0,1)	2,2E+02 (0,1)
Demais tecidos	2,0E-02 (0,8)	1,9E-02 (1,0)	2,4E+00 (0,1)	3,0E+00 (0,1)
Glândulas salivares	5,4E-01 (8,4)	4,2E-01 (10)	3,5E+01 (0,8)	4,4E+01 (0,9)
Pele	3,3E-01 (1,1)	3,6E-01 (1,2)	2,5E+01 (0,1)	3,3E+01 (0,1)
Mama	2,0E-01 (17)	1,6E-01 (4,8)	2,9E+01 (1,1)	3,2E+01 (0,4)
Dose efetiva	1,6E-01 (8,7)		7,3E+01 (0,6)	

Fonte: autor (2023).

Observando os valores da Quadro 4.5, nota-se que os órgãos do motorista que receberam alta quantidade de dose, em comparação com outros órgãos, foram a medula vermelha (0,73 mSv/macho), glândulas salivares (0,54 mSv/macho) e pele (0,36 mSv/fêmea). Para o operador de sonda, os órgãos mais irradiados foram a medula vermelha (390 mSv/macho), superfície óssea (220 mSv/fêmea) e bexiga (150 mSv/fêmea).

A ICRP é uma organização que estabelece diretrizes e recomendações para a proteção radiológica. Com o objetivo de proteger os indivíduos contra os efeitos prejudiciais da exposição à radiação ionizante, a ICRP estabelece um limite de dose para indivíduo ocupacionalmente exposto (IOE), ou seja, para pessoas que trabalham com

fontes de radiação ionizante. Para IOE, a dose efetiva anual é de 20 mSv, calculada em média para um período definido de 5 anos (100 mSv em 5 anos) com a condição de que a dose efetiva não deve exceder 50 mSv em um único ano. Conforme mostrado na Tabela 4.5, a exposição dos trabalhadores durante 10 minutos com uma atividade inicial da fonte de 333GBq, resulta em uma dose efetiva de 0,16 e 73 mSv para o motorista e operador de sonda, respectivamente. Neste cenário, a dose efetiva foi obtida para única exposição, mesmo assim, o resultado do operador de sonda foi superior ao limite de dose recomendado pelo a ICRP para exposição ocupacional. Portanto, os resultados dosimétricos para os profissionais tendem aumentar com o aumento do número de atividades laborais e, por isso, este estudo recomenda a adoção de cuidados adicionais de proteção radiológica para garantir que os limites de dose não sejam ultrapassados.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi utilizado simulações de Monte Carlo para modelação de cenário computacional de exposição de profissionais envolvidos em perfilagem de poços de petróleo usando sonda de fonte de nêutrons ($^{241}\text{Am-Be}$). Foi utilizado o código de transporte de radiação MCNPX2.7.0 e uma dupla de simuladores antropomórfico, de ambos os gêneros, para representar o operador de sonda e o motorista do veículo. Foram avaliadas as exposições dos trabalhadores para diferentes profundidades da fonte no poço de petróleo. Como esperado e comprovado, os maiores resultados foram obtidos quando a fonte $^{241}\text{Am-Be}$ estava na entrada do poço e, por isso, foi considerado o cenário mais crítico. As curvas de fluência de partículas mostram que a intensidade da radiação diminui à medida que se afasta do epicentro. Por este motivo que a situação mais crítica foi para o operador de sonda que está a 1 m do poço.

Considerando o cenário mais crítico e uma atividade inicial da fonte 333GBq e um tempo de exposição de 10 minutos, concluiu-se que os órgãos mais irradiados foram a medula vermelha (0,73 mSv/macho), glândulas salivares (0,54 mSv/macho) e pele (0,36 mSv/fêmea). Para o operador de sonda, os órgãos mais irradiados foram a medula vermelha (390 mSv/macho), superfície óssea (220 mSv/fêmea) e bexiga (150 mSv/fêmea). Devido as distâncias relativas mais próximas dos órgãos ao solo e da fonte, os órgãos e tecidos do simulador antropomórfico feminino foram os mais irradiados e, conseqüentemente, contribuiu para o aumento da dose efetiva, cujos resultados foram 0,16 e 73 mSv para o motorista e operador da sonda do veículo, respectivamente. O resultado de dose efetiva para exposição única do operador de sonda mostrou que é necessário adoção de cuidados adicionais, pois ultrapassou o limiar de dose para exposição ocupacional e tende ser mais crítico com o aumento do número de atividades laborais e do tempo de exposição.

Para futuros estudos, é recomendado aprofundar a pesquisa em diferentes áreas relacionadas à radiação ionizante. Primeiramente, investigar e testar outras fontes de fótons, além daquelas já exploradas, pode oferecer novas perspectivas e aplicações em diversos campos. Além disso, desenvolver dispositivos de blindagem mais eficientes e seguros é uma área importante para a proteção dos operadores e do ambiente em situações de exposição à radiação. A ampliação da aplicação da radiação em diferentes cenários, variando o tempo de exposição e as posições dos operadores, permitirá uma melhor

compreensão dos efeitos e riscos associados, contribuindo para a segurança nas atividades que envolvam radiação ionizante. Por fim, é recomendado realizar comparações com dados experimentais obtidos a partir das diferentes abordagens estudadas, a fim de validar as conclusões e ampliar o conhecimento na área. Essas sugestões representam um caminho promissor para avançar no entendimento e na aplicação segura da radiação ionizante em diversos setores da ciência e tecnologia.

REFERÊNCIA

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. Petróleo. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/petroleo> acesso em: 18 jul. 2023.

ALMEIDA, F. S. et al. Prospecção tecnológica em brocas de perfuração em poços de petróleo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 21232–21253, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/9219/7789>. Acesso em: 17 jan. 2023.

ASSAIFE, R. F. Perfilagem durante a perfuração de poços de petróleo: estudo bibliográfico. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano. 07, Ed. 03, Vol. 04, pp. 51-80. março de 2022. ISSN: 2448-0959. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/perfuracao-depocos>, DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenhariamecanica/perfuracao-de-pocos acessado em: 16 maio 2023.

AZEVEDO, A. C. P. Radioproteção em serviços de saúde. Escola Nacional de Saúde Pública-CESTEH e Programa de Radioproteção e Dosimetria Coordenação de Fiscalização Sanitária Secretaria de Estado de Saúde do Rio de Janeiro - FIOCRUZ - Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://www.fiocruz.br/biossegurancahospitalar/dados/material10.pdf> acessado em: 18 jul. 2023.

BRASIL. Decreto nº 2.455, de 14 de janeiro de 1998. Implanta a Agência Nacional do Petróleo - ANP, autarquia sob regime especial, aprova sua Estrutura Regimental e o Quadro Demonstrativo dos Cargos em Comissão e Funções de Confiança e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 15 jan. 1998. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d2455.htm. Acesso em: 04 ago. 2023. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d2455.htm acesso em: 04 de ago. 2023

BRASIL. Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 07 ago. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19478.htm. Acesso em: 04 ago. 2023.

BRASIL. Lei nº 4.118, de 27 de agosto de 1962. Dispõe sobre a política nacional de energia nuclear, cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 28 ago. 1962. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L4118compilada.htm. Acesso em: 04 ago. 2023.

CHILIUTTI, C. A.; et al. Acción regulatoria en caso de aprisionamiento de fuentes radiactivas en operaciones de perfilaje. Trabajo X Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica “Radioprotección: Nuevos Desafíos para un Mundo en Evolución” Buenos Aires, 12 al 17 de abril, 2015 SOCIEDAD ARGENTINA DE

RADIOPROTECCIÓN. Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/093/47093525.pdf acesso em: 10 jul. 2023.

CLARKE, R. Control of low-level radiation exposure: time for a change?. **Journal of Radiological Protection**, v. 19, n. 2, p. 107, 1999. Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0952-4746/19/2/301/meta?casa_token=3GAesgZJ7M0AAAAA:1ur9BSyANGJaJ0wOows9v3eZp7UN6JVSLFsb5qi-pCQNmWY57ULmxPyP87GWDfHkNFqYwvscR6KK1s acesso em: 10 jan. 2023.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN - *Norma NN 3.01 – Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica*. Resolução 164/14, março/2014. Disponível em <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf> Acesso em: 16 maio 2023.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN - *Norma NE 3.02 – Serviços de Radioproteção*. Resolução 10/88, agosto/1988. Disponível em <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm302.pdf>. Acesso em: 16 maio 2023.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN- *Norma NE 5.01 – Transporte de material radioativo*. Resolução 013/88, agosto/1988. Disponível em <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm305.pdf>. Acesso em: 16 maio 2023.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN. *Resolução CNEN 252/19 - Requisitos de segurança e proteção radiológica para perfilagem de poços* Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm607.pdf> Acesso em 16 jul. 2023.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR- CNEN, *Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica*, Norma NN-3.01, Rio de Janeiro, 2011.

COSTA, R. M. M. C. **Estudo do campo de radiação na envolvente de instrumentação radiológica utilizada na indústria**. 2009. Tese de Doutorado. FCT-UNL. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/2568/1/Costa_2009.pdf acesso em: 8 jan. 2023.

DE CARVALHO, C. N. **Aplicação das Fontes Radioativas na Perfilagem de Poços e Aspectos de Radioproteção**. 2015. Trabalho de conclusão de curso - Departamento de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: https://arquivos.info.ufrn.br/arquivos/2015112171482a2815000b6b06e6cedba/TCC_-_2015.1_-_Camila_Nunes_de_Carvalho.pdf acesso em: 8 jan. 2023.

DE LIMA, C. J. T. **Processo de Tomada de Decisão em Projetos de Exploração e Produção de Petróleo no Brasil: Uma Abordagem Utilizando conjuntos Nebulosos**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://antigo.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/cjtlima.pdf> acesso em: 13 jan. 2023.

DE QUEIRÓS MATTOSO, Sylvio. Reflexões sobre a duração das jazidas de petróleo em função do consumo e do que pode ser feito para reduzir o consumo de petróleo. **Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade**, v. 1, n. 1, 2008. Disponível em: <https://scholar.archive.org/work/f6gvfb6werff7jabzv2ydixjk4/access/wayback/http://www.rev>

istarevinter.com.br/autores/index.php/toxicologia/article/download/11/222 acesso em: 20 maio 2023.

DE SOUZA GUIMARÃES, C.; BARROS, R. C. Modelagem computacional de problemas unidimensionais de transporte de partículas neutras em meios materiais não-multiplicativos. International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2005 Santos, SP, Brazil, August 28 to September 2, 2005 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR – ABEN ISBN: 85-99141-01-5 Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/2005/full/1908.pdf>. Acesso em: 20 maio 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE -. **Panorama do Refino e da Petroquímica no Brasil**, nov. 2018. 2019. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-/topico-412/NT%20Refino%20e%20Petroqu%3%ADmica_2018.11.01.pdf acesso em: 10 jul. 2023.

EN 62022:2007 - CEI-IEC. Installed monitors for the control and detection of gamma radiations contained in recyclable or non-recyclable materials transported by vehicles. **International Standard CEI IEC 62244**. Geneva, Switzerland, 2006. Disponível em: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/6b657a0f-7d10-484d-88d0-a99f27c0fe6d/en-62022-2007>. Acesso em: 10 jul. 2023.

FREITAS, C. D. B. **Definições de algumas grandezas físicas de radioterapia encontradas em livros, teses e dissertações**. 2016. 41 f. Monografia (Graduação em Física) – Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ucb.br:9443/jspui/bitstream/123456789/12543/1/CleideDayaneBragaFreitasTCCGraduacao2016.pdf> acesso em: 17 jun. 2023.

GOESSA, E. J. **Requisitos de segurança radiológica e segurança física em instalações de perfuração de poços de petróleo**. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização (Lato Sensu) em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas) – Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Rio de Janeiro: IRD/IAEA, 2017. Disponível em: http://moodle.ird.gov.br/ensino/images/TCCs/TCCs2017/tcc_eunicia%20joo%20goessa.pdf acesso em: 10 jul. 2023.

HEINRICH, R. A.; KLEINBACH, Merlin. Energia e Meio Ambiente. [S.l: s.n.], 2016.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA– overview. Disponível em: <https://www.iaea.org/about/overview> acessado em 18 de jul. 2023.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA, *Technical data on nucleonic gauges*, Vienna, 2005.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Viena. 2003.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION - ICRP Publication 103, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP, vol. 37(2-4), 2007.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION - ICRP Publication 110, Adult Reference Computational Phantoms. *Annals of the ICRP*, vol. 39(2), 2009.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION - ICRP Publication 116, Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. *Annals of the ICRP*, vol. 40(2-5), 2010.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION- ICRP. disponível em: <https://www.icrp.org/page.asp?id=9> acesso em 18 de jul. 2023.

INTERNATIONAL COMMITTEE FOR RADIOLOGICAL UNITS - ICRU - Mission Statement. Disponível em: <https://www.icru.org/about-icru/mission-statement/> acesso em 18 de jul. 2023.

JAHN, F. et al. *Introdução à exploração e produção de hidrocarbonetos*. Elsevier Brasil, 2012.

LIN, J. Y. et al. MCViNE - An object-oriented Monte Carlo neutron ray tracing simulation package. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 810, p. 86-99, 2016. disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215015053?casa_token=yzd-GpSwYvAAAAAA:gOONXjBn1aTRifdeF-fJebY5Z3aKIKcsIXHOXx35Ie49_ySAaPcfA4yWk3FscXs4BJsorf8_lSI acesso em: 16 jul. 2023

NERY, G. G. *Perfilagem geofísica em poço aberto – fundamentos básicos com ênfase em petróleo* – Rio de Janeiro: SBGf, 2013.

OKUNO, E. *Efeitos biológicos das radiações ionizantes. Acidente radiológico de Goiânia. Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo*. Vol.27 (77), p.185-200. 2013 <https://doi.org/10.1590/S0103-40142013000100014> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/xzD9Dgv8GPFtHkxkfbQsn4f/#:~:text=o%20monitoramento%20dos%20pacientes%20n%C3%A3o,t%C3%AAm%20nenhuma%20sequela%20desse%20tipo..> Acesso em: 16 de jul. de 2023.

PELOWITZ, D. B. MCNPX User's Manual, version 2.7.0. Report LA-CP-11-00438. Los Alamos National Laboratory, 2011.

RUSSO, G. L. et al. Cellular adaptive response to chronic radiation exposure in interventional cardiologists. [S.d.]. Disponível em: <https://academic.oup.com/eurheartj/article/33/3/408/476586>. Acesso em: 17 jan. 2023.

SANTOS, A. L. F. **Estudo da viabilidade da técnica de radioscopia industrial em inspeção de soldas de recipientes transportáveis de gás liquefeito de petróleo**. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2018. Disponível em: <https://www.metalmat.ufrj.br/index.php/br/pesquisa/producao-academica/dissertacoes/2018-1/810--734/file> acesso em: 16 jun. 2023.

SELLEY, R. C.; SONNENBERG, S. A. Geologia do Petróleo. Tradução da 3ª edição. Elsevier Brasil, 2016.

SOUZA, E. M. et al. Dose estimative in operators during petroleum wells logging with nuclear wireless probes through computer modelling; Estimativa da dose em operadores durante procedimentos de perfuração de poços de petróleo com sondas wireless nucleares através de modelagem computacional. 2011. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/21490392>. Acesso em: 15 jan. 2023.

TAUHATA, L. et al. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos - 9ª revisão novembro/2013 - Rio de Janeiro - IRD/CNEN. 345p. Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073465.pdf acesso em 02 jan. 2023.

TAUHATA, L. et al. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos—10ª revisão abril/2014. Rio de Janeiro: IRD/CNEN. 344p. Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/documentos/FundamentosCORv10.pdf> acesso em: 02 jan. 2023.

THE KEARNEY ENERGY TRANSITION INSTITUTE - **Statistical Review of World Energy**. Energy institute. 2023/72nd edition. Disponível em: <https://www.energyinst.org/statistical-review/resources-and-data-downloads> acessado em: 15 julho 2023

THOMAS, J. E. Fundamentos de engenharia de petróleo. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

TRINDADE, B. M; CAMPOS, T. P. R. Sistema computacional para dosimetria de nêutrons e fótons baseado em métodos estocásticos aplicado a radioterapia e radiologia. **Radiologia Brasileira**, v. 44, p. 109-116, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rb/a/JYXJ8QfYQpHV7rTTsVBRFGb/> acesso em: 16 jul. 2023.