

José Manuel Sucumula Diogo

**TÉCNICAS E METODOLOGIAS PARA IDENTIFICAR POTENCIAIS
INDÚSTRIAS GERADORAS DE NORM NA REPÚBLICA DE ANGOLA E
ESTIMAR SEUS IMPACTOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado para obtenção da certificação de Especialista pelo Programa de Pós-Graduação em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas do Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear.

Orientador: M. Sc. Paulo Roberto Rocha
Ferreira

Rio de Janeiro – Brasil

Instituto de Radioproteção e Dosimetria – Comissão Nacional de Energia Nuclear

Coordenação de Pós-Graduação

2017

T

553.6

D592t

Diogo, José Manuel Sucumula

Técnicas e Metodologias para Identificar Potenciais Indústrias Geradoras de NORM na República de Angola e Estimar seus Impactos / José Manuel Sucumula Diogo. Rio de Janeiro: IRD/IAEA, 2017.

XI, 71 f.: il.; tab.; 29 cm.

Orientador: M. Sc. Paulo Roberto Rocha Ferreira

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização (Lato Sensu) em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas) – Instituto de Radioproteção e Dosimetria. 2017.

Referências bibliográficas: f. 50-55

1. Exposição 2. Espectrometria gama 3. NORM 4. Mineração 5. Radioproteção I. Título

José Manuel Sucumula Diogo

**TÉCNICAS E METODOLOGIAS PARA IDENTIFICAR POTENCIAIS
INDÚSTRIAS GERADORAS DE NORM NA REPÚBLICA DE ANGOLA E
ESTIMAR SEUS IMPACTOS**

Rio de Janeiro, 27 de Setembro de 2017.

Prof. M.Sc. Paulo Roberto Rocha Ferreira – IRD/CNEN

M. Sc., Evaldo Paulo de Oliveira.

Dr. Fernando Carlos Araujo Ribeiro – IRD/CNEN

O presente trabalho foi desenvolvido no Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear, sob a orientação do Prof. M.Sc. Paulo Roberto Rocha Ferreira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde, sabedoria e inteligência na materialização desta obra,

Ao meu pai José Diogo que está no céu, Deus o proteja, com o seu raciocínio lógico, inspirou-me sempre para a busca de novos horizontes, e minha mãe, Laura Diogo, com sua jóia na fé e alegria, me presenteou sempre a esperança,

Aos meus irmãos, Marineth Diogo, Armanda Diogo, Eldfone Diogo, Adérito Diogo, Pedro Diogo e Elisandra Diogo por serem a fortaleza e esteio da minha vida,

A Direcção da Autoridade Reguladora de Energia Atómica (AREA) em especial ao Dr. Pedro Carlos Domingos Lemos (Director Geral) e o Dr. Luís Filipe Teixeira Cardoso (Director Geral Adjunto), pela oportunidade concedida,

Ao Eng. Felix Viera Lopes (LNO) por ter validado a minha candidatura, junto da AIEA,

A Agência Internacional de Energia Atómica (AIEA) pela bolsa,

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) pelo apoio e suporte,

Ao Professor M. Sc. Paulo Roberto Rocha Ferreira, pela competência com que orientou este trabalho, incansável na grande colaboração, transmitindo sempre os melhores e mais úteis ensinamentos, com paciência, lucidez e confiança, não esquecendo as críticas atempadas e construtivas, bem como, pela oportunidade de estágio na Divisão de Radioproteção Ambiental e Ocupacional – DIRAD,

Ao Professor Aucyone Augusto da Silva pelo apoio incondicional durante a minha estadia no Brasil,

Ao Dr. Fernando Ribeiro, pela orientação durante o estágio, transmitindo sempre tranquilidade e postura na sua forma simples de ensinar,

Ao Carlos Henrique, pelos apontamentos fornecidos e aulas sobre coleta de amostras ambientais, fazendo-nos perceber o quanto algumas pessoas são especiais na forma de ser e como são sempre bem vidas às suas acções,

Ao Professor Francisco Cesar Augusto da Silva pela amizade e disponibilização de uma sala para estudo,

Ao estimado M. Sc. Evaldo Paulo de Oliveira e o prezado colega Marlon da Silva Brandão Rodrigues pelas correções e sugestões,

Ao Professor Dr. Fernando Razuck e Thomas Eduardo Simões Riedel de Resende pelo auxílio prestado na aquisição de documentos migratórios,

Luana da Silva Castro pela ajuda na aquisição de livros,

A todo pessoal da área de ensino do IRD, pelo apoio prestado,

Aos colegas da AREA pelo apoio na materialização deste êxito,

A todos os professores da pós-graduação, pelo esforço e dedicação no processo de ensino para edificar as qualidades e competências do futuro especialista em fontes radioativas,

Aos colegas do curso, Amilton Júnior, Eunícia Goessa, Evelyn Neri, Gustavo Gomes, Jerry dos Santos, Luana Ferreira, Luis Jansen Silva, Marcos Pessanha, Marcos Silva, Prycyla Creazolla, Roberta Souza, Stefanie Rodrigues, Tatiana Carneiro, Thais de Almeida pelo carinho, amizade e atenção prestada, em especial para a colega Edna Machavane, pela sua inigualável disposição na partilha de conhecimento e incansável dedicação nesta obra,

Finalmente a todos aqueles que direta ou indiretamente, me influenciaram, inspirando, dando força, sabedoria e determinação, tornando possível a realização deste momento,

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

Várias diligências têm sido feitas no mundo inteiro para identificar e quantificar os riscos radiológicos associados à exploração de minérios que contem Material Radioativo de Ocorrência Natural (do acrônimo em inglês NORM), muitas vezes resultando em exposições desnecessárias para indivíduos e elevados danos para o meio ambiente, com consequências devastadoras para a saúde dos trabalhadores e prejuízos na economia de muitos países, devido à falta de regulamentos ou aplicação de regulamentos inadequados. O estudo teve como objetivo identificar potenciais indústrias geradoras de NORM na República de Angola e estimar os seus impactos radiológicos ambientais. Para a concretização deste objetivo, estudou-se os aspectos teóricos, identificou-se as principais indústrias internacionalmente reconhecidas como geradoras de NORM, observou-se a experiência do Brasil no aspecto regulatório e nos critérios de avaliação para classificar indústrias geradoras de NORM, os métodos de mineração e seus impactos radiológicos ambientais, bem como as principais técnicas aplicadas para avaliação de concentrações de radionuclídeos presentes numa determina matriz ambiental e/ou uma amostra de NORM. A abordagem do estudo permitiu elaborar o mapa NORM das principais províncias de Angola, estabelecer os critérios de avaliação para implementar o Plano de Radioproteção na indústria extrativa, estabelecer medidas de controle das radiações ionizantes na mineração, identificar e quantificar radionuclídeos presentes em amostras de borras de óleo. Contudo, para avaliar de forma adequada o impacto radiológico ambiental da indústria NORM, não basta identifica-las, é importante saber a origem, quantificar o material radioativo liberado na forma de efluentes líquidos e gasosos, identificar as principais vias de exposição e examinar como este material se dissemina no meio ambiente até atingir o homem.

Palavras-chave: Exposição. Espectrometria gama. NORM. Mineração. Radioproteção.

ABSTRACT

Numerous steps have been taken worldwide to identify and quantify the radiological risks associated with the mining of ores containing Naturally Occurrence Radioactive Material (NORM), often resulting in unnecessary exposures to individuals and high environmental damage, with devastating consequences for the health of workers and damage to the economy of many countries due to a lack of regulations or inadequate regulations. For these and other reasons, the objective of this work was to identify industrial potential generating NORM in the Republic of Angola and to estimate its radiological environmental impacts. To achieve this objective, we studied the theoretical aspects, identified the main internationally recognized industrial companies that as generate by NORM. The Brazilian experience in the regulatory aspect was observed in the evaluation criteria to classify industries that generate NORM, the methods of mining and its radiological environmental impacts, as well as the main techniques applied to evaluate the concentrations of radionuclides in a specific environmental matrix and/or a NORM sample. The study approach allowed the elaboration of a NORM map for the main provinces of Angola, establishing the evaluation criteria for implementing the Radiation Protection Plan in the extractive industry, establishing measures to control ionizing radiation in mining, identifying and quantifying radionuclides present in samples of lees oil. However, in order to assess adequately the radiological environmental impact of the NORM industry, it is not enough to identify them, it is important to know the origin, quantify the radioactive material released as liquid and gaseous effluents, identify the main routes of exposure and examine how this material spreads into the environment until it reaches man.

Keywords: Exposure. Gamma spectrometry. NORM. Mining. Radioprotection.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| INTRODUÇÃO | 1 |
| CAPÍTULO 1 – FONTES DE RADIAÇÃO | 4 |
| 1. 1. Fontes de radiação ionizante | 4 |
| 1. 1. 2. Fontes de radiação ionizante natural | 4 |
| 1. 1. 2. 1. Radiação cósmica | 5 |
| 1. 1. 2. 2. Radioatividade terrestre | 5 |
| 1. 1. 2. 3. Radioatividade em água | 6 |
| 1. 1. 2. 4. Radioatividade nos alimentos | 7 |
| 1. 2. Radiação artificial | 8 |
| 1. 3. Interação da radiação com a matéria | 8 |
| 1. 3. Séries de desintegração natural | 9 |
| CAPÍTULO 2 – INDÚSTRIAS POTENCIALMENTE GERADORAS DE NORM | 11 |
| 2. 1. NORM | 11 |
| 2. 1. 1. Principais radionuclídeos presentes no NORM | 12 |
| 2. 1. 2. Indústrias potencialmente geradoras de NORM | 14 |
| 2. 2. Caracterização das indústrias potencialmente geradoras de NORM no Brasil . | 16 |
| 2. 3. Generalidade sobre Angola | 18 |
| 2. 3. 2. Potencias industriais geradoras de NORM na República de Angola | 21 |
| 2. 4. Legislação sobre o NORM | 22 |
| 2. 4. 1. Organizações internacionais | 23 |
| 2. 4. 2. Aspecto regulatório do Brasil | 26 |
| 2. 4. 3. Aspectos regulatórios de Angola | 29 |
| 2. 4. 3. 1. Regulamentos específicos | 30 |
| CAPÍTULO 3 – EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL NA MINERAÇÃO | 31 |
| 3. 1. Aspecto de proteção radiológica para a indústria do NORM | 31 |
| 3. 1. 1. Exposição ocupacional | 31 |
| 3. 1. 2. Exposição pública | 32 |
| 3. 2. Métodos de exploração mineira | 32 |
| 3. 2. 1. Método Exploração Céu Aberto | 33 |
| 3. 2. 2. Método de Exploração Subterrânea | 33 |
| 3. 2. 3. Método de lixiviação in situ | 33 |
| 3. 3. Extração de petróleo e gás | 34 |

| | |
|---|-----------|
| 3. 4. Principais riscos radiológicos na mineração com NORM | 34 |
| 3. 4. 1. Radiação Direta..... | 35 |
| 3. 4. 2. Radionuclídeos inalados | 35 |
| 3. 4. 3. Radônio | 35 |
| CAPÍTULO 4 – TÉCNICAS DE MEDIÇÃO | 37 |
| 4. 1. Espectrometria | 37 |
| 4. 1. 2. Espectrometria gama. | 37 |
| 4. 1. 3. Avaliação do rádio em amostras de borras de petróleo. | 38 |
| 4. 1. 4. Materiais utilizados | 38 |
| 4. 1. 5. Metodologia..... | 38 |
| 4. 1. 5. 1. Procedimentos | 38 |
| 4. 1. 5. 2. Preparação das amostras | 39 |
| 4. 1. 5. 3. Equipamento utilizado | 40 |
| CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS..... | 42 |
| 5. 1. Mapa NORM de Angola | 42 |
| 5. 2. Critérios para implementar o Plano de Radioproteção na indústria extrativa | 43 |
| 5. 3. Medidas para controlar a exposição na mineração | 45 |
| 5. 4. Radionuclídeos identificados em amostras de borras de petróleo | 46 |
| 5. 5. Valores de concentração dos isótopos..... | 47 |
| 5. 6. Discussão dos resultados | 47 |
| RECOMENDAÇÕES..... | 49 |
| REFERÊNCIAS..... | 50 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Dose efetiva global anual das fontes naturais de radiação..... | 4 |
| Tabela 2 – Radioatividade das rochas em mSv/ano..... | 6 |
| Tabela 3 – Radioatividade no interior do organismo..... | 7 |
| Tabela 4 – Radionuclídeos terrestres..... | 12 |
| Tabela 5 – Principais formas de NORM na produção de óleo e gás..... | 13 |
| Tabela 6 – Principais radionuclídeos emissores alfa através do NORM..... | 14 |
| Tabela 7 – Principal radionuclídeo emissor beta através do NORM..... | 14 |
| Tabela 8 – Principais radionuclídeo emissor gama através do NORM..... | 14 |
| Tabela 9 – Indústrias potencialmente geradoras de NORM na República de Angola..... | 22 |
| Tabela 10 – Classificação das categorias na indústria NORM do Brasil..... | 28 |
| Tabela 11 – Valores estabelecidos pela AIEA para isenção de material sólido contendo radionuclídeos naturais..... | 28 |
| Tabela 12 – Legislação internacional..... | 29 |
| Tabela 13 – Isótopos de radônio..... | 36 |
| Tabela 14 – Métodos de mineração <i>versus</i> medidas de controle..... | 45 |
| Tabela 15 – Tipos de radiação <i>versus</i> Medidas de controle na mineração..... | 46 |
| Tabela 16 – Valores de concentração dos isotópos de Ra-226 e Ra-228..... | 47 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Importância relativa das seções de choque com a energia e o número atômico (Z)..... | 9 |
| Figura 2 – Representação do decaimento radioativo do ^{238}U | 10 |
| Figura 3 – Representação do decaimento radioativo do ^{232}Th | 10 |
| Figura 4 – Principais ocorrências minerais no Brasil..... | 17 |
| Figura 5 – Localização da Angola no mundo..... | 18 |
| Figura 6 – Mapa representativo do Planageo, onde o país foi dividido em três zonas – com distintos operadores – constituindo 22 blocos..... | 20 |
| Figura 7 – Processo de gestão das recomendações da ICRP..... | 25 |
| Figura 8 – Geometria utilizada para preparação de amostras..... | 38 |
| Figura 9 – Preparação das amostras..... | 39 |
| Figura 10 – Peso do pote com a amostra de borra de petróleo..... | 39 |
| Figura 11 – Contagem da amostra com detector HPGe..... | 40 |
| Figura 12 – Energia de calibração com fonte de ^{152}Eu | 40 |
| Figura 13 – Curva de eficiência do detector..... | 41 |
| Figura 14 – Representação esquemática do mapa NORM da República de Angola..... | 43 |
| Figura 15 – Fluxograma para classificação do NORM..... | 44 |
| Figura 16 – Isótopos de rádio (^{226}Ra e ^{228}Ra) determinados pelo método de espectrometria gama com detector HPGe..... | 46 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---------|---|
| AIEA | Agência Internacional de Energia Atômica |
| AREA | Autoridade Reguladora de Energia Atômica |
| CNEN | Comissão Nacional de Energia Nuclear |
| EC | Efeito Compton |
| EFE | Efeito fotoelétrico |
| eV | Electron-volt |
| AIPC | Agência Internacional de Pesquisa em Câncer |
| ILO | Organização Internacional do Trabalho |
| ICRU | Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação |
| ICRP | Comissão Internacional de Proteção Radiológica |
| IRD | Instituto de Radioproteção e Dosimetria |
| MECA | Método de Exploração a Céu Aberto |
| MES | Método de Exploração Subterrânea |
| MeV | Mega electrão-volt |
| MLIS | Método de Lixiviação in Situ |
| NORM | Naturally Occuring Radioative Material |
| pH | Potencial de hidrogênio |
| PP | Produção de pares |
| UNEP | Programa Ambiental das Nações Unidas |
| UNSCEAR | Comitê Científico das Nações Unidas sobre o efeito das Radiações Atômicas |
| WHO | Organização Mundial da Saúde |
| WMO | Organização Meteorológica Internacional |

DEFINIÇÕES DE TERMOS E CONCEITOS

Atividade – grandeza definida por $A = dN/dt$, onde dN é o valor esperado do número de transições nucleares espontâneas daquele estado de energia no intervalo de tempo dt . A unidade no sistema internacional é o recíproco do segundo (S^{-1}), denominado becquerel (Bq).

Contaminação radioativa - deposição indesejável de materiais radioativos em qualquer meio ou local.

Descomissionamento - ações técnicas e administrativas destinadas à liberação de uma instalação do controle regulatório.

Dispensa – retirada do controle regulatório de materiais ou objetos radioativos associados a uma prática autorizada.

Dose – dose absorvida, dose efetiva, dose equivalente ou dose comprometida, dependendo do contexto.

Efluente radioativo - material radioativo, líquido ou gasoso, produzido por uma prática e liberado para o meio ambiente de forma planejada e controlada.

Exclusão - inaplicabilidade de controle regulatório para exposições cuja intensidade e probabilidade de ocorrência não sejam suscetíveis a tal controle.

Exposição - ato ou condição de estar submetido à radiação ionizante.

Exposição natural – exposição resultante da radiação natural local.

Exposição ocupacional – exposição normal ou potencial de um indivíduo em decorrência de seu trabalho ou treinamento em práticas autorizadas ou intervenções, excluindo-se a radiação natural do local.

Exposição do público - exposição de indivíduos do público a fontes e práticas autorizadas ou em situações de intervenção, não incluindo exposição ocupacional, exposição médica e exposição natural local.

Exploração mineira – atividade posterior ao reconhecimento, a prospecção, a pesquisa e a avaliação, abrangendo a preparação e a extração, carregamento e transporte dentro da mina do minério bruto, bem como o seu tratamento e beneficiamento.

Fontes naturais - fontes de radiação que ocorrem naturalmente, incluindo radiação cósmica e terrestre.

Indivíduo do público - qualquer membro da população quando não submetido à exposição ocupacional ou exposição médica.

Indivíduo ocupacionalmente exposto (IOE) - indivíduo sujeito à exposição ocupacional.

Inspeção - exame, observação, medida ou teste empreendido para avaliar estruturas, sistemas e componentes e materiais, bem como atividades operacionais, processos técnicos, processos organizacionais, procedimentos e competência de pessoal.

Isenção - ato regulatório que isenta uma prática ou uma fonte associada a uma prática de posterior controle regulatório, sob o ponto de vista de proteção radiológica.

NORM – Material Radioativo de Ocorrência Natural aumentado tecnologicamente ou não, sendo produzido durante diferentes processos e só é considerado NORM devido a lei ou por decisão do órgão regulador

Material radioativo - material contendo substâncias que emitem espontaneamente radiação ionizante.

Matéria-prima – bens minerais ou produtos intermediários ou finais de seu beneficiamento;

Meia-vida - tempo necessário para que a atividade de um dado material radioativo caia pela metade, como resultado de um processo de decaimento radioativo.

Mina - jazida em lavra, ainda que suspensa.

Minério – formação geológica contendo um ou mais minerais úteis, no interior de um jazigo.

Mineração – conjunto de atividades que incluem o reconhecimento, prospecção, pesquisa, avaliação, exploração, beneficiamento e comercialização de recursos minerais.

Órgão regulador - entidade designada pelo governo de um país como tendo autoridade legal para conduzir um processo regulador, inclusive podendo emitir, suspender ou cancelar autorizações e licenças naquele país.

Plano de Proteção Radiológica (PPR) - documento exigido para fins de licenciamento da instalação, que estabelece as ações de proteção radiológica a serem implantadas pelo serviço de proteção radiológica local.

Prática - toda atividade humana que implica no aumento da probabilidade de exposição de pessoas ou do número de pessoas expostas à radiação ionizante.

Proteção radiológica (ou radioproteção) - conjunto de medidas que visam a proteger o ser humano contra possíveis efeitos indesejáveis causados pela radiação ionizante.

Radioatividade – propriedade que têm certos elementos de perder espontaneamente parte da sua massa pela emissão de partículas ou de radiações electromagnéticas.

Radiação ionizante – qualquer radiação eletromagnética ou de partículas que, ao interagir com a matéria, ioniza direta ou indiretamente seus átomos ou moléculas.

Rejeito radioativo – qualquer material, resultante de atividades humanas, que contenha radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de isenção e para o qual a reutilização é imprópria ou não prevista.

Resíduo radioativo – qualquer substância, remanescente de processamento físico ou químico, que contenha um ou mais elementos radioativos em concentrações de atividade acima dos limites de isenção e para a qual a reutilização é possível, levando em consideração aspectos económicos, tecnológicos e de proteção radiológica.

Risco radiológico – expressão resultante da frequência de ocorrência de um dado evento por uma dada consequência que este possa causar.

Siervert (Sv) – equivalente de dose de radiação igual a um joule por quilograma.

Subproduto - (1) qualquer material radioativo (exceto material nuclear especial) gerado ou tornado radioativo por exposição à radiação incidente em um processo de produção ou uso de material nuclear especial (como em um reator); ou (2) resíduos produzidos pela extração ou concentração de urânio ou tório do minério.

Teor – quantidade de minério ou de um recurso mineral existente num metro cúbico ou numa tonelada de minério de uma jazida.

INTRODUÇÃO

A geologia de Angola oferece aspectos de particular relevância para a economia do país (DA SILVA e Outros, 2008). No seu subsolo encontram-se muitos dos minerais mais importantes para o comércio mundial, como o petróleo, diamantes, gás natural, substâncias betuminosas, rochas ornamentais, fluorite, titânio, sal-gema, sais de potássio, ferro, cobre e ouro. Para além destes, existe uma vasta gama de recursos naturais em quantidade e diversidade disponíveis para prospecção.

A exploração e aproveitamento racionais desses recursos constituem um importante meio de crescimento e desenvolvimento econômico sustentável, contribuindo para o bem-estar e a felicidade das gerações atuais e futuras.

O país também está aberto a novos investimentos no domínio dos metais básicos, sal-gema, apatita/fluorita, molibdenite, platina, níquel, magnésio, mica, barite, pedras semipreciosas e o urânio (FINANÇAS, 2015; EXAME, 2015; MERCADO, 2015).

De acordo com a estratégia anunciada, o Governo pretende desenvolver ações que visem substituir o petróleo como principal fonte de divisas para o país. A estratégia de promoção das exportações está associada principalmente a recursos naturais extrativos, como minérios e rochas (PAÍS, 2016), o objetivo do governo é que o país ganhe o estatus de potência mineira na África (MERCADO, 2015).

Todas as matérias-primas e os minerais a serem explorados em Angola contêm radionuclídeos naturais. A concentração da atividade, na maioria das situações, em rochas e solos é variável, mais geralmente baixa (AIEA, 2011).

Em algumas operações de mineração e processamento de minérios, os radionuclídeos podem representar riscos para trabalhadores, membros do público ou para o meio ambiente. Esses riscos podem requerer um controle.

O NORM associado a atividades industriais apresenta-se de várias maneiras, no minério, matéria-prima, produtos intermediários, produto final, subproduto ou como resíduos e pode ser um sólido, líquido ou gás (ou uma mistura destes).

Para além da mineração do urânio e tório existem determinados minerais (identificados) que apresentam elevados níveis de concentrações de radionuclídeos, estanho, tântalo, nióbio, elementos de terras raras, zinco, zircónio, alumínio, ferro, cobre, ouro e os fosfatos (DMP, 2010; IAEA, 2011), que para a sua extração, devem ser alvo de regulamentação atinente à radioproteção (DMP, 2010), com vista à proteção dos trabalhadores, do público e do meio ambiente contra as radiações ionizantes.

Durante a mineração e processamento destes minérios os níveis de concentração dos radionuclídeos podem aumentar consideravelmente nos produtos, subprodutos ou nos resíduos (IAEA, 2011).

Tendo em conta estes e outros elementos, surge a ideia de avaliar as indústrias potencialmente geradoras de NORM na República de Angola, a qual teve como:

Objeto de estudo: NORM na República de Angola

Campo de ação: Angola

Objetivo geral: Identificar potenciais indústrias geradoras de NORM na República de Angola e estimar os seus impactos.

Hipóteses:

- 1) Estudam-se os fundamentos teóricos sobre fontes de radiação e legislações internacionais;
- 2) Se caracterizar as indústrias potencialmente geradoras de NORM na República de Angola;
- 3) Se determinar os principais radionuclídeos no NORM é possível estimar os impactos radiológicos resultantes da exploração mineira e petrolífera na República de Angola.

Objetivos específicos:

- 1) Identificar e caracterizar as potenciais indústrias geradoras de NORM na República de Angola;
- 2) Elaborar um mapa das indústrias potencialmente geradoras de NORM nas províncias da República de Angola;

- 3) Propor medidas para controlar a exposição da radiação ionizante na exploração de minerais que contenham NORM, bem como diminuir seu o impacto radiológico,
- 4) Determinar os principais radionuclídeos (rádio 226 e rádio 228).

Organização do trabalho

O trabalho apresenta uma estrutura, que contempla além da introdução 5 capítulos. O capítulo 1 descreve os fundamentos sobre fontes de radiação natural. O capítulo 2 trata sobre o NORM, legislação internacional, organizações internacionais e suas competências, ilustra o arcabouço regulatório do Brasil e de Angola sobre o NORM, a classificação das atividades econômicas consideradas internacionais como indústrias NORM e os principais radionuclídeos presentes no NORM. O capítulo 3 descreve os principais métodos de mineração e seus impactos ambientais. O capítulo 4 retrata a técnica por espectrometria gama utilizada para identificar e quantificar os radionuclídeos presente numa matriz de interesse. Finalmente, no capítulo 5 são apresentados os resultados do trabalho, seguido das conclusões, recomendações e referências bibliográficas.

CAPÍTULO 1 – FONTES DE RADIAÇÃO

1. 1. Fontes de radiação ionizante

As radiações ionizantes têm origem natural e artificial.

1. 1. 2. Fontes de radiação ionizante natural

A radiação natural tem origem externa ou interna. As fontes externas englobam a radiação cósmica (RC) que vem de espaço e da superfície solar, os radionuclídeos cosmogênicos¹, de origem terrestre, que estão disseminados nos solos, nas águas (superficiais e subterrâneas) e nos vegetais. As internas incluem os radionuclídeos presentes no corpo humano (VELUDO, 2011). A radiação natural não está homoganeamente distribuída na terra, depende da latitude, longitude e da altitude, bem como da geologia do local, responsável pela variabilidade do teor dos radionuclídeos primordiais² no solo (LAURIA, 2014). A taxa de dose efetiva proveniente da radiação natural é cerca de 2,4 mSv per-capita por ano (UNSCEAR, 2000), conforme ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Dose efetiva global anual das fontes naturais de radiação (Fonte [(UNSCEAR, 2000)])

| Fontes | Externa (mSv) | Interna (mSv) | Total (mSv) |
|--|---------------|---------------|-------------|
| Raios cósmicos | 0.410 | | 0.410 |
| Radionuclídeos cosmogênicos | | 0.015 | |
| Fontes naturais | | | |
| ⁴⁰ K | 0.150 | 0.180 | 0.330 |
| Série de decaimento do ²³⁸ U | 0.100 | 1.239 | 1.339 |
| Série de decaimento do ²³² Th | 0.160 | 0.170 | 0.336 |
| Total | 0.820 | 0.616 | 2.436 |

¹ São radionuclídeos formados pela interação dos raios cósmicos com os átomos da atmosfera terrestre.

² São aqueles que estão presentes desde a formação da terra e constituem parte da geologia terrestre, possuem tempo de meia-vida na ordem de 10⁹ anos, formando as séries radioativas naturais (²³⁸U, ²³⁵U e ²³²Th). Também fazem parte desta classificação, radionuclídeos como o ⁴⁰K e o ¹²⁴Sn, que decaem diretamente num elemento estável.

Grande parte da exposição humana à radiação ionizante é devido à radiação natural (cerca de 80%). Estima-se que mais da metade da exposição humana à radiação deve-se ao radônio 222 (^{222}Rn), produto do decaimento da série do urânio 238 (^{238}U) (LAURIA, 2014). A segunda advém das exposições médicas, sendo responsável por 19.6%. As demais fontes de exposição são responsáveis por 0,4% (como liberação de produtos nucleares, testes nucleares realizados nos anos 50-60 e acidentes nucleares).

1. 1. 2. 1. Radiação cósmica

Tem origem no espaço sideral, causada por estrelas e outros corpos celestes radioativos que incidem continuamente sobre a terra (UNSCEAR, 2000; DANIEL, 2012). É constituída por partículas altamente energéticas (80% de prótons, 18% de partículas alfas e 2% de núcleos pesados) e pela radiação gama proveniente do sol e de outras estrelas. A energia destas radiações é muito alta, da ordem de centenas de MeV a GeV (TAUHATA, 2014). Estas radiações bombardeiam fortemente a atmosfera da terra (DANIEL, 2012). A atmosfera terrestre interage com os raios cósmicos e exerce o papel de blindagem para os habitantes, atenuando e absorvendo bastante as radiações (TAUHATA, 2014). A exposição à radiação cósmica é fortemente dependente da altitude e fracamente dependente da latitude (ALONSO, 2012), ou seja, as pessoas que habitam nas montanhas recebem mais radiação que aquelas que vivem ao nível do mar (TAUHATA, 2014).

1. 1. 2. 2. Radioatividade terrestre

A radioatividade natural das rochas resulta da presença do urânio (U), tório (Th) e do potássio-40 (K-40) na crosta e manto terrestre (IAEA, 1995; MARJORIBANKS, 2010). Estes elementos radioativos (ER) e seus descendentes estão presentes nos solos e nos materiais de construção (pedras, tijolos, betão, gesso, etc.) e contribuem com cerca de um sexto da irradiação natural do nosso organismo (CAVEDON, 1996).

Segundo Ferreira (2013), a radioatividade natural das rochas varia de acordo com a sua natureza. Em geral concentrações mais altas são comuns nas rochas ígneas (graníticas) em relação às rochas sedimentares e metamórficas (SCHÖN, 2014), conforme a tabela 2.

Tabela 2 – Radioatividade das rochas em mSv/ano (Fonte [BRUCKMANN, 1991])

| Tipo de rochas | Ra226 | U238 | Th232 | K40 | Total |
|----------------------------|-------|-------|-------|------|-------|
| Rochas ígneas | 0,24 | 0,26 | 0,37 | 0,35 | 0,98 |
| Rochas sedimentares | | | | | |
| • Arenosas | 0,13 | 0,077 | 0,18 | 0,15 | 0,46 |
| • Argilas | 0,20 | 0,077 | 0,31 | 0,36 | 0,87 |
| • Calcários | 0,077 | 0,084 | 0,04 | 0,04 | 0,16 |

Nas rochas ígneas, a radioatividade provém de minerais acessórios levemente radioativos como o zircão, o esfeno e apatite, enquanto minerais acessórios altamente radioativos, como por exemplo, a monazita, allanita, pirocloro, uraninita e torita são mais escassas (FERREIRA, 2013). Nas magmáticas a radioatividade tende a aumentar com acidez das rochas.

Nas rochas sedimentares a radioatividade depende da composição do material submetido à sedimentação. O seu aumento verifica-se em argilas, fosfatos, sais de potássio e sedimentos betuminosos, enquanto calcários, gessos e quartzitos apresentam sedimentos menos radiativos. Nas rochas metamórficas a radioatividade é predominante para materiais primários (migmatitos ortognaisse e injeções), apresentam elevada radioatividade, enquanto anfibolitos e serpentinitos apresentam baixa radioatividade (IAEA, 2013).

1. 1. 2. 3. Radioatividade em água

A presença dos radionuclídeos de origem natural em água é causada pela erosão e dissolução das rochas. Estão presentes em quantidades diferentes nas águas subterrâneas e de superfície (rios, lagos e oceanos). Comparativamente têm sido encontrados maiores teores de radionuclídeos em águas subterrâneas do que em águas de superfície (LAURIA et al, 2014),

Dependendo do pH, concentração da matéria orgânica, níveis e espécies de cátions ou aniões, alguns dos radionuclídeos das séries radioativas têm maior mobilidade que outros. Assim, as diferenças de

concentrações dos radionuclídeos em águas estão relacionadas com os seus teores na rocha, tipo de rocha, características químicas da água percolante³ e das características individuais⁴ dos radionuclídeos.

Os processos naturais não são os únicos responsáveis pelos teores de radionuclídeos em água, também pode advir da atividade humana que, por libertação rotineira ou acidental, causam a contaminação com radionuclídeos artificiais (por exemplo, testes de bombas nucleares, instalações nucleares ou radiológicas, bem como radionuclídeos naturais provenientes da mineração e uso de fertilizantes).

1. 1. 2. 4. Radioatividade nos alimentos

O nosso organismo é formado pela combinação de átomos e alguns deles são nuclídeos radioativos. Por isso, estamos continuamente expostos a esses nuclídeos por meio da ingestão de alimentos. (CHRISTOVAM, 2013). A ingestão de alimentos que contêm estes elementos acarreta em um acúmulo de substâncias radioativas dentro do corpo humano (Tabela 3).

Tabela 3 – Radioatividade no interior do organismo [Fonte (Eicher et al, S/N)]

| Isótopos radioativos | Dose (mSv/ano) |
|----------------------|----------------|
| K-40 | 0,150 |
| Ra-226 | 0,010 |
| Pb-210 | 0,003 |
| C-14 | 0,010 |

Na tabela acima é possível ver a dose recebida, em Sievert por ano, devido a estes nuclídeos e outros mais pesados, como o ²¹⁰Pb e ²²⁶Ra. O chumbo deposita-se em vegetais, entrando no corpo humano pela ingestão de alimentos, enquanto o rádio fixa-se nos ossos, devido a sua semelhança com o cálcio (Eicher et al, S/N).

A radioatividade dos alimentos (sólidos e líquidos) varia devido ao local de procedência e aos processos de produção, pois tanto o solo como a água e

³ Processo de passar um líquido através de interstícios. Movimento lento da água do subsolo.

⁴As características individuais são responsáveis por exemplo, pela menor concentração de Th do que do U em águas naturais, embora o Th seja mais abundante na crosta terrestre do que o U.

os aditivos utilizados contêm elementos radioativos que são passados para os alimentos de acordo com suas concentrações. Desta forma, o próprio organismo humano pode incorporar estes elementos radioativos (Eicheret al, S/N).

Muitos estudos associados à proteção radiológica estabelecem a necessidade de conhecer-se a composição química do corpo humano – *homem referência*, devido ao fato das interações das radiações ionizantes ocorrerem com os tecidos e órgãos de seus átomos constituintes (TAUHATA, 2014).

O nosso organismo contém radionuclídeos, como o carbono-14, hidrogénio-3 (trítio), rubídio-87, rádio-226 e potássio-40, sendo este último o radionuclídeo que o ser humano ingere em maior quantidade (de 60% a 70%) por ser um elemento-chave no metabolismo celular (CHRISTOVAM, 2013).

Entre os alimentos que apresentam maiores quantidades relativas de potássio destaca-se alguns grãos (feijão, soja e lentilha), frutos secos ou em conservas (como banana, abacate e melão) e raízes (batata, mandioca, beterraba e cenoura). A quantidade de radioatividade desses alimentos depende da distribuição do K-40 no solo e das particularidades de adubação, bem como das técnicas agrícolas utilizadas (CHRISTOVAM, 2013).

1. 2. Radiação artificial

O desenvolvimento de fontes artificiais teve início com os trabalhos de Irène Curie (filha do casal Curie) e seu marido Frédéric Joliot (OKUNO, 2010). As fontes artificiais mais importantes incluem dispositivos de diagnóstico e terapia utilizados na medicina, aparelhos de controle, radiografia e medidores usados na indústria e comércio, bem como aquelas utilizadas nas instalações do ciclo de combustível nuclear e para pesquisa científica (TAUHATA, 2014).

1. 3. Interação da radiação com a matéria

As radiações ao interagirem com a matéria resultam na transferência de energia para átomos e moléculas que estejam em sua trajetória. Os mecanismos de interação da radiação (Raios X ou gama) com a matéria, que tem maior probabilidade de ocorrência são: o **efeito fotoelétrico (EFE)**, o **efeito Compton (EC)** e a **produção de pares (PP)** (LIMA et al, 2008; XAVIER,

et al, 2006). A ocorrência de um ou outro mecanismo depende da energia raio gama incidente e do número atômico (Z) do material observado (FERREIRA, 2013), conforme a figura 1.

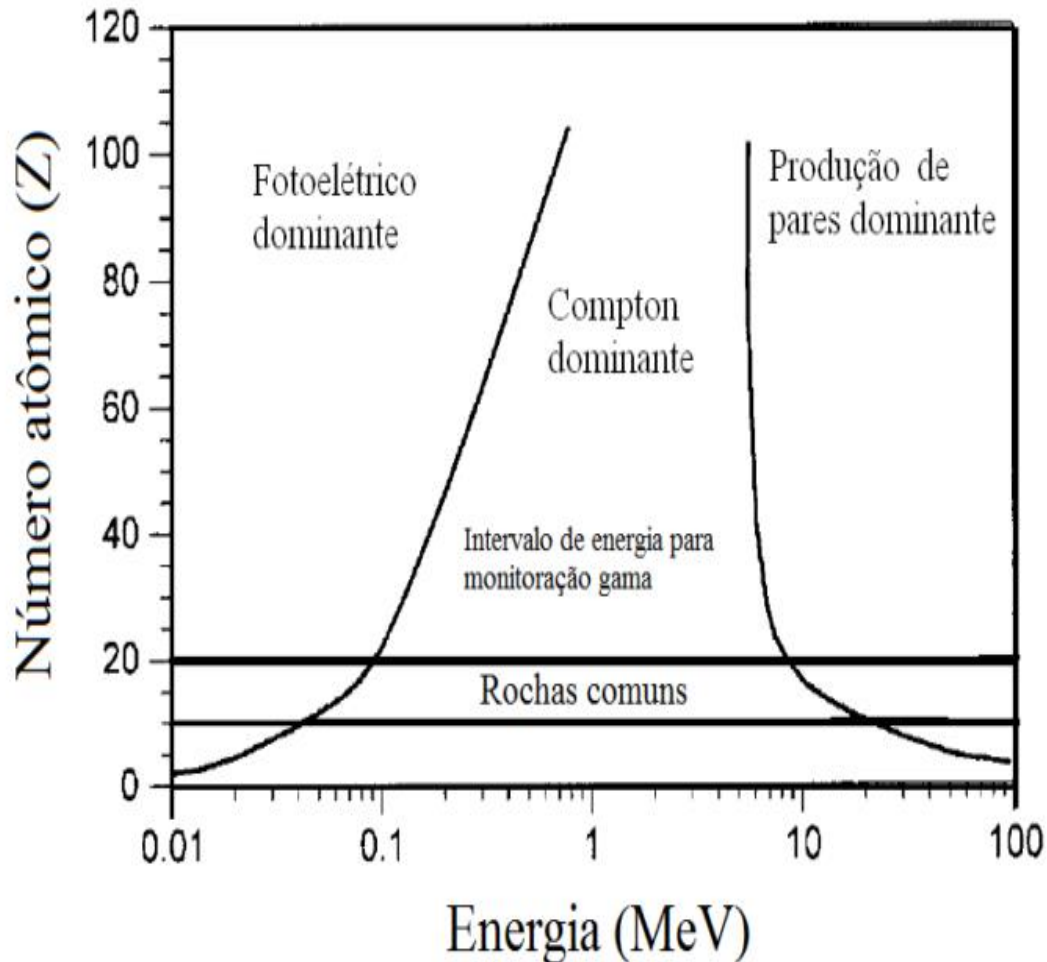


Figura 1 – Importância relativa das seções de choque com a energia e o número atômico (Z) do meio absorvedor (Fontes [FERREIRA, 2013]).

O EFE domina energias baixas com matérias de elevado número atômico, enquanto o EC é predominante para energias intermediárias (100Kev-1MeV), ficando a PP com energias elevadas acima de 1,022 MeV.

1. 3. Séries de desintegração natural

Na natureza existe três séries de desintegração dos isótopos naturais, conhecidas como a série do **Urânio (U)**, do **Actínio (Ac)** e do **Tório (Th)** (IAEA, 1976; OLIVEIRA, 2006; XAVIER,2006). A série do ^{238}U é constituída por 18 radioisótopos, com três bifurcações, terminando com o Chumbo-206 (^{206}Pb) estável (figura 2).

CAPÍTULO 2 – INDÚSTRIAS POTENCIALMENTE GERADORAS DE NORM

2. 1. NORM

NORM é um acrónimo de uma palavra formada pelas letras iniciais ou sílabas das palavras sucessivas de uma frase, no caso da expressão em inglês Naturally Occurring Radioactive Material.

Todas as matérias-primas e minerais contêm radionuclídeos naturais de origem terrestre, sendo que os mais importantes do ponto de vista da radioproteção são os radionuclídeos das séries radiativas do ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K (AIEA, 2013). A concentração de atividade deste radionuclídeos, na maioria das situações, em rochas e solos é variável, mas geralmente baixa (AIEA, 2011).

O NORM é frequentemente encontrado em seu estado natural em rochas ou areia e pode estar associada aos resíduos de produção de petróleo e gás, da mineração, produção de cinzas de carvão, e está presente em produtos de consumo, incluindo produtos de construção (como tijolos e blocos de cimento, bancadas de granito, azulejos), fertilizantes de fosfatos e produtos de tabaco (CNSC, 2016).

Em algumas operações de mineração e de processamento a presença de radionuclídeos podem representar riscos para os trabalhadores, membros do público e para o meio ambiente. Esses riscos podem requerer um controle.

O NORM encontra-se difundido no meio ambiente, estando presente em algumas matérias-primas utilizadas na indústria de transformação (ARAÚJO, 2005). Na maior parte das atividades humanas que envolvem matérias-primas e minerais o nível de exposição devido aos radionuclídeos é baixo, comparável com o nível do background (radiação de fundo) (AIEA, 2013). Contudo, em alguns casos, processos industriais podem levar ao aumento dos níveis de radioatividade nos produtos como nos subprodutos (ARAÚJO, 2005).

O NORM associado com atividades industriais apresenta-se de várias maneiras, no minério, matéria-prima, produto intermédio, subproduto, produto

final ou como resíduo⁵ e pode ser um sólido, líquido ou gás (ou uma mistura destes) (IAEA, 2013).

Segundo Fernandes, citado por Araújo (2005), os resíduos radioativos geram preocupação e atenção de pesquisadores, autoridades reguladores e da sociedade como de um todo.

As atividades de mineração que não sejam aquelas de urânio e tório, existem determinados minerais (identificados) que apresentam elevados níveis de concentrações de radionuclídeos (DMP, 2010; AIEA, 2011), que para a sua extração devem ser alvo de regulamentação atinente a proteção radiológica, com vista a proteção dos trabalhadores, do público e do meio ambiente contra os efeitos das radiações ionizantes.

2. 1. 1. Principais radionuclídeos presentes no NORM

A presença de elevadas concentrações de radionuclídeos no NORM pode ser um problema em qualquer estágio de uma operação. Os radionuclídeos presentes no NORM dependem da origem, indústria e do tipo de radiação emitida.

Nas diversas etapas da indústria de mineração como na de óleo e gás, são produzidos vários materiais (sólidos e líquidos) que podem conter materiais radioativos, resultando na necessidade de exercer-se um controle das exposições ocupacionais e do público às radiações ionizantes (IPEN, 2006).

Na mineração, os principais radionuclídeos presentes são os radionuclídeos terrestres (tabela 4), ou seja, aqueles provenientes de meia-vida muito longa, comparáveis com à idade da terra, como o K-40 e nuclídeos das famílias radioativas do U-238 e do Th-232.

Tabela 4 – Radionuclídeos terrestres [Fonte: (ROCHEDO, 2017)]

| Radionuclídeos | Meia-vida | Decaimento |
|----------------|-----------|---------------------------|
| K-40 | 1,28 E9 | Beta (89,3%), EC (10,7%) |
| Rb-87 | 4,75 E10 | Beta (100%) |
| La-138 | 1,05 E11 | Beta (33,6%), EC (66, 4%) |

⁵ Nos termos do Glossário de Segurança da AIEA, resíduo NORM é um material proveniente de uma operação ou processo, contaminado com material radioativo de ocorrência natural. A sua definição é muito mais estreita, sendo que é um tipo específico de resíduos para os quais não está prevista qualquer utilização posterior.

| | | |
|--------|----------|-------------|
| Sm-142 | 1,06 E11 | Alfa (100%) |
| Lu-176 | 3,73 E10 | Beta (100%) |
| U-238 | 4,47 E9 | Alfa (100%) |
| Th-232 | 1,41 E10 | Alfa (100%) |
| U-235 | 7,04 E8 | Alfa (100%) |

*Radionuclídeos que decaem produzindo uma série de outros radionuclídeos – “famílias”.

Na produção de óleo e gás às principais formas de aparecimentos de NORM variam conforme a tabela 5.

Tabela 5 – Principais formas de NORM na produção de óleo e gás [Fonte: (IPEN, 2006)]

| Tipo | Radionuclídeos | Características | Ocorrência |
|-----------------|-----------------------------------|--|---|
| Incrustação | Ra226, Ra228, Ra224 e seus filhos | Depósitos resistentes de sulfato e carbonato de Ca, Sr e Ba. | Partes úmidas da instalação de produção. Revestimento do poço. |
| Lamas | Ra226, Ra228, Ra224 e seus filhos | Areia, argila, parafinas, metais pesados. | Separadores removedores, tanques. |
| Depósitos | Pb210 e seus filhos | Depósitos de chumbo estável | Partes úmidas da instalação de produção de gás. Revestimento do poço. |
| Filmes | Pb210 e seus filhos | Filmes muito delgados | Tratamento e transporte de óleo e gás |
| Filmes de Po | Po210 | Filmes muito delgados | Instalação para tratamento de condensados |
| Condensados | Po210 | Não sustentado | Produção de gás |
| Gás natural | Rn222, Pb210, Po210 | Gás nobre na superfície. | Domínio de consumidores, sistema de tratamento e transporte de gás. |
| Água produzida. | Ra226, Ra228, Ra224 e Pb210 | Mais ou menos salino, grandes volumes na produção de petróleo. | Nas instalações de produção. |

Entre os radionuclídeos na indústria de óleo e gás, a maior preocupação associada ao NORM, está relacionada com o Ra-226 e Ra-228, provenientes do decaimento dos isótopos de U-238 e Th-232 respectivamente, presentes nas formações dos reservatórios das quais o hidrocarboneto é produzido.

Outros radionuclídeos que ocorrem em menores concentrações são o Po-210 e Pb-210, associados ao processamento de gás. Enquanto urânio e tório são imóveis, o rádio é ligeiramente mais solúvel e, dependendo das condições de pressão, temperatura, pH, entre outros, deve mobilizar-se nas fases fluídas do reservatório e acumular-se na forma de NORM (AGUIAR et al, 2015).

Quanto ao tipo de radiação, o NORM pode conter radionuclídeos emissores alfa, beta e radiação gama, conforme tabelas 6, 7 e 8 respectivamente. A principal contribuição para a exposição externa vem dos radionuclídeos emissores gama, presentes nos solos e rochas (ELAINE, 2017).

Tabelas 6 – Principais radionuclídeos emissores α através do NORM (fonte [*])

| Radionuclídeos de interesse | Poder de penetração | Energia | Risco interno | Risco externo |
|-----------------------------|---------------------|---------|---------------|---------------|
| Ra-226 | Baixa penetração | Elevada | Elevado | Desprezível |
| Rn-222 | | | | |
| Th-228 | | | | |
| Ra-228 | | | | |

Tabela 7 – Principal radionuclídeo emissor β através do NORM (fonte [*])

| Radionuclídeos de interesse | Poder de penetração | Energia | Risco interno | Risco externo |
|-----------------------------|---------------------|---------|---------------|---------------|
| Pb-210 | Baixa penetração | Elevada | Elevado | Desprezível |

Tabelas 8 – Principais radionuclídeo emissor γ através do NORM (fonte [*])

| Radionuclídeos de interesse | Poder de penetração | Energia | Risco interno | Risco externo |
|-----------------------------|---------------------|---------|---------------|---------------|
| Pb-210 | Baixa penetração | Elevada | Elevado | Desprezível |

Fonte [*]: Stuart Hunt Associates (SHAL, S/A), Ltd.

2. 1. 2. Indústrias potencialmente geradoras de NORM

Existem indústrias que podem gerar grandes quantidades de NORM, causando exposições para o homem e o meio ambiente, necessitando de medidas de proteção radiológicas para reduzir os efeitos das exposições às radiações ionizantes.

Várias são as indústrias que utilizam matéria-prima que podem conter pequenas quantidades de radionuclídeos naturais, podendo concentrar-se durante o processamento das matérias-primas, nos produtos, subprodutos ou nos resíduos, alcançando valores elevados. Tais indústrias podem suscitar exposições importantes. O risco da exposição pode aumentar para os trabalhadores, como para população nas circunvizinhanças de tais indústrias ou mesmo nas populações remotas pelo uso de subprodutos (REIS, 2016).

Foram identificadas pela IAEA como suscetíveis de necessitarem considerações devido a presença de NORM, às atividades econômicas reconhecidas internacionalmente como indústrias potencialmente geradoras de NORM:

- a) Extração de elementos de terras raras;
- b) Produção e uso de tório e seus compostos;
- c) Produção de nióbio e ferro-nióbio;
- d) Mineração com outros minerais diferentes dos minerais de urânio e tório;
- e) Produção de óleo e Gás;
- f) Produção de pigmentos de dióxido de titânio;
- g) Indústria do fosfato;
- h) Indústria da zirconita e zircão;
- i) Produção de estanho, cobre, alumínio, zinco, chumbo, ferro e aço;
- j) Tratamento de águas do processamento das indústrias NORM.

Para se avaliar o impacto radiológico das indústrias NORM de forma satisfatória, é necessário quantificar o material radioativo libertado na forma de efluentes líquidos e gasosos, devendo-se, portanto, estudar como este material se dispersa no meio ambiente até atingir o homem (REIS, 2016). O comportamento dos radionuclídeos no meio ambiente é governado por fatores, tais como: físicos, químicos e biológicos. Para se entender os efeitos biológicos, deve-se conhecer a movimentação e a concentração do material no sistema em estudo, bem como a toxicidade química e radiológica dessas concentrações para os componentes bióticos deste sistema (REIS, 2016).

2. 2. Caracterização das indústrias potencialmente geradoras de NORM no Brasil

No Brasil, os recursos minerais foram descobertos no século XVII, quando os colonizadores encontraram ouro em Minas Gerais (CHIOSSI, 2013). A diversidade dos minerais explorados é grande, encontrando-se algumas das principais jazidas de minerais no mundo (CHIOSSI, 2013). O país é líder mundial em Fe, Nb, Al, Mn, Grafita e Amianto e exportador de commodities minerais de Sn, Au, Ni, Ta, Caulim e Magnesita (MELFIE, 2016).

Dentre as substâncias minerais comercializadas pelo Brasil, aquelas com cotações elevadas na balança comercial destacam-se o Ferro, Caulim e Bauxita (Al_2O_3) que representam, em valor, mais de 90% das exportações de commodities minerais.

O Brasil detém aproximadamente 8% das reservas mundiais de ferro, o principal minério extraído, representado cerca de 80% das exportações minerais (MELFIE, 2016) e as maiores jazidas de nióbio mundiais encontra-se no Brasil (CHIOSSI, 2013).

Os estados de Minas Gerais, Pará, Bahia e Goiás concentram mais de 80% da produção nacional de commodities minerais (MELFIE, 2016).

É um país de grande potencial mineral, porque grande parte de sua superfície é constituída de terrenos metamórficos (cristais) do período Pré-cambriano (CHIOSSI, 2013). As áreas mais expressivas de ocorrência de jazidas minerais no Brasil são representadas na figura 6.

O registo geológico do Brasil evidência ambientes férteis em todo o tempo geológico, do Arqueano ao Holoceno, contendo importantes acumulações de bens minerais (MELFIE, 2016).

No ranking anual de 2014, das 200 maiores minas brasileira, tem-se entre os minérios metálicos 30 minas de ferro, 13 de bauxita, 12 de ouro, três de níquel e quatro de cobre. Relativamente aos agregados, têm-se minas de carvão, cinco de fosfato e quatro de caulim (CURI, 2017). Possui a sétima maior reserva de urânio no mundo, na categoria de Reservas Identificadas (<US\$ 130/kgU), sendo que, apenas 25% do território brasileiro foi prospectado adequadamente para exploração uranífera (FRANKLIN, 2017).

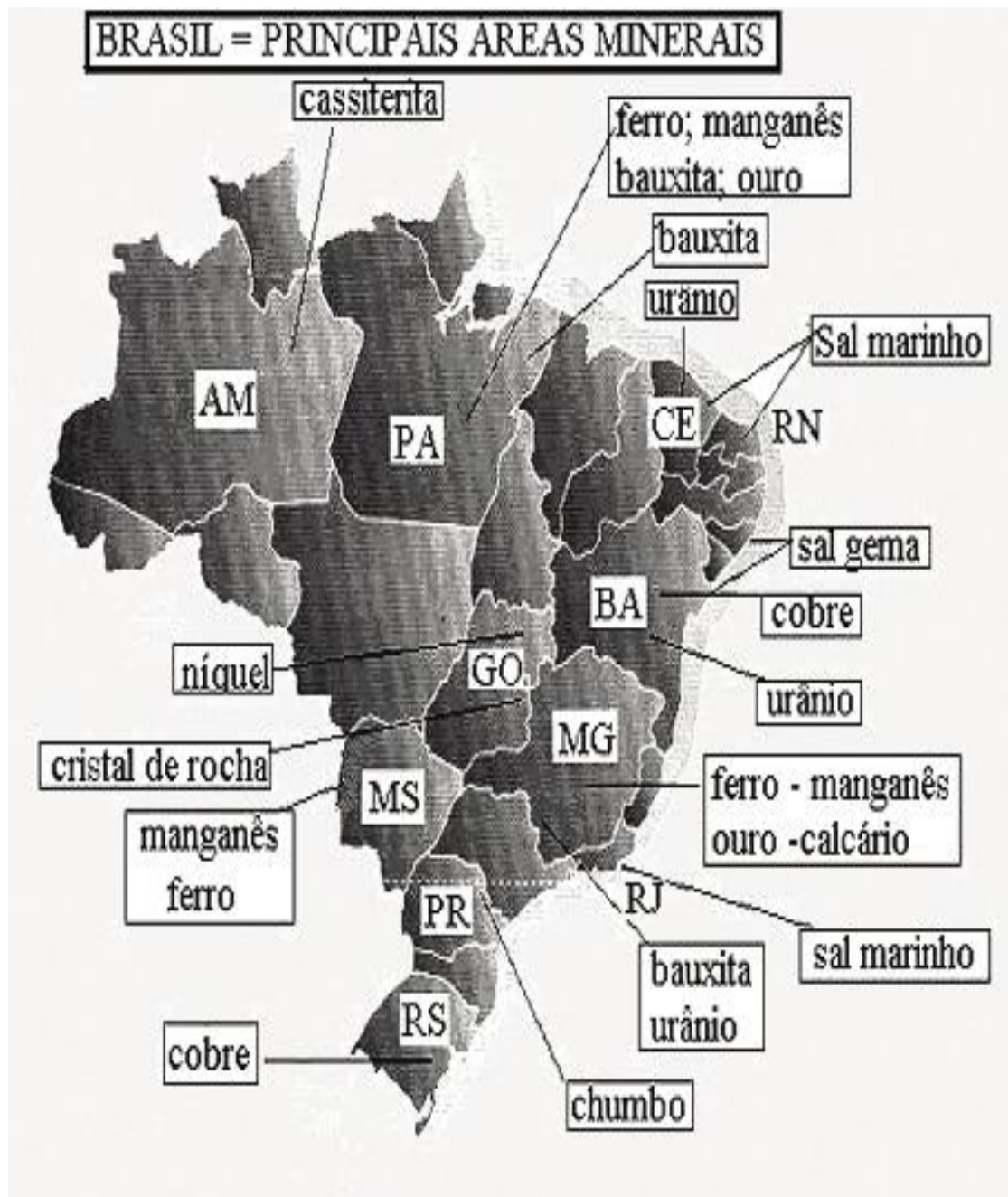


Figura 4 – Principais ocorrências minerais no Brasil [Fonte: (adaptado do mapa Google)]

No Brasil, diversas indústrias podem ser classificadas como potencialmente geradoras de NORM e sua operação pode requer um controle radiológico ocupacional e ambiental adequado às suas características. Dependendo dos níveis de radioatividade, estas indústrias são passíveis de controle pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Tais indústrias encontram-se dispersas em todo território brasileiro e, portanto, as características regionais têm um papel primordial na exposição da população aos possíveis poluentes libertados pelas instalações.

2. 3. Generalidade sobre Angola

Angola é um país da costa ocidental da África com 1.247.000 Km², cujo território é limitado a norte e a nordeste pela República Democrática do Congo, a leste pela Zâmbia, a sul pela Namíbia e a oeste pelo Oceano Atlântico, conforme ilustrado na figura 7.

Em termos geográficos, Angola está dividida em uma orla litoral árida, temperatura fria de benguela, um planalto inferior húmido, uma savana seca no interior sul e sudeste, floresta tropical no norte e em Cabinda. O clima apresenta duas estações, verões quentes e secos e invernos temperados. O período chuvoso acontece de Fevereiro a Abril, mas nas zonas de maior altitude, como no interior este período vai de Novembro a Abril, seguido de uma estação seca e fria de Maio a Outubro.



Figura 5 – Localização da Angola no mundo (Fonte:[adaptado do google map])

O português é a língua oficial de Angola. Entre as línguas africanas faladas no país, algumas têm estatuto de língua nacional como umbundu, quimbundo, kikongo, cômwe, ganguela e o cuanhama.

Em termos de recursos minerais, Angola possui um grande potencial, estima-se que no seu subsolo se encontrem 35 dos 45 minerais mais importantes do mercado mundial (SANTOS, 2010).

O potencial dos recursos minerais de Angola é praticamente desconhecido. Desde 1975 que o país se tornou independente, a mineração resume-se na extração de diamantes, no nordeste do país, nas províncias de Lunda Norte e Lunda Sul, e na extração de mármore e granitos na região sudoeste, mas em escalas reduzidas (SANTOS, 2010).

Em Angola existem abundantes e variados recursos minerais (MGM, 2016; DIOGO, 2015). A exploração e aproveitamento destes recursos constitui um importante meio de desenvolvimento para às populações actuais e futuras, visando à promoção do desenvolvimento sustentável.

Toda a mineração em Angola está sobre tutela do Ministério da Geologia e Minas. No seu subsolo, encontram-se muitos dos minerais importantes para o comércio mundial, como o óleo, diamantes, gás natural, substâncias betuminosas, rochas ornamentais, fluorite, titânio, sal-gema, sais de potássio, ferro, cobre e ouro. Para além destes, existe uma vasta gama de recursos naturais em quantidade e diversidade disponíveis para prospecção.

O setor mineiro em Angola é tido como um dos pilares para diversificação da economia (MERCADO, 2015). Contudo, atualmente existe apenas produção significativa e sistemática dos diamantes, sendo que a exploração de outros minérios está dependente da conclusão do Plano Nacional de Geologia e Minas (PLANAGEO⁶).

Para Alves da Rocha, com o PLANAGEO – que tem como objetivo a caracterização do potencial geológico-mineiro do país para futuros investimentos – é um “trunfo” a ter em conta (EXPANSÃO, 2015), (figura 6).

A expectativa do PLANAGEO, segundo Miguel Bondo Júnior, Secretário de Estado para a Geologia, é que as suas descobertas impulsionem

⁶ O PLANAGEO, visa o aumento do conhecimento geológico-mineiro do País de modo a contribuir para a sustentabilidade do desenvolvimento de Angola, atrair novos investimentos; agregar valor a economia; permitir a elaboração da cartografia temática de cunho geológico, geotécnico e metalogénico; implementar estratégia de diversificação no setor mineiro assegurando o lançamento de novos projectos e o aproveitamento de matéria-prima de origem mineira para o apoio a indústria transformadora nacional [115].

a economia, através da exploração de outros recursos minerais, agregando valores e gerando riqueza (MERCADO, 2015).

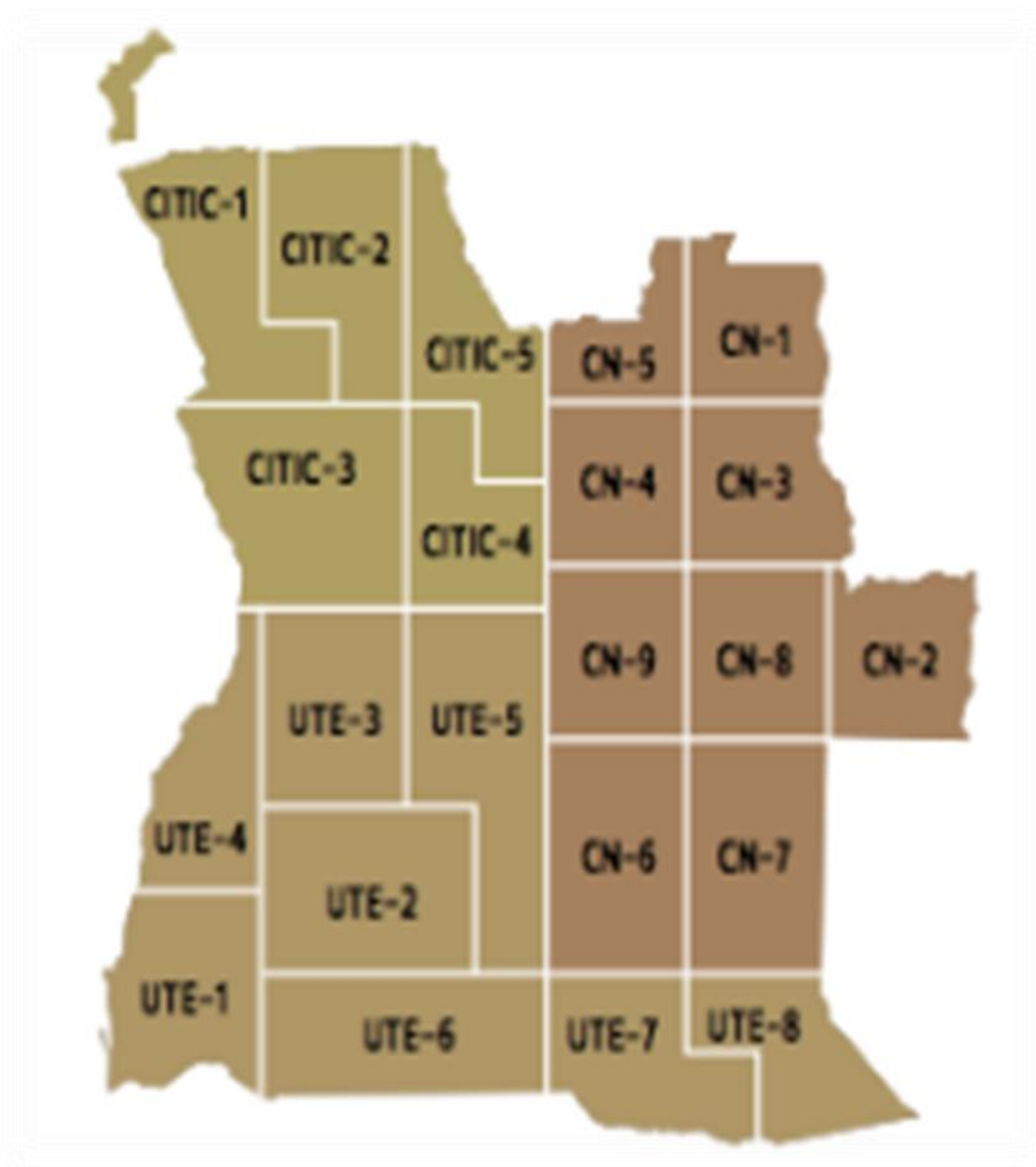


Figura 6 – Mapa representativo do Planageo, onde o país foi dividido em três zonas – com distintos operadores – constituindo 22 blocos (Fonte [REM, 2015])

Para elaboração do levantamento do potencial mineiro, o país conta com a participação de empresas da China, Brasil e Espanha, abrindo assim a possibilidade do diamante deixar de ser o único mineral explorado em grande escala, tendo em conta o potencial do subsolo angolano. As empresas CITIC (China), Costa Negócio (Brasil) e Impulso (Espanha) estão a trabalhando na

descoberta do que existe e criar a base para exploração mineira nos próximos 100 anos.

Importante salientar, que o término dos estudos do PLANAGEO dará luz ao manancial dos recursos em Angola, com um nível de detalhamento que diminuirá os custos de pesquisa para sua exploração, podendo ser um forte indicador para a promoção da diversificação, atraindo novos investimentos e minimizar a extrema dependência do petróleo na balança da economia nacional.

Segundo Francisco Queiroz (ANGOLA, 2014), Ministro da Geologia e Minas (MGM), para que o país não dependa apenas de uma fonte de receita, é preciso explorar corretamente outras áreas fora do petróleo para aumentar as receitas do Estado. O ministro apontou também, que o país está aberto a novos investimentos no domínio do ouro, cobre, ferro, metais básicos, platina, níquel, magnésio, mica, barite, pedras semipreciosas e urânio (FINANÇAS, 2015; EXAME, 2015; MERCADO, 2015).

Para além do exposto acima, existem ações desenvolvidas no sentido de se relançar a indústria de fertilizantes em Angola, com efeitos multiplicadores para o setor agrário e petroquímico, bem como trabalhos de avaliação dos fosfatos e fertilizes nas províncias de Cabinda e Zaire respectivamente.

Novos projetos em Angola estão em curso para exploração de cobre, granito negro e ouro (na Huila), diamantes (Luanda norte e Sul), ferro e manganês (Kwanza Norte).

2. 3. 2. Potencias industriais geradoras de NORM na República de Angola

Materiais radioativos de ocorrência natural são e sempre farão parte do nosso mundo. Tanto o planeta quanto a atmosfera terrestre contém diferentes espécies radioativas naturais. Desde o seu aparecimento na terra, o homem encontra-se exposto à radiação proveniente dos radionuclídeos presentes na crosta terrestre.

Somente nos últimos trinta anos, dado o uso crescente da radioatividade em suas múltiplas aplicações, cresceu o interesse pela determinação da

exposição às radiações devido ao NORM, às quais o homem pode estar sujeito (REIS, 2016).

As principais indústrias identificadas com potencial de gerarem NORM na República de Angola encontram-se na tabela 9.

Tabela 9 – Potenciais indústrias geradoras de NORM na República de Angola

| Indústrias NORM internacionalmente | Angola | |
|--|---------------|---------------------------|
| | Identificação | Localização |
| Extração de terras raras | Aplicável | Huila, Benguela |
| Produção e uso de tório e seus compostos | Não avaliado | |
| Produção de nióbio e ferro-nióbio | Aplicável | |
| Petróleo e Gás; | Aplicável | Cabinda |
| Energia geotérmica | Não avaliado | |
| Tratamento de água potável | Aplicável | |
| Tratamento de esgoto | Aplicável | |
| Mineração de carvão e sua combustão; | Não avaliado | |
| Mineração e métodos de processamento: alumínio, ferro, cobre, ouro, areias minerais e indústrias relacionadas, | Aplicável | Huila, Uíge, Kwanza Norte |
| Mineração de fosfato e produção de fertilizantes | Aplicável | Cabinda |
| Argila, cerâmica e material de construção; | Aplicável | Luanda Huambo |
| Produção de ácido sulfúrico a partir de queima de piratas; | Não avaliado | |
| Queima de xisto para produzir óleo; | Não avaliado | |

2. 4. Legislação sobre o NORM

A questão da regulamentação do NORM apresenta novos desafios, tanto para os Organismos Reguladores como para os operadores. Ao contrário das indústrias nucleares tradicionais, as indústrias potencialmente geradoras de NORM não possuem supervisão de proteção radiológica e não estão equipadas com equipamentos para monitoração radiológica. Alguns bens de consumo que contêm NORM que tradicionalmente não eram considerados como um problema radiológico (como alguns fertilizantes), atualmente, podem ser submetido à regulamentação, originando consequências sociais e econômicas. O transporte e a disposição do NORM também são uma

preocupação que deve ser necessário considerar, particularmente devido movimentação de grandes volumes (AIEA, 2006).

No cenário internacional, Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), e a Comunidade Europeia têm publicado recomendações sobre aplicação dos conceitos de isenção e dispensa para atividades relacionadas com o NORM (AIEA, 2006 e 2011).

O critério de isenção aplicado ao NORM deve ser justificado, tendo como premissa um benefício para indivíduos expostos e a sociedades no geral, suficientes para compensar o detrimento correspondente, tendo em conta fatores sociais e econômicos. O critério de isenção é o ato regulatório que isenta uma situação de exposição planejada ou fonte de posterior controle regulatório, do ponto de vista da proteção radiológica, enquanto a dispensa visa à retirada do NORM do controle regulatório associada a uma situação de exposição planejada (REIS, 2016). De acordo com Basic Safety Standards (BBS), o material pode ser liberado quando o risco da radiação for baixo, e o controle regulatório contínuo não resultando no aumento da dose individual ou risco a saúde.

Devem ser observados os seguintes limites adotados: a exposição indevida a materiais utilizados em qualquer situação de exposição planejada (prática) especificada na concentração de atividade no material de qualquer radionuclídeo das cadeias naturais do urânio e do tório seja superior a 1Bq/g e a concentração da atividade de K40 seja superior a 10Bq/g (AIEA, 2013).

2. 4. 1. Organizações internacionais

Os conceitos, procedimentos, valores e filosofia de trabalho em proteção radiológica se atualizam continuamente e são detalhados nas publicações:

- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR – Dados sobre fontes e efeitos da radiação;
- International Commission on Radiological Protection, ICRP – Recomendação para proteção;
- International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU - Desenvolver e promulgar recomendações internacionalmente aceites

sobre quantidades e unidades relacionadas à radiação, procedimentos de medição e dados de referência;

- World Health Organization, WHO - objetiva desenvolver ao máximo possível o nível de saúde de todos os povos e;
- International Atomic Energy Agency, IAEA - Regulatory and Standard.

A UNSCEAR fundada em 1955 pela Assembleia Geral das Nações Unidas, tem como objetivo avaliar e relatar os níveis e efeitos da exposição à radiação ionizante (UNSCEAR, 2006). Tornou-se a autoridade pública internacional sobre os efeitos da radiação ionizante usada para fins pacíficos, bem como para fins militares, provenientes de fontes naturais ou de fontes produzidas pelo homem (REIS, 2012).

A AIEA pública recomendações, algumas baseadas nas recomendações da ICRP, tendo como função estabelecer normas de segurança e providenciar a sua aplicação. As normas recomendadas pela AIEA não têm caráter obrigatório. No entanto, os países membros da AIEA são obrigados a adotá-las.

As publicações da AIEA têm desencadeado vários debates e ações, visando a regulação do NORM em vários países. Esforços consideráveis têm sido feitos no mundo inteiro para quantificar os riscos radiológicos para os indivíduos expostos nas diferentes indústrias com potencial de gerarem NORM (REIS, 2016).

A legislação tem sido revisada, atualizada e implementada em diversos países, com o objetivo de introduzir medidas de proteção radiológica para o trabalhador e o meio ambiente contra os efeitos das radiações ionizantes resultantes de atividades que envolvem o NORM (REIS, 2016).

A legislação nuclear para ser estabelecida, segue um processo, alicerçada pela necessidade de estudos científicos que induzem a UNSCEAR a fazer uma série de avaliações, que servem de base para as recomendações da ICRP (influenciando também as normas da WHO e da ISSO), que normalmente são adoptadas pela AIEA, que por sua vez, recomenda implementar sugestões na legislação dos estados membros (REIS, 2012), conforme ilustrado na figura 7.

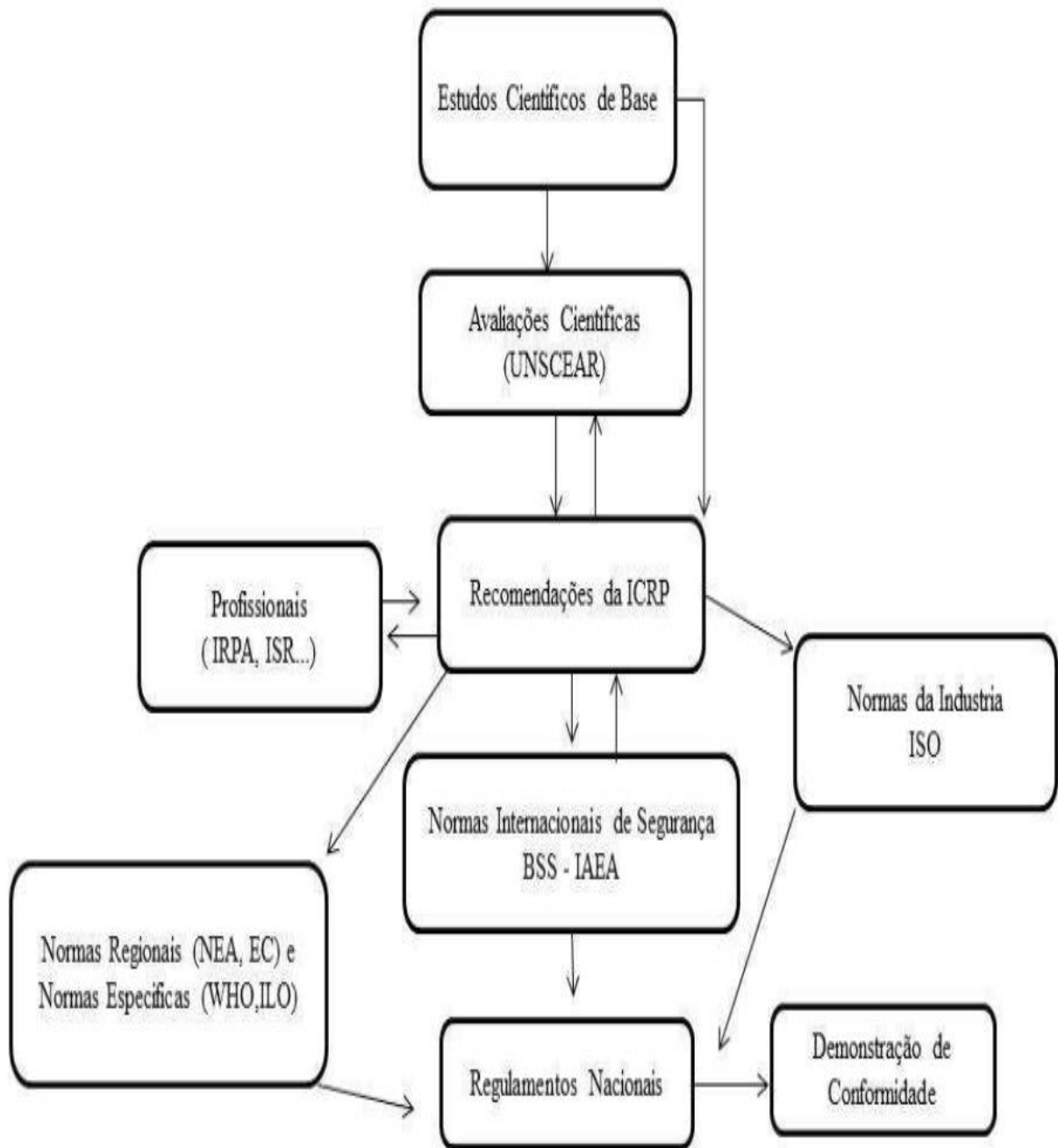


Figura 7 – Processo de gestão das recomendações da ICRP, (Fonte [REIS, 2012])

Segundo UNSCEAR, citado por Reis (2012), poucos países mantêm um programa rotineiro de monitorização dos trabalhadores, pois se trata de um exercício complicado, dificultado a compreensão da extensão do problema e fornecendo a formulação de soluções genéricas, devido a enorme diversidade de minérios contendo NORM, com baixas concentrações de radionuclídeos, que possam estar presentes nos produtos, subprodutos, rejeitos e efluentes.

2. 4. 2. Aspecto regulatório do Brasil

O arcabouço regulatório brasileiro é moderno e se esforça para seguir as tendências internacionais relativas ao tema. No Brasil, a legislação do NORM é desenvolvida pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que tem o papel nas questões de segurança e proteção da população e do meio ambiente. A CNEN vela pelo aspecto da radioatividade.

Cabe a CNEN entre outros requisitos:

- 1) Estabelecer diretriz específica para radioproteção e segurança nuclear;
- 2) Elaborar e fazer cumprir: Regulamentos e Normas de segurança e proteção relativas à manipulação de materiais nucleares e a comercialização de: Material nuclear, Minerais nucleares e Concentrados que contenham elementos nucleares.
- 3) Fiscalizar a industrialização de minerais nucleares, a produção e o comércio de materiais nucleares, sendo que as operações de compra, venda, importação, exportação, empréstimo, cessão e arrendamento somente poderão ser exercidos sobre a licença e fiscalização da CNEN;
- 4) Expedir normas, licenças e autorizações relativas à: instalações nucleares e posse, uso, armazenamento e transporte de material nuclear.

A CNEN vem avaliando e preparando relatórios sobre as consequências da operação das indústrias NORM, principalmente na mineração desde a década de 1980 (AIEA, 2006).

Em 1994 a CNEN desenvolveu o projecto da mineração coordenado pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) com objetivo de avaliar os potenciais impactos radiológicos das diferentes indústrias de extração mineira. As indústrias examinadas envolviam plantas de mineração e moagem de: ferro nióbio, fosfatos, carvão e ouro. Tanto os impactos ocupacionais como ambientais foram avaliados tendo em conta cenária operacional como pós-operacional (AIEA, 2006).

Outros dois estudos subsequentes foram também realizados: o uso de fosfogesso na agricultura e como material de construção, sendo que os

resultados não mostraram consequências radiológicas importantes relacionadas ao uso de fosfogesso em qualquer das situações.

Esses estudos culminaram com a elaboração da norma CNEN NN 4.01 sobre Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para instalações Mínero-Industriais, sendo a principal referência na regulamentação do NORM no Brasil, que estabelece os requisitos de Informações Preliminares (IP) que todo operador deve fornecer à CNEN, como o fluxograma simplificado do processo operacional, teores medidos ou estimados dos radionuclídeos, capacidade nominal de produção da instalação, estimativa da solubilidade dos radionuclídeos nos rejeitos, descrição das instalações de armazenamento, bem como, a descrição dos sistemas de deposição de resíduos e rejeitos. (REIS, 2012). A CNEN NN 4.01 aplica-se apenas às indústrias de mineração (a mineração de urânio é excluída, uma vez que é considerada no Brasil como instalação nuclear)(AIEA, 2006).

Para além da norma CNEN NN 4.01 existem outras normas complementares como:

- ✓ CNEN NE-1.13 – sobre Licenciamento de Instalações de Mineração e Beneficiamento de Urânio e Tório,
- ✓ CNEN NE-1.10 – sobre Segurança de Sistemas de Bacia de Rejeitos;
- ✓ CNEN NN 3.01 – sobre Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica,
- ✓ CNEN NN 3.02 – sobre Serviços de Radioproteção
- ✓ CNEN-NE-2.01 – sobre Proteção Física de Unidades Operacionais da Área Nuclear, quando aplicáveis.
- ✓ CNEN - 04/69 – sobre Regras para o Exportador e Importador de Minerais ou Minérios que Contenham Elemntos Nucleares.
- ✓ CNEN NN 8.01– sobre Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixos e Médios Níveis de Radiação,
- ✓ CNEN NN 8.02 – sobre Licenciamento de Depósitos de Rejeitos Radioativos de Baixos e Médios Níveis de Radiação,
- ✓ CNEN NN 5.01 – sobre Transporte de Material Radioativo

As indústrias NORM podem ser classificadas em três categorias no Brasil, conforme a tabela 10. As categorias são definidas com base na

atividade específica de uma substância radioativa sólida, natural ou concentrada, que possa ser processada por uma determinada instalação.

Tabela 10 – Classificação das categorias na indústria NORM do Brasil

| Categoria | Atividade específica (Bq/g) | Exigências |
|------------------|------------------------------------|------------------------|
| I | > 500 | IP e RAS ⁷ |
| II | > 10 e ≤ 500 | IP e RASS ⁸ |
| III | ≤ 10 ou ≥ 1 mSv/ano | IP |

De acordo com a categoria que a indústria é classificada, esta pode ser submetida a diferentes níveis de requisitos durante o processo de licenciamento.

Os critérios de isenção e dispensa do controle regulatório estabelecidos na norma CNEN NN 3.01 são os mesmos instituídos internacionalmente (REIS, 2016), e se baseiam em cenários que utilizam quantidades de material (menor que uma tonelada) e são expressos em concentração de atividade (Bq/g) e na atividade (Bq).

De acordo com os novos Requisitos Gerais de Segurança (GSR) Partes 3 de 2014 são estabelecidos valores preconizados para isenção, conforme a tabela 11.

Tabela 11 – Valores estabelecidos pela AIEA para isenção de material sólido contendo radionuclídeos naturais [Fonte (Adaptado de REIS, 2016)]

| Substâncias radioativas | Concentrações |
|--------------------------------|--|
| Série do U | Superior ou igual a 1 Bq/g para todos radionuclídeos |
| Série do Th | Superior ou igual a 1 Bq/g para todos radionuclídeos |
| K-40 | Superior ou igual a 10 Bq/g |

No cenário internacional, no que diz respeito a legislação de NORM, comparativamente ao Brasil é apresentado na tabela 12.

⁷ Relatório de Análise de Segurança

⁸ Relatório de Análise de Segurança Simplificada

Tabela 12 – Legislação internacional [Fonte (REIS, 2016)]

| Entidade | Limite de dose para o público (mSv/ano) | Limite de dose para trabalhador (mSv/ano) | Isenção (Bq/g) | Índice para material de construção | Radônio nível de investigação no local de trabalho |
|---------------------|---|---|--|------------------------------------|--|
| AIEA | 1 | 20 | 1 mSv/ano $^{232}\text{Th} < 1$ $^{238}\text{U} < 1$ $^{40}\text{K} < 10$ | não | 1000 Bq/m ³ |
| Comunidade Europeia | 1 | 20 | $^{232}\text{Th} < 1$ $^{238}\text{U} < 1$ $^{40}\text{K} < 10$ | Sim | 300 Bq/m ³ |
| EUA | 1 | 20 | $^{226}\text{Ra} < 0,2$ $^{228}\text{Ra} < 0,2$ para solo | não | 100 pCi.L ⁻¹ |
| China | 1 | 20 | 5 µSv/h ou $^{238}\text{U} < 10$ $^{226}\text{Ra} < 10$ $^{232}\text{Th} < 10$ $^{40}\text{K} < 5$ | sim | não |
| Brasil | 1 | 20 | $^{238}\text{U} < 10$ $^{226}\text{Ra} < 10$ $^{226}\text{Ra} < 10$ $^{210}\text{Pb} < 10$ $^{232}\text{Th} < 10$ $^{40}\text{K} < 5$ | não | 1000 Bq/m ³ |

Se determinado setor não cumpre esses critérios, será tratado como uma instalação radioativa. O resultado é que uma unidade de produção de óleo, em que as fontes radioativas são armazenadas, pode se tornar numa instalação radioativa se a concentração de atividade dos isótopos de rádio no material exceder o nível de isenção (AIEA, 2006).

2. 4. 3. Aspectos regulatórios de Angola

Em Angola, uso das radiações ionizantes e materiais radioativos, têm trazido benefícios importantes em setores da economia, como a medicina, a agricultura, a investigação, o ensino, o desenvolvimento tecnológico e em particular a indústria extrativa (ANGOLA, 2007).

A Autoridade Reguladora de Energia Atômica (AREA), em Angola, é o órgão responsável pelo controle das radiações ionizantes, criada pelo Estado,

é dotada de personalidade jurídica, autonomia administrativa, financeira e patrimonial. É um instituto público, de carácter científico e desenvolvimento tecnológico que tem por finalidade assistir o governo na condução dos objetivos da política de utilização de energia nuclear (ANGOLA, 2007).

O arcabouço regulatório em Angola, atinente a minérios que tenham potencial de geral material radioativo de ocorrência natural, envolve várias instituições, como o Ministério de Energia e Águas (MINEA), o Ministério do Petróleo, o Ministério da Geologia e Minas (MGM), o Ministério do Ambiente, Ministério da Agricultura, Ministério da Saúde, entre outros, sendo da responsabilidade exclusiva do órgão regulador (AREA), tutelada pelo MINEA, fiscalizar, controlar, avaliar e elaborar normas relativas ao NORM, visando à proteção das pessoas e do meio ambiente dos efeitos das radiações ionizantes, resultante de uma situação de exposição planejada ou existente.

No geral, os regulamentos aplicados ao NORM na República de Angola destacam-se: a Lei 4/07, sobre de Energia Atómica, que entre várias atribuições, tem como objetivo: estabelecer normas reguladoras de atividades relacionadas, direta ou indiretamente, com a produção e uso fontes de radiação ionizante e assegurar a efetiva proteção dos cidadãos e do meio ambiente; o Decreto Presidencial 12/12 de 25 de Janeiro, Regulamento sobre Radioproteção; o novo Código Mineiro, que regula toda atividade geológico-mineira. (ANGOLA, 2013); a Lei de Base do Ambiente e o Regulamento sobre Transporte Rodoviário de Mercadorias Perigosas, além de outros pertinentes regulamentos internacionais.

2. 4. 3. 1. Regulamentos específicos

Para além dos regulamentos gerais mencionados, está em curso sob proposta da AREA para aprovação, normas específicas sobre o NORM, como:

- ✓ Regulamento para Licenciamento de Instalações Radiológicas;
- ✓ Escolha e Seleção dos Locais para Depósitos de NORM e outros Materiais Radioativos;
- ✓ Regulamento sobre Licenciamento de Depósitos de Resíduos Radioativos de Baixo e Médio Nível de Radiação.

CAPÍTULO 3 – EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL NA MINERAÇÃO

3. 1. Aspecto de proteção radiológica para a indústria do NORM

A mineração, assim como várias indústrias, podem gerar impactos ambientais radiológicos que carecem de avaliação e controle regulatório.

Atualmente um dos aspectos em foco na agenda de diversos países é dimensionar o impacto que o NORM pode causar na saúde e no meio ambiente e regular ou aperfeiçoar a legislação existente (REIS, 2012). Existe um esforço no sentido de mitigar os eventuais riscos causados pela radioatividade através de uma gestão adequada em atividades indústrias potencialmente geradoras de NORM, de modo a minimizar os impactos ambientais em consequência à exposição que possa resultar devido aos rejeitos radioativos (REIS, 2012).

Para mineração de commodities, que contenham NORM, existe o risco de exposição à radiação ionizante para os trabalhadores, meio ambiente e o público. Para mitigar esses efeitos, exige-se adoção de medidas corretas de proteção radiológica (DIMENSTEIN e HORNOS, 2004).

A ICRP acredita que qualquer exposição à radiação pode ser potencialmente prejudicial para a saúde e estabelece três princípios fundamentais para a gestão do NORM: **Justificação, Otimização e Limitação de dose** (CANADA, 2000).

Em função da sua abundância, meia-vida e toxicidade química, os radionuclídeos das séries naturais considerados mais importantes do ponto de vista da proteção radiológica são: Th-232, Th-228, Th-230, U-238, U-234, Ra-226, Ra-228, Rn-222, Pb-210 e Po-210 (LAURIA et al, 2014).

3. 1. 1. Exposição ocupacional

Na mineração a exposição ocupacional pode ocorrer quando os trabalhadores entram em contato rápido ou prolongado com materiais contendo NORM, inalando poeiras geradas devido ao processamento de matérias-primas. Pode acontecer em processos industriais ou em operações de manutenção.

As vias mais comuns de exposição resultantes de processos que envolvem radionuclídeos naturais são devido à radiação gama externa, a partir

de grandes quantidades ou pilhas de materiais armazenados ou resíduos depositados dentro dos equipamentos e a inalação.

3. 1. 2. Exposição pública

A exposição pública pode advir de produtos gerados de um processo, a partir das descargas atmosféricas ou líquidas de efluentes, bem como da reutilização de subprodutos de matérias contendo NORM.

3. 2. Métodos de exploração mineira

Desde os tempos pré-históricos, a mineração tem sido importante para a humanidade (CURI, 2014). Evoluiu, principalmente desde a Idade da pedra, e pode ser considerada como a segunda atividade industrial mais antiga da humanidade, depois da agricultura (CURI, 2014).

Segundo Houaiss, citado por Curi (2017), “a mineração é um termo que deriva do latim medieval *mineralis* relativo a mina e a minerais”. Tipicamente uma atividade do setor primário que gera matéria-prima para o setor industrial e secundário, ou seja, um conjunto de operações unitárias para extração de minerais existentes na crosta terrestre.

Para se extrair um mineral não basta determinar uma anomalia, é necessário outras atividades que se interconectam, tais como pesquisa geológica para identificação do mineral de interesse, sondagem para avaliação das reservas contidas, sondagem de desenvolvimento para extensão das jazidas, engenharia de processo e a elaboração do projecto minério (OLIVEIRA, 2011).

Dependendo da profundidade do minério e das condições ambientais locais, da composição, da forma e grau do depósito (AIEA, 1993), hidrogeologia e aspetos geotécnicos das rochas circundantes, a mineração pode ser realizada por dois métodos principais (AIEA, 2000) Método Exploração Céu Aberto (MECA) e Método de Exploração Subterrânea (MES), sendo o Método de Lixiviação in Situ (MLIS) a terceira opção, para minérios com características especiais.

3. 2. 1. Método Exploração Céu Aberto

Destinado para depósitos rasos, envolve a escavação ou detonação de explosivos para remoção de grandes quantidades de rochas estéril a fim de aceder ao corpo minério.

O MECA origina grandes quantidades de resíduos (NEA, 2014), que podem liberar contaminantes e produtos das séries radioativas para o meio ambiente, bem como, poeiras radioativas e gás radônio, com consequências para os trabalhadores, mas também para o meio ambiente e os habitantes locais. Para minérios de alto teor (como urânio e tório), normalmente necessitam dispositivos de blindagem, que devem ser incorporados nos veículos de cargas, para proteger os operadores das doses de radiação gama, (AIEA, 2000) enquanto, os de baixo teor, exigem mineração e moagem de grandes quantidades de volumes de estéril com impactos ambientais significativos (AIEA, 2000).

Nas instalações de armazenamento de minério, devem ser estabelecidas zonas de monitoração para avaliar a quantidade do ar ambiente com o objetivo de investigar a longa vida do gás radônio e poeiras radioativas associadas ao NORM (AIEA, 2000).

3. 2. 2. Método de Exploração Subterrânea

O MES é utilizado para depósitos localizados a grandes profundidades. Requer a construção de túneis e poços de acesso (PIERZELA, 2013). Os riscos ambientais e da saúde são semelhantes aos MECA, com realce, para as poeiras radioativas e o radônio que não são libertados diretamente para atmosfera, mas se acumulam no interior da mina, causando maior perigo para a saúde dos trabalhadores.

O design de ventilação para o controle do gás radônio e dos seus produtos de decaimento radioativos é uma condição essencial para MES (AIEA, 1996 e 2000).

3. 2. 3. Método de lixiviação in situ

O MLIS geralmente consiste na introdução de uma solução de lixiviação através de poços de injeção para o aquífero mineralizado, resultando na

recuperação do mineral por bombeamento à superfície (NEA, 2014). O minério é extraído da rocha hospedeira sem necessidade de escavação e moagem do minério, por isso não são gerados resíduos sólidos, apenas resíduos líquidos que são confinados no sistema de evaporação (NEA, 2014), evitando exposição ocupacional e do público (AIEA, 2000).

3. 3. Extração de petróleo e gás

Segundo Matta, citado por Reis (2016), na indústria de óleo e gás, as análises efetuadas em diferentes poços, têm mostrado que os radionuclídeos de meia-vida longa das séries radioativas do urânio e tório não são mobilizados nas formações rochosas onde estão contidos, com exceção dos isótopos Ra-226, Ra-224, Ra-228 e Pb-210 que aparecem principalmente na água de produção durante a extração de petróleo e gás.

Os isótopos mobilizados e produtos de seus decaimentos radioativos podem precipitar na solução juntamente com sulfato e depósitos de carbono, formando incrustações ou borras em tubos e equipamentos.

O NORM na indústria de petróleo e gás representa um problema para os trabalhadores, particularmente durante a manutenção, transporte de resíduos processamentos e desativação (descomissionamento). O Rn-222 é o produto de decaimento imediato do Ra-210, que pode, portanto, agregar-se como uma película fina em equipamentos da linha de extração de gás. Os níveis de radioatividade reportados variam de forma significativa, dependendo da radioatividade do reservatório de óleo e da salinidade da água de produção. Para o Pb-210 emissor beta, requer uma preocupação quando as áreas internas dos tubos ficam expostas (MATTA, 2016).

3. 4. Principais riscos radiológicos na mineração com NORM

Os principais riscos radiológicos na mineração são os de incorporação de radionuclídeos por atividade inalada, da taxa de dose e contaminação de superfícies, que necessitam de monitoração individual e do controle de exposição radiológica ocupacional, do público e do meio ambiente nas áreas de mineração e gestão de resíduos radioativos, devido a presença do NORM.

Entre os radionuclídeos mais importantes, do ponto de vista de amostragem de ar, destacam-se o ^{238}U o ^{232}Th e seus respectivos produtos de

decaimento radioativo (principalmente o ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{222}Rn), devido ao elevado número de indivíduos expostos.

3. 4. 1. Radiação Direta

A radiação direta (RD) resulta da presença dos radionuclídeos presentes no minério, emissores principalmente de raios gama, com cerca de 80% da energia gama no minério provenientes do bismuto 214 (^{214}Bi) e 12% do ^{214}Pb , ambos descendentes da meia-vida do ^{222}Rn .

3. 4. 2. Radionuclídeos inalados

Apesar de diversos radionuclídeos estarem presentes em pequenas quantidades na atmosfera, a principal preocupação prende-se à inalação do radônio, que ao decair emite partículas alfas (CHRISTOVAM, 2013), bem como a presença de aerossóis na fração respirável.

Em ambientes ventilados, as doses de radiação geradas pela inalação do radônio não motivam grande preocupação. A exposição devido ao radônio varia de 0,1 a 0,2 mSv/ano. No entanto, em casas fechadas (principalmente nos meses de inverno) e minas subterrâneas sem ventilação, pode haver um acúmulo desse gás em virtude da contínua emanção do solo (CHRISTOVAM, 2013).

3. 4. 3. Radônio

O radônio 222 (Rn-222) é dos produtos do decaimento radioativo da série radioactiva do U-238. É um gás nobre, incolor, inodoro e insípido de número atómico 86, que integra o grupo 18 da tabela periódica (ESCOVAL, 2010). Por ser um gás nobre, não interage com outros elementos e, por sua natureza gasosa, possui capacidade de exalar do solo ou rochas com extrema facilidade e concentrar-se em ambientes fechados (FERREIRA, 2013). Pode penetrar nos edifícios através das fendas no chão. Como é ligeiramente solúvel em água pode estar contido em diversos materiais (ESCOVAL, 2010).

A dose interna deve-se principalmente à inalação do ^{222}Rn proveniente da série do ^{238}U . Além deste, existem outros dois isótopos naturais do Rn⁹, descendentes das séries do ^{235}U e do ^{232}Th , todos emissores de partículas α (FERREIRA, 2013), conforme a Tabela 13.

Tabela 13 – Isótopos do radônio (Fonte [FERREIRA, 2013])

| Série | Isótopo | Meia-vida |
|-------------------|-------------------|---------------|
| ^{238}U | ^{222}Rn | 3,8 Dias |
| ^{235}U | ^{219}Rn | 3,96 Segundos |
| ^{232}Th | ^{220}Rn | 55,6 Segundos |

A exposição devido ao ^{222}Rn é reconhecida como um importante risco ao sistema respiratório, principalmente pela incorporação dos seus descendentes de meia-vida curta (FERREIRA, 2013; IAEA, 1993; ESCOVAL, 2010). Os isótopos, uma vez fixos em aerossóis, podem ser inalados, depositando-se nos pulmões (IAEA, 1993).

Como o urânio está presente nos solos, rochas, água, material de construção, é natural a existência do Rn no ar¹⁰, sendo sua concentração determinada principalmente pelos seguintes factores: revestimento do solo (por exemplo, pavimentação, construção e vegetação), porosidade e granulometria do solo, temperatura, pressão atmosférica, altitude, teor de umidade do solo, condições atmosféricas e estações do ano (FERREIRA, 2013).

Segundo a WHO, o ^{222}Rn ¹¹ e os seus descendentes são os maiores contribuintes para a dose de radiação pela população mundial, sendo também conhecido como a segunda maior causa de câncer do pulmão depois do tabaco (FERREIRA, 2013).

⁹ Devido às meias-vidas curtas dos isótopos ^{220}Rn , ^{219}Rn e a sua baixa abundância isotópica do ^{235}U (apenas 0,71% do U natural), a maior preocupação radiológica concentra-se na determinação do ^{222}Rn , que apresenta a maior meia-vida de 3,8 dias [34, 70].

¹⁰ O total de ^{222}Rn libertado no ar, é estimado em aproximadamente 9×10^{19} Becquerel (Bq) por ano, dois terços são provenientes do solo e o resto da água doce, sendo que a contribuição dos oceanos é de 1% do total, com menor contribuição das fontes, tais como depósitos de fosfatos e pilhas de resíduos de U.

¹¹ Sendo responsável por 54% da radioatividade natural da Terra, gerado essencialmente por minerais de fosfato de U.

CAPÍTULO 4 – TÉCNICAS DE MEDIÇÃO

4. 1. Espectrometria

A avaliação dos isótopos de rádio presente no NORM é de extrema importância para a proteção radiológica e o meio ambiente. Para identificar e determinar estes radionuclídeos várias técnicas têm sido utilizadas, como a **espectrometria alfa, gama, de cintilação líquida e de massa** (AIEA, 2010). No desenvolvimento do trabalho somente foi estudada e utilizada a espectrometria gama.

4. 1. 2. Espectrometria gama.

Espectrometria gama é uma técnica não destrutiva, cujo princípio, consiste em medir energias de fóton de cada radionuclídeos, permitindo deste modo, identificar e quantificar a atividade de radionuclídeos emissores de radiação gama presentes numa amostra, sem necessidade de separação radioquímica e complicadas como a espectrometria alfa (CARDOSO, 2012). Como vantagem, permitir avaliar simultaneamente vários radionuclídeos (AIEA, 2010). É uma técnica direta, utilizada para determinar radionuclídeos em diversas matrizes, sem necessidade de separação previa dos radionuclídeos na amostra.

Os detectores de HPGe são os mais utilizados em laboratórios, porque possuem boa resolução para medição de emissores gama com baixa atividade e para identificação de radioisótopos presentes em amostras, com uma grande faixa de energia, variando de alguns *keV* a 10 *MeV*, sendo necessária refrigeração quando em operação, podendo manter na temperatura ambiente por muitos dias sem danos ou alterações nas suas condições (TAUHATA, 2014).

O detector é calibrado em eficiência com um coquetel de radionuclídeos, de forma a cobrir toda faixa de canis do espectro, e em energia com uma fonte de radionuclídeos como ^{152}Eu que abrange todo espectro com energias bem distintas ou de ^{137}Cs e ^{60}Co . Para blindar a radiação externa (background e radiação cósmica), os detectores apresentam blindagem de chumbo e uma fina camada de cobre para reduzir a interferência dos raios X (IAEA, 2010).

4. 1. 3. Avaliação do rádio em amostras de borras de petróleo.

Os radionuclídeos mais importantes presentes em borras e incrustações são isotopos de ^{226}Ra e ^{228}Ra .

Fez-se a determinação e análise das atividades de radioisótopos presentes em amostras de borras de petróleo, utilizando a técnica de espectrometria gama do Laboratório de Radiometria do Instituto de Radioprotecção e Dosimetria (IRD). O ^{226}Ra pode ser determinado através de ^{214}Pb (351 Kev) e ^{214}Bi (609 Kev), enquanto o ^{228}Ra a partir do ^{228}Ac , usando o tempo de contagem de 1h-3600s (Araújo, 2005).

4. 1. 4. Materiais utilizados

- 1) Computador;
- 2) Impressora;
- 3) Detectores de germânio hiperpuro;
- 4) Pote, papel de filtro, marcador;
- 5) Balança;
- 6) Três amostras de borras de petróleo.

4. 1. 5. Metodologia

4. 1. 5. 1. Procedimentos

Para avaliar amostras de borras de petróleo utilizaram-se três potes (figura 11) com geometria bem definida de acordo com as especificações do detector, papel toalha para forrar a bancada, a balança, e após o período necessário para se alcançar o equilíbrio secular entre os isótopos de rádio e seus produtos de decaimento, as amostras foram analisadas em um detector de HPGe do laboratório do DIRAD do IRD.



Figura 8 – Potes utilizados para colocar amostras

4. 1. 5. 2. Preparação das amostras

No IRD/CNEN a medição dos isótopos de ^{226}Ra e ^{228}Ra é feita de maneira indireta através de seus filhos ^{214}Bi e ^{214}Pb , onde a amostra é colocada no pote com uma geometria cheia de 10 cm de comprimento, com material polietileno (figura 12).



Figura 9 – Preparação das amostras

Em seguida o pote contendo amostra é pesado e selado (todo) com o papel vegetal para evitar a perda do gás radônio (figura 13).



Figura10 – Peso do pote com a amostra de borra de petróleo.

Seguidamente a amostra é guardada por um período de 30 a 40 dias para que seja alcançado o equilíbrio secular¹² entre o ^{214}Bi e ^{214}Pb .

¹² “Equilíbrio Secular ocorre quando a meia-vida do pai é muito maior que a do filho, logo as atividades dos pais e filhos tornam-se exatamente iguais”.

4. 1. 5. 3. Equipamento utilizado

Depois do período de armazenamento, a amostra é levada para contagem num espectrômetro gama de HPGe como ilustrado na figura 11.



Figura 11 – Contagem da amostra com detector HPGe-IRD/CNEN

O detector foi calibrado em energia com uma fonte padrão de ^{152}Eu , fonte esta que abrange todo espectro (figura 12) e apresenta energias bem distintas. A calibração em eficiência foi realizada através de um coquetel de radionuclídeos montado na geometria da amostra (pote cheio), fornecido pelo Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI/IRD). A curva de calibração em eficiência é mostrada na figura 13.

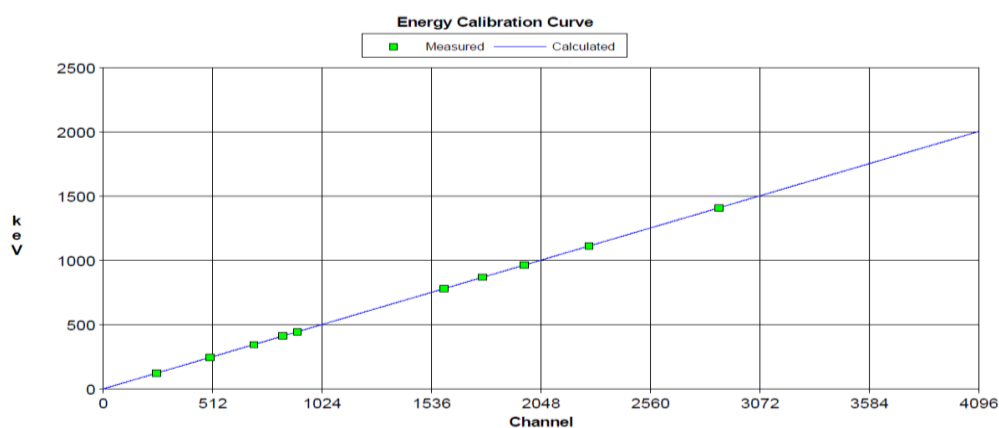


Figura 12 – Energia de calibração com fonte de ^{152}Eu

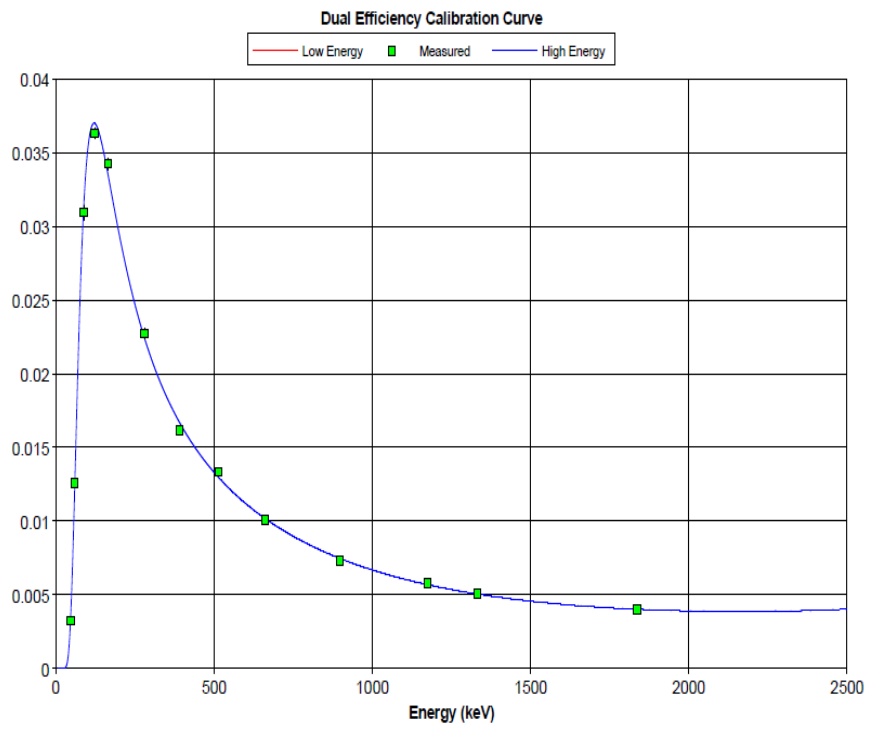


Figura 13 – Curva de eficiência do detector

CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5. 1. Mapa NORM de Angola

A partir das publicações da AIEA sobre as indústrias potencialmente geradoras de NORM:

- a) Extração de elementos de terras raras;
- b) Produção e uso de tório e seus compostos;
- c) Produção de nióbio e ferro-nióbio;
- d) Mineração com outros minerais diferentes dos minerais de urânio e tório;
- e) Produção de óleo e Gás;
- f) Produção de pigmentos de dióxido de titânio;
- g) Indústria do fosfato;
- h) Indústria da zirconita e zircão;
- i) Produção de estanho, cobre, alumínio, zinco, chumbo, ferro e aço;
- j) Tratamento de águas do processamento das indústrias NORM,

e através das avaliações dos documentos do Ministério de Geologia e Minas e da Indústria, que indicam os minérios presentes na exploração na indústria extrativa, bem como minérios associados a estes explorados indicando a presença de urânio e tório. Novos projetos em Angola estão em curso, para exploração de cobre, granito negro e ouro (na Huila), diamantes (Luanda Norte e Sul), ferro e manganês (kwanza Norte), metais básicos, platina, níquel, mica, barita, pedras semipreciosas e urânio, bem como ações desenvolvidas para relançar a indústria dos fosfatos e fertilizantes nas províncias de Cabinda e Zaire respectivamente, com efeitos multiplicadores para o setor agrário e petroquímico. São projetos de investimento, que visam diversificar a atividade extrativa.

Tendo em conta os projetos do sector mineiro em Angola, a abordagem de estudo permitiu elaborar o mapa NORM da República de Angola com base nas indústrias consideradas potencialmente geradoras de NORM, conforme a figura 14.

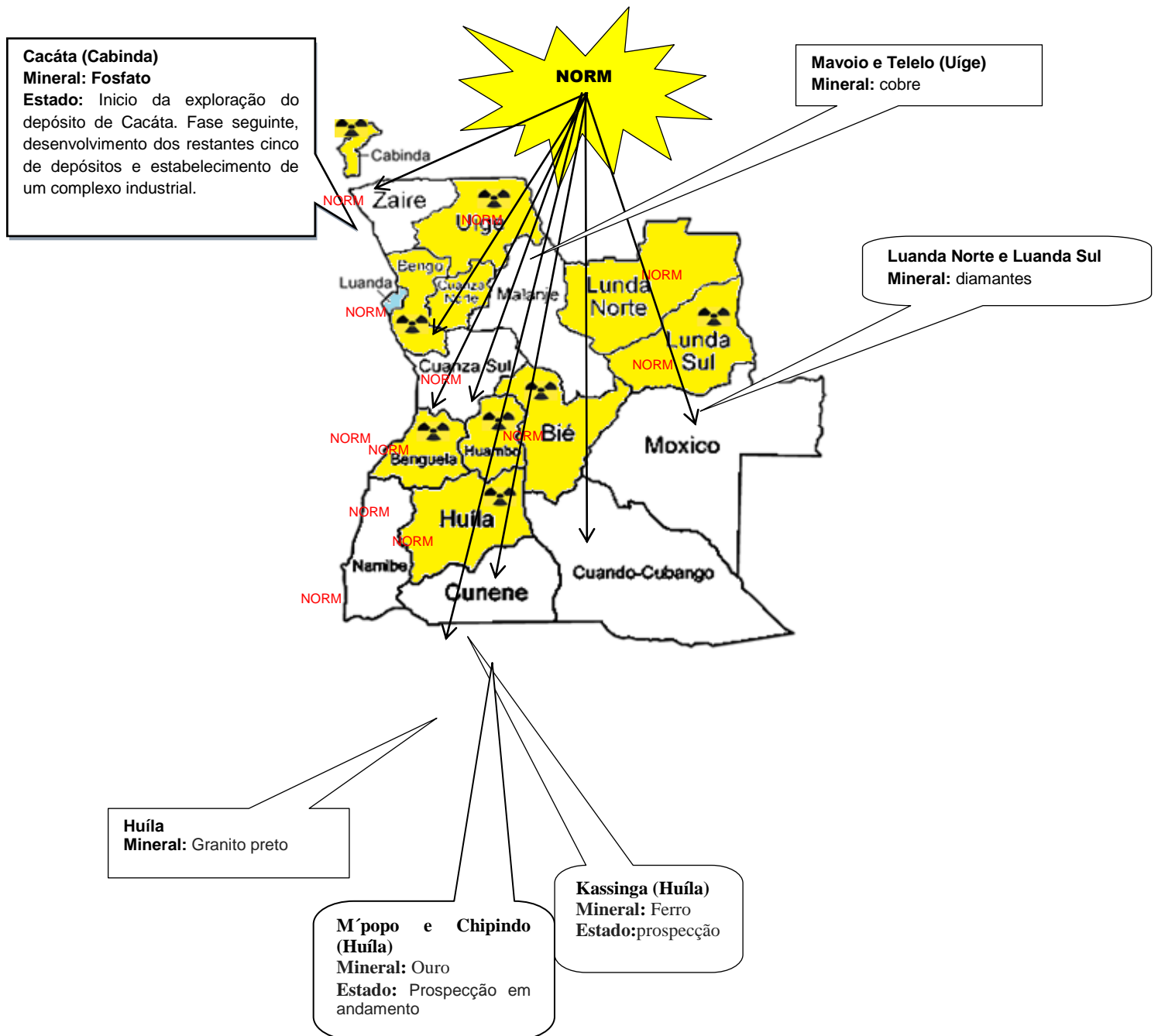


Figura 14 – Representação esquemática do mapa NORM da República de Angola.

5. 2. Critérios para implementar o Plano de Radioproteção na indústria extrativa

O estudo permitiu elaborar os critérios de avaliação para programar o plano de radioproteção na indústria extrativa da República de Angola (Figura 15).

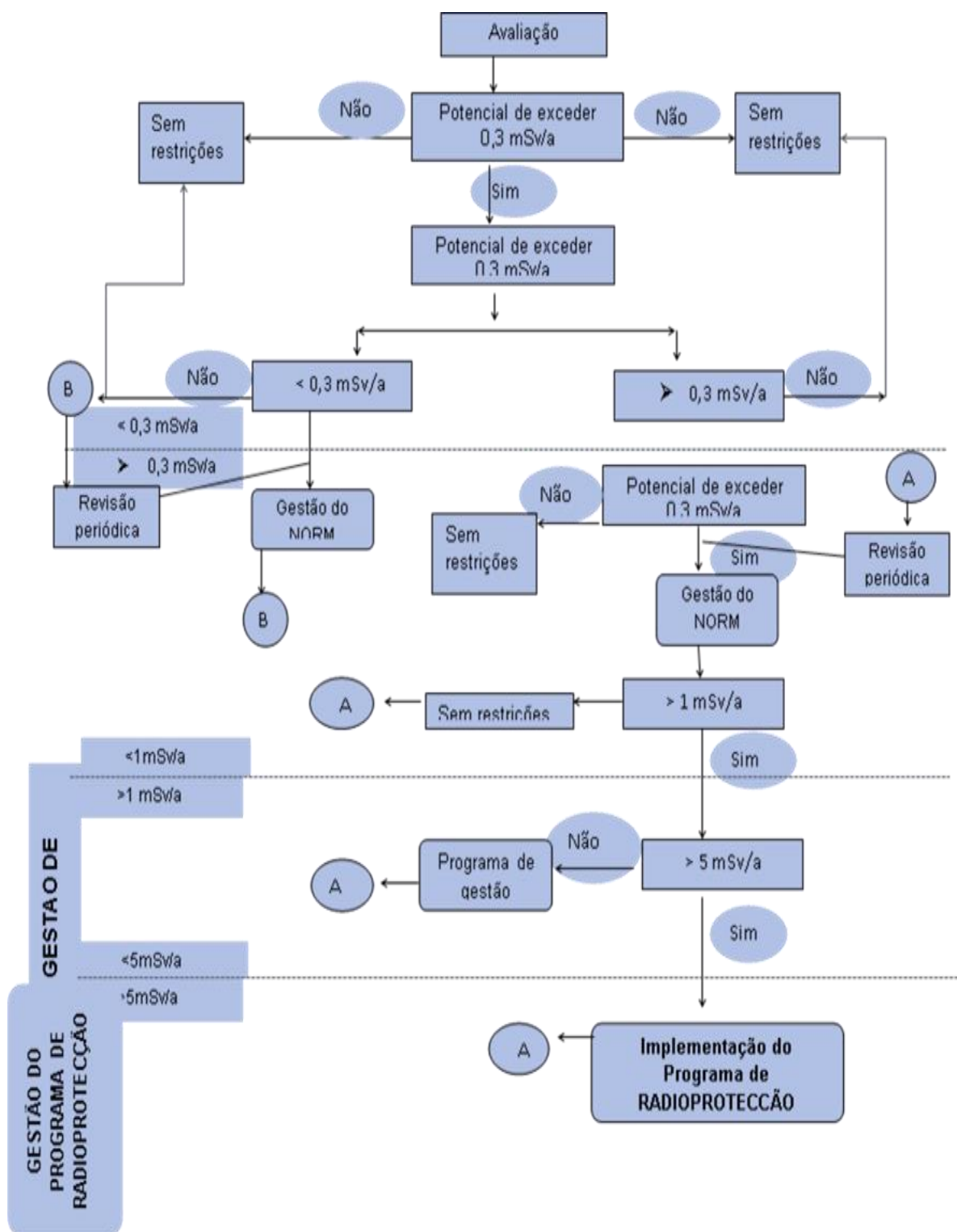


Figura 15 – Fluxograma para classificação do NORM [fonte (CANADA, 2000)]

5. 3. Medidas para controlar a exposição na mineração

Para controlar a exposição da radiação ionizante na mineração de minérios que contenham NORM, a prioridade deve ser estabelecida com base no método de exploração (tabela 14) e o tipo de radiação (tabela 15). No geral, o propósito é minimizar a dispersão das poeiras contendo material radioativo.

Tabela 14 – Métodos de mineração *versus* medidas de controle

| Métodos de exploração | Vias de exposição | Implicações radiológicas | Medidas de controle |
|--|---|---|--|
| A céu¹³ aberto | <ul style="list-style-type: none">• Radiação gama;• Inalação de radionuclídeos (através de poeiras.) | <ul style="list-style-type: none">• Grandes quantidades de resíduos são geradas• Impacto ambiental significativo | <ul style="list-style-type: none">• Molhar as estradas e pilhas de resíduos;• Remoção de poeiras em pontos de ruptura de transporte,• Ventilação para cabines de transporte. |
| Minas¹⁴ subterrâneas | <ul style="list-style-type: none">• Radiação gama;• Inalação de poeiras;• Exposição do radônio- (decaimento do ²²²Rn). | <ul style="list-style-type: none">• Elevadas taxas de doses (Radiação gama)• Gás radônio | <ul style="list-style-type: none">• Necessidade de ventilação• Elevadas exigências de segurança;• Complexidade para manter o princípio ALARA. |
| Lixiviação in situ | <ul style="list-style-type: none">• Radiação gama em tubos e tanques• Inalação de radionuclídeos em pó devido as embalagens | <ul style="list-style-type: none">• Pouca probabilidade de exposição (ocupacional e pública) | <ul style="list-style-type: none">• Não existem resíduos sólidos;• Os resíduos líquidos são confinados em lagos |

Para a avaliação dos riscos na fase de operação, é importante saber a estimativa das concentrações de radionuclídeos para trabalhadores e seu comportamento durante as operações numa determinada indústria, e, portanto avaliar as áreas e vias de maior probabilidade de exposição ou contaminação

¹³ Para minas de alta qualidade (por exemplo, $\geq 5\%$ minério de U₃O₈), pode haver necessidade de blindagem ou a disposição especial do projecto em algumas áreas para minimizar doses de radiação γ .

¹⁴ Em minas subterrâneas de alta qualidade, controle da radiação gama torna-se um grande problema operacional e design, com a necessidade de manter os trabalhadores fora a partir de cruzamentos de minério ou para proporcionar blindagem.

(REIS, 2016). Nos processos industriais a presença do NORM normalmente é verificada no estágio da mineração e britagem de minério, na separação física do processamento, no processo de extração química úmida e térmica, bem como no tratamento e gestão dos resíduos radioativos (REIS, 2016).

Tabela 15 – Tipos de radiação *versus* Medidas de controle na mineração

| Tipo de radiação | Medidas de controle | Monitorização |
|--|---|--|
| Radiação gama | <ul style="list-style-type: none"> • Tempo, Distância, Blindagem. | <ul style="list-style-type: none"> • Dosímetros TLD pessoais • Medidas de pesquisas |
| Partículas alfas (poeiras em suspensão) | <ul style="list-style-type: none"> • Eliminação de poeiras; • Sistemas de extração; • Uso de Equipamento de proteção pessoal (PPE) | <ul style="list-style-type: none"> • Recolhas de amostras de ar • Utilizando (Filtros e lapelas) |
| Decaimento do radônio | <ul style="list-style-type: none"> • Ventilação, PPE | <ul style="list-style-type: none"> • Amostragem de ar no local de trabalho |
| A ingestão de poeira | | <ul style="list-style-type: none"> • Levantamentos de contaminação das partículas alfa na superfície |

5. 4. Radionuclídeos identificados em amostras de borras de petróleo

Da três amostras analisadas por espectrometria gama, identificou-se a presença dos isótopos de Ra-226 e Ra-228, conforme ilustrado na figura 16.

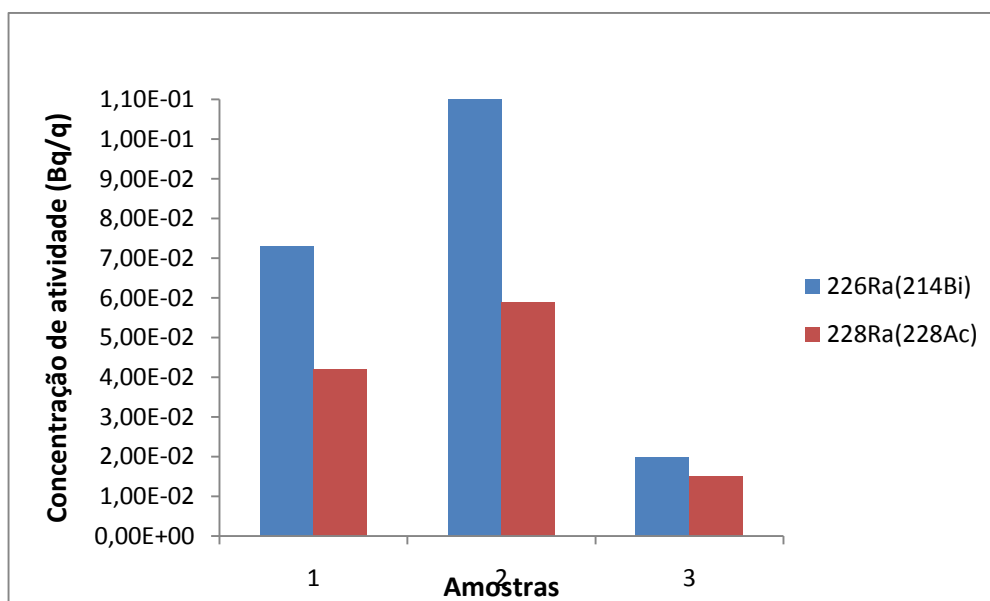


Figura 16 – Isótopos de rádioio (²²⁶Ra e ²²⁸Ra) determinados pelo método de espectrometria gama com detector HPGe.

5. 5. Valores de concentração dos isótopos

Na tabela 16 são apresentados os valores de concentração de atividade associadas com a suas incertezas.

Tabela 16 – Valores de concentração dos isótopos de rádio (Ra-226 e Ra-228)

| Amostra | Tipo | $^{226}\text{Ra}(\text{Bi}^{224})$ | $^{228}\text{Ra}(\text{Ac}^{228})$ | $^{226}\text{Ra} + ^{228}\text{Ra}$ (Bq/g) | Incerteza |
|---------|-------|------------------------------------|------------------------------------|--|-----------|
| 1 | Borra | 7,30 E-02 | 4,20 E-02 | 0,12 | 0,01 |
| 2 | Borra | 1,10 E-01 | 5,90 E-02 | 0,17 | 0,01 |
| 3 | Borra | 1,97 E-02 | 1,50 E-02 | 0,03 | 0,01 |

5. 6. Discussão dos resultados

Na figura 14 é apresentado o mapa NORM da República de Angola, resultado das principais indústrias identificadas como potencialmente geradoras de NORM. Essa identificação somente poderá ser comprovada a medida que forem realizadas medições no local e na coleta de amostras de processo para serem comprovadas tais indicações.

Na figura 16 são apresentados os critérios de avaliação para implementação do Plano de Radioproteção na indústria extrativa, uma vez que, as indústrias NORM foram identificadas na República de Angola, é importante saber se existe a necessidade de se fazer uma regulação ou não, para garantir se um determinado trabalhador ou membro do público é suscetível de receber uma dose efetiva anual, a partir de fontes de radiação naturais, decorrente da indústria extrativa acima do limite de dose de 1 mSv (REIS, 2016).

Na tabela 14 e 15 são apresentados os métodos de controle das radiações ionizantes na mineração, realçando que, a prioridade das medidas a serem estabelecidas, difere do método de exploração e do tipo de radiação em questão.

Na tabela 16 são apresentados os valores de concentração dos radionuclídeos, sendo que, o Ra-226 apresentou maior concentração de atividade em comparação com o Ra-228 em todas as amostras analisadas. Portanto, os valores obtidos da soma dos radionuclídeos Ra-226 e Ra-228 nas amostras 1, 2 e 3 são 0,12; 0,17 e 0,3 Bq/g respectivamente, embora todos valores estejam abaixo das recomendações que é de 1Bq/g.

CONCLUSÃO

A investigação desenvolvida através de documento das áreas específicas, produtivas e reguladoras da República de Angola, permitiu identificar às **possíveis indústrias potencialmente geradoras de NORM na República de Angola**, compreender e catalogar os principais problemas associados com a tecnologia aplicada na mineração destas commodities e estimar seus impactos ambientais radiológicos, bem como elaborar o mapa NORM das províncias de Angola.

Para medição do NORM, o estudo permitiu identificar varias técnicas que têm sido utilizadas para estimar radionuclídeos, como a espectrometria alfa, gama, de cintilação líquida e de massa. Com a técnica de espectrometria gama analisou-se amostras de borras de petróleo no laboratório do DIRAD/IRD comprovando assim, a existência dos radioisótopos do rádio Ra-226 e Ra-228 nas amostras, com uma concentração média de atividade na ordem de 0,11 Bq/g de concentração de atividades e uma incerteza associada de $\pm 0,01$.

No aspecto da Radioproteção permitiu identificar os radionuclídeos de maior interesse das séries radioactivas naturais presentes no NORM, devido a sua toxicidade e sua semelhança com propriedades químicas do cálcio. Quanto aos valores de concentração dos radionuclídeos, conclui-se que os valores estão abaixo dos limites de concentração estabelecidos pela AIEA e pela CNEN de 1 Bq/g, podendo as mesmas serem liberadas de acordo com a Legislação vigente para este tipo de produto.

A metodologia de estudo possibilitou também propor critérios para estabelecer o plano de Radioproteção na indústria extrativa, bem como, estabelecer medidas para atuar contra às radiações ionizantes na mineração.

RECOMENDAÇÕES

Aplicar a experiência e os estudos que foram conduzidos no Brasil para identificar as principais indústrias NORM na República de Angola e estimar seus impactos;

Aplicar a abordagem de estudo proposta em projetos mineiros para investigar a presença do NORM e estabelecer prioridades na regulamentação;

Propor avaliação das principais vias de exposição resultante da atividade extrativa com consequências diretas para os trabalhadores devido a exposição e minimizar, caso existam, seus impactos sobre as populações;

Propor como seminário a cadeira de Radioproteção no Departamento de Minas e de Geologia da Universidade Agostinho Neto, de modo a disseminar informação e garantir ao futuro engenheiro de minas e geólogo, ferramentas que lhes permitam compreender as implicações relacionadas com a problemática do NORM;

Propor a criação de um laboratório ambiental na República de Angola para avaliar as concentrações de radionuclídeos presentes em uma matriz de interesse da atividade industrial, bem como, para estimar os níveis de concentração dos isótopos presentes nos solos agrícolas e alimentos importados.

REFERÊNCIAS

ALONSO, M. e FINN, E.J. Física. ISBN:978-972-592-333-7, Lisboa: Escolar Editora, (2012).

ARAÚJO, A.A. Determinação radioquímica de Pb-210 e Ra-226 em borras e incrustações de petróleo. Dissertação de Mestrado-Universidade Federal de Pernambuco, (2005).

Bruckmann, M. E. e FRIES, S. G. Radioatividade. Texto de apoio para professores de física nº2, biblioteca do IF-UFRGS. [Int], Disp.: http://www.if.ufrgs.br/public/tapf/n2_bruckmann_friesAcesso:12/09/2015,(1991).

CANADA. Canadian guidelines for the Management Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM).Minister of Public Work Government Services Canada.ISBN 0-662-29448-3. (2000).

CARDOSO E.M. et al. Radioatividade.Apostila educativa. Comissão Nacional de Energia Nuclear. RJ-CEP 22290-901, Rio de Janeiro, (S/A).

CARDOSO, L. X. Análise de radionuclídeos artificiais e naturais do solo e de produtos alimentares do Estado de Sergipe, Principalmente na região de Platô de Neópolis. Universidade Federal de Sergipe. Tese de Mestrado, (2012).

CAVEDON, J.M. A Radioatividade. ISBN:972-771-290-8. Lisboa: Instituto Piaget, (1996).

CHRISTOVAM A, C. M. e MACHADO, O. Manual de física e proteção radiológica. ISBN 978-85-7808-132-4. Brasil, Editora Senac, RJ, (2013).

CHIOSSI, N. Geologia de engenharia. ISBN: 978-85-7975-083-0. São Paulo, Brasil: Oficina de textos, (3ª edição, 2013).

CNEN NN 3.01. Diretrizes básicas de proteção radiológica. Resolução 164/14 Março (2014).

CNEN NN 4.01. Requisitos de segurança e proteção radiológica para instalações minero-industriais. Resolução da CNEN/CD nº 208, de 21 de Dezembro de 2016.

CURI, A. Lavra de minas. ISBN: 978-85-7975-250-6. São Paulo, Oficina de Textos, (2017).

DANIEL, M. e DAMIAN, S. H. Physical-chemistry. Advanced level with general chemistry. TANZÂNIA, Dar es Salaam, Editorial APE network, ISBN 978-9987-701-10-0. (2ª edição. 2012).

DEPARTMENT OF MINES AND PETROLUM (DMP). Managing natural occurring radioactive material (NORM) in mining and mineral processing—guideline. NORM-1. Applying the System of Radiation Protection to Mining Operations: Resources Safety, Western Australia. (2010).

ANGOLA. Decreto lei n.º79/07: Cria Autoridade Reguladora de Energia Atómica. Diário da República. I Série – N.º 128, Sexta-feria, 16 de Setembro. (2007).

ANGOLA. Decreto executive lei n.º 4/07: Lei sobre Energia Atómica. I Série – N.º 107, Quarta-feria, 5 de Setembro, (2007).

DIOGO, J.M.S. Apresentação, ENERGIA NUCLEAR E SUA APLICAÇÃO NA MINERAÇÃO, Angola, Lunda, (2015).

DIMENSTEIN, R. e HORNOS, Y. M. M. Manual de Proteção Radiológica aplicada ao Radiodiagnóstico. ISBN: 85-7359-191-9. São Paulo: Editora Senac, (2ª ed., 2004).

ROCHEDO, E.R.R. Modulo 9.1. Exposição do Público à radioatividade natural. CNEN. IRD, Rio de Janeiro, (2017).

ESCOVAL, M. T. A Acção da química na nossa vida. Editora Presença, , Deposito legal n.º 315246/10, Lisboa, (Setembro, 2010).

FERREIRA, A. O. Avaliação da radioatividade natural em algumas rochas graníticas do Estado do Paraná e sua utilização na construção civil. Tese de Doutorado. IPEN. Universidade de São Paulo, (2013).

IAEA. Radiometric reporting methods and calibration in uranium exploration, STI/DOC/10/174, ISBN 92-0-145076-1, Vienna, Austria, (1976).

IAEA. Monitoring and surveillance of residues from the mining and milling of uranium and thorium, Safety report series, ISBN 92 – 0 – 118802 – 1, IAEA; N°27. IAEA, Vienna, (2002).

AIEA. Application of uranium exploration data and techniques in environmental studies, IAEA -TECDOC - 827, ISBN 1011 - 4289, Vienna, Austria, (1995).

AIEA. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-TECDOC-1363, ISBN 92-0-1083-3, Vienna, Austria, (2003).

AIEA. Management of NORM residues. IAEA-TECDOC-series. ISBN: 978 – 92 – 0 – 142710 – 0. Vienna, Austria, (2013).

AIEA. Advances in airborne and ground geophysical methods for uranium exploration, Nuclear Energy Series. ISBN 978 – 92 – 0 – 129010 – 6. Vienna, Austria, (2013).

AIEA. Regulatory and management approaches for the control of environmental residues containing naturally occurring radioactive material (NORM). Proceedings of a technical meeting held in Vienna, 6-10 December 2004. ISBN 92-0-113305-7, TECDOC-1484. (2006).

AIEA. Analytical Methodology for the Determination of Radium Isotopes in Environmental Samples. ISSN 2074–7659, IAEA, Vienna, Austria, (2010).

AIEA. Radiometric reporting methods and calibration in uranium exploration, STI/DOC-10-174, ISBN 92-0-145076-1, Vienna, Austria, (1976).

AIEA. Exposure of the public from large deposits of mineral residues, IAEA-TECDOC-1660, ISBN 978-92-0116410-0, Vienna, Austria (2011).

AIEA. Methods exploitation of different types of uranium deposits. IAEA-TECDOC-1174, ISSN 1011-4289, Vienna, Austria, (2000).

AIEA. Steps for preparing uranium production feasibility studies. Guidebook, IAEA-TECDOC-885, ISSN 1011-4289, Vienna, Austria (1996).

AIEA. Uranium extraction technology, Technical report series N° 359, ISBN 92-0-103593-4, Vienna, Austria, (1993).

IPEN. Proteção radiológica e gerenciamento de rejeitos radioativos na indústria de óleo e gás. CNEN. STI/PUB/1171 ISBN 92–0–114003–7. Vienna, Austria, (2003).

JORNAL ECONOMIA E FINANÇAS. Indústria mineira capta investimento. N° 337, (Sexta-feira, 13 de Fevereiro, 2015).

JORNAL EXPANSÃO. Setor diamantífero. Nº 307, (20 de Fevereiro, 2015).

JORNAL DE ANGOLA. Petróleo em baixa lança novos desafios. (Segunda-feira, 3 de Novembro, 2014).

JORNAL O PAÍS. A Estratégia do governo para sair da crise actual. (Terça-feira, 2 de Fevereiro, Economia, 2016).

JORNAL O PAÍS. Economia, A Estratégia do governo para sair da crise actual. (Terça-feira, 2 de Fevereiro, 2016).

JORNAL O PAÍS. Produção de minerais para a construção civil excede a meta do PND para 2014. (Sexta-feira 2 de Janeiro, 2015),

LAURIA, D.C., et al. Radioatividade em água potável: Ocorrência, regulamentação e aspectos de proteção radiológica. IRD, RJ, CEP 22780-560-Brasil, (2014).~

MARJORIBANKS, R. Geological methods in mineral exploration and mining. ISBN 978-3-540-74370-5, (2ª ed, 2010).

MELFI, A. J. et al. Recursos minerais no Brasil. Problemas e desafios. Academia Brasileira de Ciências. ISBN: 978-85-85761-40-0. RJ, (2016).

MINGOTE, R. M. et al. Determinação de atividades alfa e beta total em água para consumo humano por LSC. Sociedade brasileira de proteção radiológica – SBPR. RJ, Brasil, (2013).

MINISTÉRIO DA GEOLOGIA E MINAS. Noções gerais sobre o setor mineiro. (2016)

MATTA, L. E. e HIRSCH L. R. Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (NORM). Ciclo do combustível nuclear, (S/A).

NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA). Perceptions and realities in modern Uranium Mining, Extended Summary, NEA Nº.7063, [Int] Disp.:www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2014/7062-mehium.pdf Ac.: 14-11-2014, (2014).

OLIVEIRA, C.HA Radioatividade e o ambiente no ensino secundário- Universidade de Lisboa, Tese de Mestrado, Lisboa, Portugal, (2006).

OLIVEIRA, M. A. Prospecção, pesquisa e produção de urânio no Brasil. Trabalho de fim de curso. Escola Superior de Guerra, (2011).

OKUNO, E. e YOSHIMURA, E. Físicas das radiações. ISBN: 978-7975-005-2. São Paulo: Oficina de textos, (2010).

PIERZELA, M. Mining and Sustainability. Systems and stakeholder analyses of uranium mining in Namibia. [Int.]. Disp. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:637864>, Ac.: 23-06-2015, (2013).

REIS, R. G. Modelo conceitual para auxílio a decisão na indústria de mineração NORM – aspectos de radioproteção ambiental. IRD, RJ, Brasil, (2012).

REIS, R. G. NORM. Guia prático. Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico. SBN: 978-85-922211-0-2. Brasil, (2016).

REVISTA ECONOMIA E MERCADO. Indústria Mineira-Diamantes brilham isolada, Impressão: Imprimarte, N°128, Registo N°249/B/99, Luanda-Angola, (Maio, 2015).

REVISTA EXAME. Minérios a riqueza escondida. Impressão: Damer Gráficas, N°58, Depósito legal: 261-09. (Abril, 2015).

REVISTA ECONOMIA E MERCADO. Vem aí mais dinâmica empresarial, Damer Gráficas, N°131, Registo N°249/B/99, Luanda-Angola, (Agosto 2015).

ROSA, M. M. L., et al. Validação do ensaio de medidas por espectrometria gama de radionuclídeos em matrizes de alimentos. CNEN. Poços de Caldas, Brasil, (2013).

SANTOS, D. A. M. D. Análise económica e financeira do projecto de minério aluvionar de Cassinga Norte em Angola. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ouro Preto, Escola de Minas, (2010).

SCHÖN, J.H. Propriedades físicas das rochas; Aplicadas a Engenharia de Petróleo-Fundamentos teóricos e práticos, Editora Elsevier Lda, ISBN 978-85-352-7130-0, Centro-RJ, Brasil, (2014).

SHAL. A brief discussion about Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM), (S/A).

TAUHATA, L., et al. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. ISBN: 978-85-67870-02-1. CNEN, RJ, Brasil, (10ª revisão, 2014).

UNSCEAR, Sources and effects of ionizing radiation Report. United nation publication. Volume-1, ISBN 92-1-142238-8. Nova Iorque, (2000).

VELUDO, P.C. Efeitos da radiação e níveis de exposição em exames imagiológicos. Universidade de Coimbra. Metrada em saúde pública, (2011).

XAVIER, A. M. et al. Princípios básicos de segurança e proteção radiológica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, [Int.]
Disp.: <http://www.cnen.gov.br/seguranca> Acesso: 16/05/2014, (3ª edição, 2006).