

O potencial da Concentração de Radão na água do Município da Bibala: Implicações no consumo público

Joaquim Pedro Kessongo

Tese para obtenção do Grau de Doutor em
Física

(3^o ciclo de estudos)

Orientadora: Prof. Doutora Sandra da Costa Henriques Soares

Julho de 2021



Subdelega no professor Paulo Jorge da Silva Almeida a presidência deste júri, a quem confio os poderes necessários para votar conforme o estabelecido no despacho nº 2020/R/71 de 2 de setembro, conforme o nº 2 - 2.1, do referido despacho.
07/05/2021
Mário Marques Freire

EDITAL

DOUTOR MÁRIO MARQUES FREIRE, Vice-Reitor da Universidade da Beira Interior e Presidente do júri, por delegação do Reitor, das provas de doutoramento (3º ciclo de estudos) no ramo de Física, requeridas por Joaquim Pedro Kessongo.

Faz saber que:

1º O júri das referidas provas é constituído pela Doutora Maria de Lurdes Proença de Amorim Dinis, professora associada da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Doutor Paulo André de Paiva Parada, professor auxiliar da Universidade da Beira Interior, Doutor João António da Silva Barata, professor auxiliar da Universidade da Beira Interior, Doutora Sandra da Costa Henriques Soares, professora auxiliar da Universidade da Beira Interior, Doutor Daniel Galaviz Redondo, professor auxiliar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Doutora Ana Lúcia Vital Belchior investigadora do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.

2º As provas se realizarão de acordo com o seguinte calendário:

- Dia 18 de maio de 2021, pelas 14 horas e 30 minutos, apreciação e discussão da tese apresentada pelo candidato intitulada **“O potencial da concentração de radão na água do Município da Bibala: Implicações no consumo público.”**

3º Serão arguentes da tese a Doutora Maria de Lurdes Proença de Amorim Dinis e o Doutor Daniel Galaviz Redondo.

4º As provas são públicas.

5º Findas as provas, o júri reunir-se-á para proceder à sua apreciação e decisão final, cujo resumo constará da respectiva ata, sendo a classificação do candidato, feita através de votação nos termos legais.

6º Todas as provas, sua apreciação e votação terão lugar na sala dos atos da Reitoria da Universidade da Beira Interior, de modo presencial e por videoconferência, nos termos do Art.º 5º da Lei 1-A/2020 de 19 de Março.

Covilhã e Universidade da Beira Interior, 03 de maio de 2021.

O Presidente do Júri

Mário Marques Freire

No dia 21 de Maio do ano 2021, decorreu as provas de doutoramento de Joaquim Pedro Kessongo intitulada « **O potencial da Concentração de Radão na água do Município da Bibala: Implicações no consumo público** ».

Foi Presidente o Doutor Mário Marques Freire, Vice-Reitor da Universidade da Beira Interior, tendo subdelegado o Doutor Paulo Jorge da Silva Almeida. O júri das referidas provas foi constituído pela Doutora Maria de Lurdes Proença de Amorim Dinis, professora associada da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Doutor Paulo André de Paiva Parada, professor Auxiliar da Universidade da Interior, Doutor João António da Silva Barata, professor Auxiliar da Universidade da Interior, Doutora Sandra da Costa Henriques Soares, professora Auxiliar da Universidade da Interior, Doutor Daniel Galaviz Redondo, professor Auxiliar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Doutora Ana Lúcia Vital Belchior, investigadora do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.

Covilhã, aos 5 de julho de 2021

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, João Baptista Kessongo (em memória) e Paulina Ngueve, por todo apoio prestado para a minha formação. À minha avó Teresa Jamba (em memória), pela educação que me deu ao longo da minha vida.

Agradecimentos

Quero aqui agradecer a todos que, de forma direta ou indireta, prestaram o seu apoio para a realização desta tese conducente ao grau de Doutor em Física:

Agradeço a Deus pela vida, pela saúde e por me proteger todos os dias.

À professora Doutora Sandra Soares pela amabilidade e disponibilidade em trabalhar comigo nesta temática; desde o primeiro encontro prestou o seu total apoio e orientação adequada até a conclusão desta tese. Agradeço pelas correções feitas a este manuscrito e também pela amizade.

Ao Professor Doutor Luís Peralta pelo apoio incondicional durante a construção do protótipo e a realização das simulações Monte Carlo. Foram momentos de muita aprendizagem e de uma convivência agradável. As nossas conversas iam para além da Física, conversávamos também sobre assuntos da sociedade, da cultura e do desporto.

Aos meus colegas do LabExpoRad, Margarida Inácio e Yoenls Prata Bahu, pelo companheirismo e colaboração ao longo desta caminhada. Agradeço também aos colegas do Laboratório de Radiações da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa: Soraia Elísio, Duarte Guerreiro e José Venâncio pela convivência e partilha diária de conhecimentos.

Ao Professor Doutor Pedro Gabriel Almeida pelas lições de SIG e pelos conhecimentos partilhados no âmbito da geologia de Angola.

A todos meus amigos e familiares, especialmente a minha esposa, Neusa Dandi Jeremias; aos meus filhos, Baptista Jeremias Kessongo, Joaquim Lucas Kessongo e Nataniela Kessongo, pela motivação diária e pelos sacrifícios consentidos durante a minha ausência.

Ao Ministério do Ensino Superior Ciência Tecnologia e Inovação de Angola pela oportunidade que me foi concedida para frequentar esta formação de Doutoramento.

Ao Senhor Yuri Wassuka, funcionário da administração municipal da Bibala, por ter me guiado nos locais onde estão localizadas as fontes de água.

Ao Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP) pelo apoio prestado na aquisição das placas eletrónicas dos circuitos impressos e de outros componentes utilizados na construção do protótipo.

Resumo

Os objetivos deste trabalho consistiram na medição da concentração de radão presente na água de consumo público do município da Bibala, localizado no interior da província do Namibe, no extremo Sudoeste de Angola; calcular a dose efetiva anual a que adultos e crianças estão expostos e a realização de um estudo dosimétrico populacional no município da Bibala. Foi, também, objetivo desta tese a realização do estudo de viabilidade de um protótipo baseado num foto diodo de silício para a monitorização do radão, em tempo real, no meio ambiente.

O radão que pode ser encontrado na água, no solo e nas rochas, é um descendente direto do rádio, ^{226}Ra , um produto do decaimento do urânio, ^{238}U , presente em alguns tipos de rochas, especialmente nos granitos. Este gás radioativo presente na crosta terrestre é, continuamente, difundido através da água presente nas porosidades das rochas. A concentração do radão em águas subterrâneas é bastante elevada não apenas devido à sua grande solubilidade mas por esta aumentar com o aumento da temperatura. A presença de núclídeos radioativos de origem natural na água é causada pela erosão e dissolução das rochas e, quanto maior for a presença de urânio na estrutura geológica, maior será o potencial para produzir o gás radão. Em geral, este gás é o maior contribuinte para a poluição radioativa em águas subterrâneas, por isso, a concentração de radão na água representa um risco para a saúde pública, principalmente, devido ao facto de o gás poder escapar-se facilmente para o ar, aumentando a sua concentração total no interior de espaços fechados. Por outro lado, a ingestão de água com concentração de radão elevada, representa um risco potencial para o desenvolvimento de cancro do estômago, embora existam ainda poucos estudos sobre as evidências científicas que confirmem este risco.

Neste trabalho, foram analisadas 81 amostras de água, utilizada para consumo humano, recolhida em 27 furos de diferentes profundidades. Em cada furo recolheram-se 3 amostras representadas pelos códigos S1 a S27. A concentração de radão nestas amostras de água foi medida utilizando o acessório RAD H₂O, do equipamento RAD7 da DurrIDGE, cuja técnica utiliza protocolos específicos que providenciam uma leitura direta da concentração de radão na amostra de água.

Dos resultados obtidos, verificou-se que, em todas amostras, os valores eram inferiores a 100 Bq L^{-1} , recomendado pela Organização Mundial de Saúde (OMS) e, em 17 amostras, os valores obtidos estavam acima do limite máximo de contaminação de 11.1 Bq L^{-1} , estabelecido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US-EPA). Estes valores, da concentração de radão na água de consumo público do município da Bibala, foram apresentados num mapa de distribuição geográfica, que constitui um ponto de partida para, no futuro, ser elaborado um mapa de risco da província do Namibe. Independentemente dos resultados obtidos, este trabalho pode ser considerado pioneiro em Angola pois, tanto quanto se sabe, não existem estudos de avaliação da concentração de radão na água consumida pela população. Os valores da concentração de radão obtidos permitiram calcular a dose efetiva anual por faixas etárias devido à ingestão de radão contido na água de consumo público no município da Bibala.

Uma das grandes motivações deste estudo é também poder desenvolver o interesse pela área das radiações ionizantes, principalmente no que se refere à sensibilização e informação da população sobre os seus efeitos biológicos. Embora Angola tenha aderido à Agência Internacional de Energia Atómica (AIEA) em 1999, o principal foco de utilização das radiações ionizantes tem sido o setor da saúde e o armazenamento de resíduos NORM (material radioativo de ocorrência natural) provenientes de atividades da indústria de petróleo e do gás contido, não tem ainda disponíveis equipamentos para a monitorização do radão.

Com o intuito de resolver, de forma simples e a baixo custo, a falta de equipamentos para medir a

concentração de radão, foi reproduzido o protótipo de um detetor, já desenvolvido no nosso grupo de trabalho, baseado num fotodíodo de silício, capaz de fornecer, em tempo real, o número de contagens produzidas pela interação dos descendentes sólidos do radão (^{218}Po e ^{214}Po) no fotodíodo. Este protótipo foi construído com componentes eletrónicos e outros materiais que podem ser facilmente adquiridos a baixo custo, o que permitirá a sua reprodução em Angola. A maior vantagem deste protótipo deverá ser a possibilidade da sua utilização, não apenas para a avaliação primária de áreas com potenciais teores de radão, mas também para ensinar os alunos do curso de licenciatura em Ensino da Física, do Instituto Superior de Ciências da Educação da Huíla (ISCED/Huíla), sobre o funcionamento de detetores de radiação baseados em semicondutores de estado sólido.

Palavras-chave

Radão, Água, Dosimetria, Detetor semiconductor e Bibala.

Abstract

The objectives of this work were to measure radon concentration in public drinking water in the municipality of Bibala, located in the interior of Namibe Province, in the extreme southwest of Angola; to calculate the annual effective dose to which adults and children are exposed, and a population dosimetric study in the municipality of Bibala. Another objective of this work was to carry out a feasibility study of a prototype based on a silicon photodiode for monitoring radon in real time in the environment.

The radon, which occurs in water, soil and rock, is a direct descendant of the radio, ^{226}Ra , a product of uranium decay, ^{238}U , present in some types of rocks, especially granites. This radioactive gas present in the earth crust continuously diffuses through the water present in the porosities of the rocks. The radon concentration in groundwater is quite, high not only because of its great solubility but also because it increases with increasing temperature. The presence of naturally occurring radioactive nuclides in water is caused by the erosion and dissolution the rocks, and the greater the presence of uranium in the geological structure, the greater the potential for the formation of radon gas. In general, this gas is the largest contributor to radioactive contamination of groundwater, so radon concentrations water is a public health risk because the gas can easily escape into the air and increase its overall concentration indoor. On the other hand, drinking water with high radon concentration poses a potential risk for the development of stomach cancer, although there are still few scientific studies confirming this significant risk.

In this work, 81 water samples used for human consumption were analyzed, collected in 27 holes of different depths. In each hole, 3 samples were collected, represented by the codes S1 to S27. The radon concentration in these water samples was measured using the RAD H₂O accessory, from Durrige's RAD7 equipment, whose technique uses specific protocols that allow a direct measurement of radon concentration in the water sample.

From the results obtained, it appeared that, in all samples, the values were below 100 Bq L^{-1} , the recommended value by the World Health Organization (WHO) and, in 17 samples, the obtained values were above the limit of 11 Bq L^{-1} established by the United States Environmental Protection Agency (US-EPA). These values of radon concentration in the water of public consumption in the municipality of Bibala were presented in a geographical distribution map, which serves as a starting point for a future map risk of Namibe Province. Regardless of the results obtained, this work can be considered a pioneer in Angola since, as far as known, there are no studies that evaluate radon concentration in water consumed by the Angola population. The obtained values of radon concentration allowed the calculation of the annual effective dose by age group due to the intake of radon contained in water for public consumption in the municipality of Bibala.

One of the great motivations of this study is also to develop interest in the field of ionizing radiation, especially in terms of awareness and information of population about its biological effects. Although Angola joined the International Agency of Atomic Energy (IAEA) in 1999, the use of ionizing radiation is focussed on health sector and the storage of waste NORM (naturally occurring radioactive material) from oil and gas industry activities, but does not yet have radon monitoring equipment.

In order to address in a simple and inexpensive way, the lack of devices for measuring radon concentration, a prototype of a previously developed detector, based on a silicon photodiode, and able to provide, in real time, the number of counts generated by the interaction of solid radon descendants (^{218}Po and ^{214}Po) in the photodiode, was replicated in our group. This prototype was built with electronic components and other materials that can be easily and cheaply acquired, which will allow their reproduction in Angola.

The main advantage of this prototype should be the possibility to use it, not only for the primary assessment of areas with potential radon content, but also to teach physics students from Instituto Superior de Ciências da Educação da Huíla (ISCED/Huíla), the operation of radiation detectors based on solid state semiconductors

Keywords

Radon, Water, Dosimetry, Semiconductor detector and Bibala.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Visão global da tese	3
2	Principais grandezas Radiológicas	5
2.1	Atividade	5
2.1.1	A atividade específica	6
2.2	Equilíbrio radioativo	6
2.3	Tempo de meia-vida	7
2.4	Unidades da radioatividade	8
2.5	Grandezas dosimétricas e suas unidades	8
2.5.1	Fluência	8
2.5.2	Kerma	9
2.5.3	Dose	9
2.5.4	Dose equivalente	10
2.5.5	Dose efetiva	11
2.5.6	Equivalente de Dose	11
3	A interação da radiação com a matéria	13
3.1	Interação das partículas carregadas com a matéria	13
3.1.1	Interação da radiação alfa com a matéria	13
3.1.2	Secção eficaz	14
3.1.3	Poder de paragem de partículas carregadas	15
3.1.4	Alcance das partículas carregadas	16
3.1.5	Alcance das partículas alfa	17
3.1.6	Alcance CSDA e alcance projetado	18
3.2	Distribuição da perda de energia	19
3.3	Distribuição Gaussiana	20
3.4	Distribuição de Landau	20
3.5	Distribuição de Vavilov	20
3.6	Dispersão Múltipla	21
4	O radão	23
4.1	Propriedades físicas e químicas do radão	23
4.2	Aplicações do radão e dos seus descendentes	27
4.3	Emanação e transporte do radão	29
4.4	O radão no ar interior	31
4.5	O radão na água	32
4.6	Legislação aplicável	33
4.7	A problemática do radão em alguns países	34
4.7.1	A situação do radão em Portugal e em outros países	34
4.7.2	A situação do radão em alguns países africanos	35

5	Técnicas para a medição do radão e medidas de mitigação no ar e na água	37
5.1	Medição do radão no ar	37
5.1.1	Detetores ativos de estado sólido	38
5.1.2	Detetores de traços	38
5.1.3	Cintiladores	39
5.1.4	Detetores de carvão ativado	41
5.1.5	Câmaras de ionização	42
5.2	Medidas para a remediação do radão no ar interior	43
5.3	Técnicas para a medição do radão na água	44
5.3.1	Espectrometria gama	44
5.3.2	Contagem por Cintilação líquida	45
5.4	Medidas para a remoção do radão na água	45
6	Avaliação dosimétrica populacional da concentração de radão na água do município da Bibala	47
6.1	Caracterização geográfica da região de estudo	47
6.1.1	Localização e clima	47
6.1.2	Geologia	48
6.1.3	Hidrografia	48
6.2	Medição da concentração da atividade do radão na água do município da Bibala	49
6.2.1	Recolha das amostras	49
6.2.2	Técnica utilizada para a medição da concentração de radão na água	51
6.2.3	Resultados e discussão	54
6.3	Mapeamento da concentração de radão na água em Angola	63
6.3.1	Sistema de informação geográfica	63
6.3.2	Sistemas de referência	64
6.3.3	Georreferenciação	65
6.3.4	Projeção de sistemas de coordenadas geográfica	65
6.3.5	Mapas	65
7	Construção do protótipo para a medição do radão	67
7.1	Semicondutores	67
7.1.1	Semicondutor intrínseco	67
7.1.2	Semicondutor extrínseco do tipo N	69
7.1.3	Semicondutor extrínseco do tipo P	70
7.2	Fotodíodos	71
7.2.1	Fotodíodo PN	73
7.2.2	Foto díodo PIN	73
7.3	Propriedades dos detetores de radiação	73
7.3.1	Sensibilidade do detetor	73
7.3.2	Eficiência do detetor	73
7.3.3	Resolução do detetor	74
7.3.4	Tempo morto	75
7.3.5	Linearidade	75
7.3.6	Ganho	75
7.3.7	Ruído	75
7.4	Construção do protótipo para a medição do radão	76

7.4.1	O circuito eletrónico do detetor	76
7.4.2	Pré amplificador	78
7.4.3	Amplificador	79
7.4.4	Discriminador	80
7.4.5	Temporizador	81
7.5	Construção da caixa de proteção eletrónica	82
7.6	A fonte de alimentação do circuito	83
7.7	Realização de testes ao circuito eletrónico	85
7.7.1	Realização de testes ao protótipo final	88
7.8	Resultados e discussão	89
7.8.1	Aquisição de dados com o protótipo	89
7.8.2	Estimativa da concentração de radão com o detetor de iodeto de sódio	91
7.9	Medição das variáveis ambientais no laboratório	92
Bibliografia		96
A		111
A.1	Esquema do circuito eletrónico do protótipo para a medição de radão	111
A.2	Esquema do circuito eletrónico da fonte de alimentação	113
A.3	Código para aquisição de dados com o Arduino	115

Lista de Figuras

2.1	Lei exponencial do decaimento radioativo (variação do número de núcleos radioativos em função do tempo).	8
3.1	Curva de Bragg produzida por um feixe de prótons que se propaga na água com energia inicial 121.2 MeV.	16
3.2	Trajetória e alcance médio em mm do elétron e do próton no alumínio.	17
3.3	Diagrama ilustrativo subjacente ao cálculo do alcance projetado	19
3.4	Representação esquemática dos ângulos de deflexão da partícula alfa.	21
4.1	Fontes naturais e artificiais de radiação	23
4.2	Série de decaimento do ^{238}U .	24
4.3	Principais causas de morte nos EUA.	26
4.4	O diagrama esquemático ilustra três casos possíveis resultantes do decaimento do ^{226}Ra : 1) o átomo de radão recém-formado está embutido no grão do solo original; 2) o átomo de radão está embutido em um grão do solo adjacente; 3) o átomo de radão é ejetado para um poro do solo.	29
4.5	Transporte e exalação do radão.	30
4.6	A mobilidade do radão é maior em solos de elevada permeabilidade, devido a existência de poros interligados e de rochas fraturadas.	31
4.7	Entrada do radão no interior de edifícios.	32
5.1	a) Detetor passivo CR-39 b) Câmara de difusão.	39
5.2	Diagrama esquemático da célula de Lucas.	40
5.3	Representação esquemática de uma câmara de ionização de eletreto	42
5.4	Câmara de ionização.	43
5.5	Processos da medição do radão por cintilação líquida.	45
6.1	Mapa de localização do município da Bibala – Angola.	47
6.2	Carta geológica de Angola	49
6.3	Uma das fontes de recolha das amostras de água analisadas.	50
6.4	Frascos especiais para transporte e análise das amostras.	51
6.5	Representação esquemática da medição da concentração de radão na água com o RAD7.	53
6.6	Espectro produzido pelo RAD7 quando o radão atinge o equilíbrio secular com os seus descendentes.	53
6.7	O software <i>CAPTURE</i> .	54
6.8	Distribuição da concentração de radão das amostras de água recolhidas no município da Bibala.	56
6.9	Mapa de distribuição geográfica da concentração da atividade específica de radão no município da Bibala.	57
6.10	Valores médios das doses efetiva por ingestão de radão presente na água.	62
6.11	Resultados das doses efetiva por inalação de radão libertado da água para o ar.	62
6.12	Valores médios das doses efetiva anual para órgãos internos, estômago e pulmões.	63
6.13	Janela principal do ArcGIS 10.3.	64
7.1	Bandas de energia do semicondutor.	68

7.2	Semicondutor do tipo N	70
7.3	Nível de Fermi no semicondutor do tipo N	70
7.4	Semicondutor do tipo P	71
7.5	Energia de fermi no semicondutor do tipo P	71
7.6	Dependência I-V num diodo de junção PN	72
7.7	Resolução de energia em função do número de contagens por canal. σ é o desvio padrão.	74
7.8	Sistema de medição do radão.	76
7.9	Foto diodo SLCD61N2.	78
7.10	Esquema do circuito eletrônico do pré amplificador.	78
7.11	Esquema do circuito eletrônico do amplificador.	79
7.12	Discriminação do sinal.	80
7.13	Esquema do circuito eletrônico do discriminador do sinal.	80
7.14	Esquema do circuito eletrônico do temporizador.	81
7.15	Placa do circuito eletrônico.	82
7.16	Caixa metálica de proteção do circuito eletrônico.	83
7.17	Alimentação do circuito com base em pilhas alcalinas de 4.5 V.	83
7.18	Fonte de alimentação. (1) transformador de tensão, (2) e (3) reguladores de tensão e (4) entrada 230 V.	84
7.19	Parte exterior frontal da fonte de alimentação.	85
7.20	Esquema de medição.	85
7.21	Sinal observado na ausência da fonte radioativa. (1) caixa de cartão e (2) osciloscópio.	86
7.22	A fonte radioativa no detetor.	86
7.23	Sinal produzido pela fonte radioativa.	86
7.24	Discriminação do sinal.	87
7.25	Protótipo final para a medição de radão. (1) orifícios para a entrada do radão, (2) Arduino UNO, (3) circuito eletrônico, (4) placas e (5) jack fêmea.	87
7.26	Medição do radão no ar. (1) fonte de alimentação, (2) caixa de acrílico, (3) detetor da Hamamatsu, (4) sensor BME280 e (5) caixa de pedras com potencial de exalação de radão.	88
7.27	Resultado das contagens feitas pelo protótipo durante 7 dias de aquisição.	89
7.28	Número de contagens feitas pelo do detetor da Hamamatsu e número de contagens feitas pelo protótipo.	90
7.29	Espetro das energias das partículas alfa emitidas pelo ^{210}Po , ^{218}Po e ^{214}Po resultante da exposição do detetor da Hamamatsu uma atmosfera de radão.	90
7.30	Configuração experimental para estimar a concentração de radão.	91
7.31	Espetro gama obtido com detetor Na(Tl), onde é visível o pico de 609 keV devido a radiação gama do ^{214}Bi .	91
7.32	Variação da temperatura, pressão e humidade.	92

Lista de Tabelas

1.1	Risco relativo de cancro do pulmão devido a exposição ao radão e o tabagismo [Tom02].	2
2.1	Fatores de ponderação da radiação (W_R) [SAHJ ⁺ 12].	10
2.2	Fatores de ponderação para um órgão ou tecido (W_T) [SAHJ ⁺ 12].	11
2.3	Tabela de fatores de qualidade para diversos tipos de radiações [SAHJ ⁺ 12].	12
3.1	Radionuclídeos emissores de partícula alfa [CEF99].	14
4.1	Resumo das propriedades físicas e químicas do radão [Bas16].	25
4.2	Energias em MeV emitidas pelo radão e seus descendentes [CEF99].	25
4.3	Valores da concentração de radão na água em diferentes países.	35
6.1	Coordenadas GPS das fontes de água	50
6.2	Concentração de radão na água e respetivos locais de recolha	55
6.3	Grupos etários da ICRP e suas taxas anuais de consumo de água estabelecidos pela IAEA [FIN].	58
6.4	Concentração média de radão e dose efetiva anual comprometida devido a ingestão de radão para diferentes faixas etárias	59
6.5	Dose efetiva anual comprometida por inalação do radão resultante do manuseamento da água.	60
6.6	Dose efetiva anual comprometida devido ao radão (radiação alfa) para órgãos internos: paredes do estômago e epitélio brônquico.	61

Lista de Acrónimos

ADN	Deoxyribonucleic acid
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
CA	Carvão Ativado
CFCs	Chlorofluorocarbonos
CNIC	Centro Nacional de Investigação Científica
CNO	Centro Nacional de Oncologia
CR39	Allyl Diglycol Carbonate (ADC), Polymer used as detector
CSDA	Continuous Slowing Down Approximation
ESRI	Environmental Systems Research Institute
EURATOM	European Atomic Energy Community
FET	Field Effect Transistor
GPS	Global Positioning System
HPGe	High Purity Germanium detectors
IAEA	The International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
ISCED/Huíla	Instituto Superior de Ciências da Educação da Huíla
. LET	Transferência Linear de Energia
LIP	Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas
LR115	Um tipo específico de filme usado como detetor de traços
LSA	Liquid Scintillation Counting
MC	Monte Carlo
MCA	Multichannel Analyzer
MCNPX	Monte Carlo N Particle Transport Code
NIST	National Institute of Standards and Technology
OMS	Organização Mundial da Saúde
PENELOPE	PENetration and Energy Loss of Positron and Electron
PLANAGEO	Plano Nacional de Geologia de Angola
PMT	Photomultiplier Tubes
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SRIM	The Stopping and Range of Ions in Matter
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
WLM	Working Level Month
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS	World Geodetic System
ADC	conversor analógico-digital
RPII	Instituto de Proteção Radiológica da Irlanda
UBI	Universidade da Beira Interior

O potencial da Concentração de Radão na água do Município da Bibala

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A motivação desta tese de doutoramento fundamenta-se no facto de o conhecimento científico e tecnológico ser fundamental para o desenvolvimento social e económico, contribuindo não apenas para a melhoria do bem-estar social das populações, mas também da sua qualidade de vida.

Sabe-se que, apesar de os países africanos de língua oficial portuguesa (PALOP) terem visto, nas últimas décadas, um crescente desenvolvimento do seu sistema de Ensino Superior, existe ainda um número insuficiente de diplomados com o grau de Mestre e Doutor, particularmente em áreas com um grande potencial de desenvolvimento económico e social, como é o caso das ciências da vida. Por este motivo, um dos grandes desafios deste projeto consistiu no desenvolvimento de competências que são essenciais para criar e garantir as condições fundamentais da pesquisa científica no campo da saúde e das Ciências da Vida.

Os países em desenvolvimento precisam ter uma massa crítica estável de investigadores que possam aferir com rigor as necessidades e prioridades locais. O seu papel é importante, não apenas para reorientar a educação, como também para estabelecer a ligação com os decisores locais, nacionais e as parcerias com a comunidade internacional. Os países desenvolvidos têm tido ganhos financeiros e contribuições elevadas no número de publicações com o envolvimento de autores provenientes de outras nações, havendo ainda uma assimetria acentuada nos mecanismos de colaboração científica internacional entre as diversas regiões do mundo [AHGo9].

Angola é um país africano de expressão portuguesa, independente desde 1975, possui uma extensão de 1 247 000 km² e, de acordo com o censo populacional realizado em 2014, com 26,94 milhões de habitantes. Como país pós-conflito (desde 2002), enfrenta grandes desafios no domínio das infraestruturas, dos serviços, dos recursos humanos e na investigação científica [FFSS14].

Há dez anos, em Angola, a investigação científica era apenas realizada e coordenada pelo Centro Nacional de Investigação Científica (CNIC), afeto ao Ministério do Ensino Superior Ciência, Tecnologia e Inovação. No entanto, a partir do ano 2009, com o redimensionamento do ensino superior, no qual foram criadas sete novas universidades públicas espalhadas pelo território angolano, cada uma destas instituições de Ensino Superior ganhou autonomia para a criação de centros e projetos de investigação científica.

Particularmente, no setor da investigação científica na área das Ciências da Saúde, estão em curso vários projetos de investigação cujos resultados já se refletem na melhoria da qualidade do sistema de saúde e nas estatísticas relacionadas com o número de patologias mais frequentes, nas diferentes regiões do país [FFSS14].

De acordo com os dados do Centro Nacional de Oncologia (CNO), o cancro do estômago e do pulmão figuram entre os 10 tipos de cancro mais frequentes em Angola. De 2007 a 2011 foram diagnosticados 136 e 96 casos de cancro do estômago e do pulmão, respetivamente [ABdMZM15]. No entanto, não se sabe se os casos de cancro do estômago e do pulmão, diagnosticados em Angola, estão relacionados com o consumo de água com elevada concentração de gás radioativo radão, devido à exposição da população em ambientes com elevados níveis de radão ou outras quaisquer situações, uma vez que não existem, até ao momento, estudos realizados nesta vertente.

Entretanto, um estudo realizado na República Checa, com mineiros de urânio, permitiu concluir a existência de uma estreita relação entre a exposição ao radão, o tabagismo e o cancro do pulmão. O risco relativo de cancro do pulmão devido à exposição ao radão e o tabagismo é apresentado na tabela 1.1. As exposições ocupacionais são dadas em meses de níveis de trabalho (WLM), sendo a duração da exposição ocupacional 170 horas. Um nível de trabalho (WL) corresponde a 130 000 MeV de energia alfa emitida pelos descendentes do radão em um litro de ar (3.7 kBq m^{-3}). De acordo com o referido estudo, a exposição à descendentes de radão em 200 WLM corresponde aproximadamente ao risco relativo entre fumantes não expostos ao radão (assumindo 20 cigarros por dia). No entanto, a exposição simultânea aos descendentes do radão e o fumo do tabaco não resultam no produto dos riscos, mas representam cerca de metade [Tomo2].

Tabela 1.1: Risco relativo de cancro do pulmão devido a exposição ao radão e o tabagismo [Tomo2].

	Não fumante	Fumante
Não exposto	1	11
Exposto (200 WLM)	10	55

A região da Bibala localiza-se na província do Namibe, no sudoeste Angolano, ocupa uma área de aproximadamente 7612 km^2 e possui cerca de 55 mil habitantes. O planalto da Bibala é constituído por rochas eruptivas ou sedimentares, destacando-se os quartzitos, xistos arenosos ou argilosos e rochas anfibiólíticas. As formações graníticas e a também grande quantidade de rochas magmáticas, contendo urânio e tório, apresentam uma mineralização com grandes valores cintilométricos, vinte vezes superiores à radiação de fundo e que também estão presentes nas nascentes provenientes de águas subterrâneas, cuja mineralização aumenta, por faixas paralelas, de Este para Oeste, brusca-mente nos interflúvios e, gradualmente, junto aos vales aluvionares dos cursos de água [Tch16]. As quantidades destes elementos bem como o nível de radioatividade natural são variáveis, deste modo torna-se indispensável a realização de um levantamento dosimétrico da concentração de radão na água de consumo público e o cálculo da dose efetiva anual a que as populações estão sujeitas. E, no caso se ser necessário, recomendar mecanismos de mitigação.

Tendo em conta que a área de estudo, que se pretende cobrir, é vasta e os laboratórios angolanos não dispõem ainda de equipamentos adequados, é recomendável o desenvolvimento de métodos baseados em monitores e detetores de baixo custo. Tendo consciência desta necessidade, outra grande motivação deste trabalho, foi a continuação do trabalho, já desenvolvido no grupo, de aperfeiçoamento de um protótipo de monitorização ativa do radão através de um fotodíodo de silício. Para a construção do detetor de radão foi utilizado o fotodíodo SLCD-61N5, associado a uma eletrónica adequada para a amplificação do sinal e a um Arduino UNO ligado a um computador para a aquisição e armazenamento dos resultados. O circuito do detetor de radão foi colocado numa caixa metálica de $22.0 \times 14.5 \times 5.50 \text{ cm}^3$, na qual a concentração de radão foi estimada através da simulação Monte Carlo.

1.2 Objetivos

Em função das considerações apresentadas anteriormente, pertinentes e relacionadas com a necessidade de se realizarem mais projetos de investigação científica na área das Ciências da Vida em Angola, particularmente na região da Bibala, neste estudo são definidos os seguintes objetivos:

1. Medição das concentrações médias de radão, existentes na água que as populações do município da

Bibala consomem diariamente com vista a realizar um estudo dosimétrico populacional a que adultos e crianças estão expostos.

2. Realização do estudo de viabilidade de um protótipo baseado num foto díodo de silício para a monitorização do radão, em tempo real, no meio ambiente. O detetor comercial de baixo custo é sensível a partículas alfa operando no modo de contagem de pulsos, lido por um microprocessador Arduino UNO, sem discriminação de energia.

1.3 Visão global da tese

No **Capítulo I** foram descritos os aspetos que motivaram a abordagem da temática do radão no município da Bibala, bem como os objetivos definidos neste estudo.

O **Capítulo II** é dedicado a generalidades sobre a radioatividade, com maior destaque às grandezas radiológicas fundamentais, suas unidades e os efeitos biológicos da radiação ionizante.

No **Capítulo III** é feita uma abordagem da interação das partículas carregadas com a matéria, bem como os processos da deposição da sua energia na matéria.

O **Capítulo IV** evidencia o radão como sendo a principal fonte de radioatividade natural no meio ambiente e o segundo responsável pelo aparecimento do cancro de pulmão em indivíduos fumadores. São também descritas as suas propriedades físicas e químicas, bem como os fenómenos de emanação e exalação do radão. Embora o radão seja mais conhecido como um agente cancerígeno, neste capítulo apresentam-se também algumas aplicações do radão em estudos relacionados com os fenómenos atmosféricos, na prospeção de hidrocarbonetos e na previsão de terremotos. Na última parte deste capítulo apresentam-se os resultados da medição da concentração de radão no interior de edifícios e na água de consumo público realizada em diferentes países, com destaque para os países africanos, cujos resultados foram comparados com os limites recomendados pela OMS, US-EPA e EURATOM. No **Capítulo V** analisam-se as principais técnicas utilizadas para a medição do radão no ar e na água, e o contexto em que cada uma das técnicas apresentada é mais vantajosa. Uma vez que em certos casos os valores da concentração de radão ultrapassam os limites recomendados, neste capítulo descrevem-se algumas medidas para a mitigação do radão no ar e na água de consumo público.

No **Capítulo VI**, depois de feita a caracterização geográfica da região da Bibala, são apresentados os resultados da concentração de radão na água do município, bem como os resultados da avaliação dosimétrica populacional devido à ingestão de radão contido na água de consumo público. Neste capítulo também é descrito o modo de construção de mapas de risco de radão, com o suporte do sistema de informação geográfica.

No **Capítulo VII** é inicialmente feita uma abordagem acerca das propriedades principais que influenciam o desempenho dos detetores de radiação, a seguir descrevem-se as fases da construção do protótipo para a medição de radão no ar, desde os componentes de circuito eletrónico, e da fonte de alimentação, até à construção da estrutura física de proteção do circuito. Finalmente, são apresentados e discutidos os resultados da medição efetuada com o protótipo construído neste estudo.

O potencial da Concentração de Radão na água do Município da Bibala

Capítulo 2

Principais grandezas Radiológicas

Na natureza, os átomos encontram-se em estados de energia mínima e são considerados estáveis. No entanto, existem alguns núcleos atômicos que se encontram em níveis de energia elevados tornando-se, por isso, instáveis. Estes núcleos, para se tornarem mais estáveis, emitem radiação sob a forma de onda ou de partícula. Este fenómeno, designado por radioatividade, consiste numa desintegração espontânea desses núcleos e a correspondente formação de outro mais estável.

Consoante a sua interação com a matéria a radiação é designada por ionizante ou não ionizante. Durante a interação ocorre transferência de energia para a matéria. Esta energia é absorvida e, da interação, pode resultar difusão, dispersão e atenuação da radiação, quando esta atravessa os meios materiais com os quais interatua. Na ausência de matéria ou de campos a radiação apenas sofre atenuação.

A ionização ocorre quando há adição ou remoção de eletrão, transformando o átomo num ião negativo ou positivo. A radiação não ionizante, é caracterizada pelo facto de a energia envolvida não ser suficiente para ionizar os átomos com os quais interage. O que distingue a radiação ionizante da não ionizante é apenas a sua energia. É importante referir que as radiações ionizantes, com frequências superiores a 10^{16} Hz, ao interagirem com os órgãos ou tecidos, podem causar grandes danos biológicos [Bry13]. No corpo humano, há uma probabilidade muito maior da radiação ionizante interagir com a água, uma vez que a água constitui 70% do corpo humano. Quando a radiação ionizante interage com a água, pode quebrar as ligações que mantêm a molécula de água unida, produzindo fragmentos como hidrogênio (H^+) e hidroxilas (OH^-). Esses radicais livres podem se recombinar, interagir com outros fragmentos ou iões para formar compostos, como a água, que não são prejudiciais. No entanto, os radicais livres podem também se combinar para formar substâncias tóxicas, como o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), que pode contribuir para a destruição da célula [Man10]. As radiações podem interagir diretamente ou indiretamente. As partículas carregadas, interagem diretamente e a sua velocidade varia no meio de propagação e as partículas neutras interagem indiretamente propagando-se no meio com velocidade constante.

2.1 Atividade

Os núcleos de isótopos radioativos desintegram-se espontaneamente por diferentes processos, resultando na emissão de radiação sob a forma de partículas e/ou fótons. A atividade de uma amostra de qualquer nuclídeo radioativo é a taxa segundo a qual os núcleos dos seus átomos constituintes decaem, cuja unidade S.I é o becquerel que corresponde a um decaimento por segundo. Se N for o número de núcleos radioativos que se desintegram num dado instante, t , a sua atividade, A , é dada pela equação 2.1:

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Medições experimentais das atividades de amostras radioativas indicam que elas decrescem exponencialmente com o tempo, quando só há desintegração e pode ser descrita pela equação 2.2 [Bei65]:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

onde t é o intervalo de tempo desde o instante inicial, em que é definida a atividade inicial, A_0 . De acordo com a equação da lei empírica da atividade, verifica-se que o decaimento dos núcleos radioativos decorre a partir de uma probabilidade constante (λ), por unidade de tempo dt . Assim, de acordo com a equação:

$$dN = -N\lambda dt \quad (2.3)$$

O sinal negativo indica que o número inicial de núcleos diminui com o aumento do tempo. A solução da equação diferencial (2.3) pode ser escrita como:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

Esta lei, designada Lei de Decaimento Radioativo, dá a probabilidade de um núcleo decair num certo intervalo de tempo dt [Bac93].

2.1.1 A atividade específica

A atividade específica de uma fonte radioativa é definida como sendo a atividade por unidade de massa da amostra de um determinado radionuclídeo. Se for obtida uma amostra pura, que não esteja misturada com outros elementos radioativos, ou que esteja livre de portadores de carga, a sua atividade específica pode ser calculada a partir da equação 2.5:

$$A_e = \frac{\lambda N_A}{M} \quad (2.5)$$

onde M é a massa molecular da amostra e N_A o número de Avogadro (6.02×10^{23} núcleos/mol). A unidade da atividade específica é Bq g^{-1}

2.2 Equilíbrio radioativo

Considerando o decaimento de um núcleo A para outro núcleo radioativo B, o número de núcleos pai, N_A e filhos, N_B , é alterado de acordo com as seguintes equações:

$$\frac{dN_A}{dt}(t) = -\lambda_A N_A(t) \quad (2.6)$$

$$\frac{dN_B}{dt}(t) = \lambda_A N_A(t) - \lambda_B N_B(t) \quad (2.7)$$

onde λ_A e λ_B são respetivamente as constantes de decaimento do núcleo pai e do filho. As soluções das equações 2.6 e 2.7 são respetivamente:

$$N_A(t) = N_{A_0}e^{-\lambda_A t} \quad (2.8)$$

$$N_B(t) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} N_{A_0}(e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) + N_{B_0}e^{-\lambda_B t} \quad (2.9)$$

onde, N_{A_0} e N_{B_0} representam a quantidade de núcleos dos radionuclídeos A e B no instante inicial [SMMV17].

Considerando que $\lambda_A < \lambda_B$ e tendo em conta que este processo de desintegração ocorre durante um período de tempo longo, o termo $e^{-\lambda_B t}$ na equação 2.9 é aproximado igual a zero. Ao fim de um certo intervalo de tempo a atividade do núcleo filho ($A_f = \lambda_B N_B$) deverá ser maior do que a do núcleo pai ($A_p = \lambda_A N_A$). Assim, as atividades dos dois radionuclídeos são proporcionais e a razão entre elas apresenta um valor constante, como se pode concluir da equação 2.10. A situação em que a razão das atividades do núcleo pai e do núcleo filho é constante é chamada de equilíbrio radioativo transiente. Nesse caso, o nuclídeo pai e o nuclídeo filho decaem essencialmente na mesma proporção [SMMV17].

$$\frac{A_p}{A_f} = \frac{\lambda_B - \lambda_A}{\lambda_B} \quad (2.10)$$

Um caso particular do equilíbrio transiente pode ocorrer quando a constante de decaimento do núcleo pai é muito menor do que a constante de decaimento do núcleo filho, a ponto de ser desprezável ($\lambda_A \approx 0$). Neste caso, a atividade do núcleo filho é igual à atividade do núcleo pai, e o equilíbrio radioativo nesta condição é designado equilíbrio secular devido à sua longa duração [SMMV17].

2.3 Tempo de meia-vida

Cada elemento radioativo desintegra-se com uma taxa específica relacionada com a sua constante de decaimento. A meia-vida é o tempo necessário para que o número de átomos de um isótopo radioativo seja reduzido à metade do seu valor inicial, independentemente das condições físicas, químicas ou da característica de cada isótopo radioativo, figura 2.1. O tempo de meia-vida e a constante de decaimento de um radionuclídeo relacionam-se através da seguinte equação:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2.11)$$

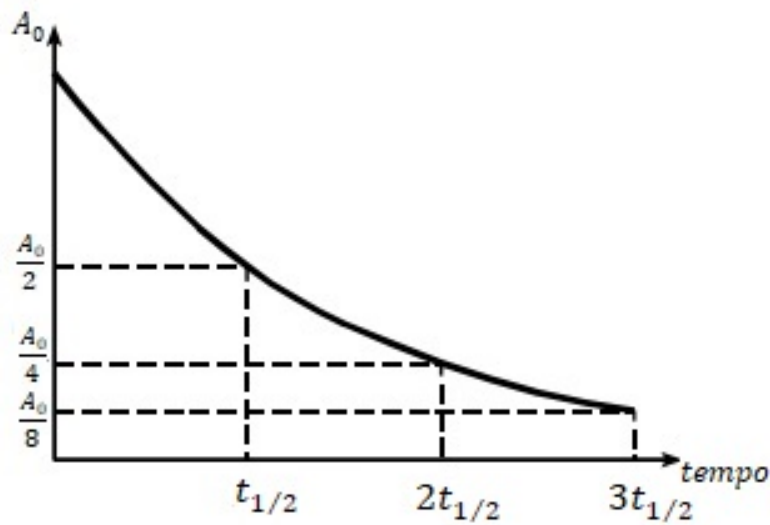


Figura 2.1: Lei exponencial do decaimento radioativo (variação do número de núcleos radioativos em função do tempo).
Adaptada de [Law99].

É importante salientar que o tempo de meia-vida de um radionuclídeo não é o mesmo que a sua vida média (τ). O tempo de vida média de um nuclídeo é o recíproco da sua probabilidade de decaimento por unidade de tempo [Bei94]:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (2.12)$$

2.4 Unidades da radioatividade

As unidades da radioatividade podem ser divididas em dois grupos: do primeiro grupo fazem parte as unidades que caracterizam a taxa de desintegração de uma fonte radioativa e no outro grupo figuram as unidades das grandezas associadas ao efeito biológico da radiação, as grandezas dosimétricas. O becquerel (Bq) e o curie (Ci) são as unidades da grandeza física Atividade. O becquerel, que é a unidade S.I., corresponde a uma desintegração por segundo. O curie (Ci) corresponde a 3.7×10^{10} desintegrações por segundo, isto é, $1 \text{ Bq} = 2.703 \times 10^{-11} \text{ Ci}$.

2.5 Grandezas dosimétricas e suas unidades

2.5.1 Fluência

A fluência de fótons ou partículas é, respetivamente, a razão entre o número de fótons ou partículas incidentes numa esfera, dN , e a área da secção transversal da esfera, dA [Shao0].

$$\phi = \frac{dN}{dA} \quad (2.13)$$

A unidade S.I da fluência é o m^{-2} .

2.5.2 Kerma

A radiação interage com a matéria segundo uma série de processos nos quais a energia das partículas é transferida e finalmente depositada na matéria. O kerma está associado à soma das energias cinéticas iniciais, das partículas carregadas (elétrons e pósitrons), libertadas através da interação de fótons, ou neutrões, num material. Representa o valor médio da energia transferida, num ponto, pelas partículas eletricamente carregadas, por unidade de massa, incluindo as perdas radiativas e excluindo a energia transferida de uma partícula carregada para outra - pela radiação indiretamente ionizante (fótons e neutrões) para partículas secundárias carregadas, por unidade de massa ou, em alternativa, radiação sem carga (indiretamente ionizante). Portanto, o kerma, K , é definido como a energia média transferida através da ionização indireta no meio, por unidade de massa dm [WZMP05]:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (2.14)$$

Onde dE_{tr} é a soma das energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas libertadas por partículas ionizantes sem carga elétrica, no volume de massa dm . A unidade S.I. é $J\ kg^{-1}$, contudo, em radiologia, o gray (Gy) é a unidade mais utilizada.

2.5.3 Dose

A dose é uma das grandezas mais significativa do ponto de vista biológico. Trata-se de uma grandeza mensurável, que tem em conta o campo de radiação e todas as interações que ocorrem no interior e no exterior do volume considerado. É uma grandeza não estocástica, isto é, supõe-se que, para determinada unidade de massa, é suficientemente grande para que as flutuações sejam desprezíveis. A dose absorvida é o resultado da energia da radiação depositada na matéria tanto por ionização direta, quanto por ionização indireta. Para especificar melhor as variações espaciais e evitar a variação da quantidade de energia absorvida, em diferentes pontos do volume do material, a dose absorvida é definida como uma variação num ponto P de interesse [Atto8]:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2.15)$$

Onde dE é a energia média transferida ao material de massa dm . A unidade S.I., da dose absorvida é a mesma do Kerma, o gray ($1\ Gy = J\ kg^{-1}$). De notar que a dose média absorvida é insuficiente para avaliar o dano causado pela exposição à radiação ionizante, pois tratando-se de uma grandeza macroscópica revela-se inadequada quando consideramos sistemas biológicos numa escala microscópica [Atto8].

2.5.3.1 Efeitos da exposição à doses de radiação

Dependentemente da dose absorvida, a radiação pode provocar efeitos biológicos imediatos (efeito determinístico), ou provocar também efeitos a longo prazo, que podem ocorrer depois de muitos anos ou depois de várias gerações (efeito estocástico).

O efeito determinístico ocorre quando o limiar de exposição a radiação ionizante é excedido, ou durante a exposição a níveis elevados de radiação, podendo provocar a morte imediata da célula ou depois de alguns dias. Por isso, o efeito determinístico da radiação é previsível e pode ser evitado. O efeito determinístico da radiação pode ainda estar na origem de várias doenças, como por exemplo, leu-

copenia, náuseas, anemia, catarata, queimaduras na pele, perda de cabelo, esterilidade e hemorragia [Vel11].

Iguais doses absorvidas, pelos mesmos órgãos ou tecidos, não produzem os mesmos efeitos biológicos. Assim, os tecidos com uma elevada taxa de renovação celular, como por exemplo, a medula óssea, gónadas e os intestinos, são mais vulneráveis a elevados níveis de radiação em relação aos ossos [Vel11]. A exposição à radiação por um período prolongado pode resultar em efeitos prejudiciais que aumentam o risco de alterações no ADN e podem, por isso, potenciar o aparecimento de cancro. Os efeitos estocásticos são descritos como aleatórios e imprevisíveis devido a exposição a níveis de radiação inferiores aos limites recomendados, porém o risco aumenta de forma praticamente linear com o aumento da dose absorvida ao longo do tempo. A alteração causada pela radiação ao longo do tempo no ADN, constitui a origem de diferentes tipos de cancro, podendo o efeito ser hereditário quando o dano ocorre em células germinativas. Para os cancros de tireoide, da mama, do pulmão e sangue, as estimativas de risco são bastante precisas e foram encontradas em doses relativamente baixas, menores do que 0.2 Gy [Ron98].

2.5.4 Dose equivalente

Diferentes órgãos ou tecidos, quando expostos à mesma radiação, podem absorver diferentes quantidades de energia, não apenas devido às alterações nas suas propriedades físicas mas, também, por causa das reações químicas induzidas. Por este motivo é expectável que a dose absorvida aumente com o aumento da energia da radiação.

O efeito biológico da radiação depende não só da quantidade de energia depositada na matéria, mas também da sensibilidade do local irradiado. De modo a estabelecer uma correlação entre as grandezas de dose usadas na proteção radiológica e os efeitos estocásticos, devem ser considerados dois tipos de fatores de ponderação. Um de ponderação da radiação, W_R , e outro de ponderação do tecido, W_T , que têm em consideração diferentes tipos de radiação e os efeitos estocásticos nos diferentes órgãos e tecidos do corpo humano [Bre08, MCK10].

Para se quantificar estes efeitos é utilizada uma grandeza designada dose equivalente, H_T , que é definida como sendo o produto da dose absorvida média no volume de um órgão ou tecido, T , pelo fator de ponderação da radiação, W_R , relativo ao tipo e energia de radiação incidente R , ou seja [CKM10]:

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R} \quad (2.16)$$

A dose equivalente no S.I. mede-se em sievert (Sv ou $J \text{ kg}^{-1}$). Um siervet corresponde à energia de 1 joule depositado num quilograma de massa.

Tabela 2.1: Fatores de ponderação da radiação (W_R) [SAHJ⁺12].

Tipos e intervalos de energia		Valores de W_R
Fotões (de todas as energias)		1
Elétrões e muões (de todas as energias)		1
Neutrões de energia	< 10 keV	5
	> 10 keV a 100 keV	10
	> 100 KeV a 2 MeV	20
	> 2 MeV a 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protões (não de recuo)	> 2 MeV	5
Partículas alfa, fragmentos de fissão e núcleos pesados		20

2.5.5 Dose efetiva

A dose efetiva, E , expressa na equação 2.17, é definida como a soma ponderada das doses equivalentes em todos os tecidos ou órgãos do corpo.

$$E = \sum_T W_T H_T \quad (2.17)$$

Na tabela 2.2 são apresentados os valores dos fatores de ponderação para um órgão ou tecido, representando as contribuições relativas dos órgãos e tecidos com a probabilidade de ocorrência de efeitos estocásticos. São valores médios para os dois gêneros e para todas as idades e não estão relacionados com as características anatómicas de um determinado indivíduo.

Os fatores de ponderação do tecido são valores relativos e a sua soma é igual a um ($\sum W_T = 1$), por isso, uma distribuição uniforme de dose no corpo todo proporciona uma dose efetiva numericamente igual à dose equivalente em cada órgão ou tecido do corpo [Lou13].

Tabela 2.2: Fatores de ponderação para um órgão ou tecido (W_T) [SAHJ⁺12].

Órgão ou tecido	W_T
Medula óssea, cólon, pulmão, mamas e restantes tecidos	0.12
Gónadas	0.08
Bexiga, esófago, fígado e tiroide	0.04
Superfície dos ossos, cérebro, glândulas salivares e pele	0.01
Alvéolo pulmonar humano	0.04
Região pulmonar linfática	0.00012

2.5.6 Equivalente de Dose

A dose de radiação absorvida, D , quando multiplicada pelo fator de qualidade da radiação, Q , dá-nos a medida do efeito biológico da dose, conhecido como equivalente de dose, H .

$$H = D \times Q \quad (2.18)$$

A transferência linear de energia (LET), é utilizada para descrever a perda de energia quando uma partícula carregada se move através da matéria, sendo por isso importante para determinar a resposta a uma determinada dose absorvida. Em particular, as radiações de alto LET (partículas alfa e neutrões) são mais eficazes por unidade de dose absorvida do que as radiações de baixo LET (raios-X e fótons), na indução de respostas biológicas, incluindo efeitos estocásticos e determinísticos.

Sendo o fator de qualidade, Q , uma grandeza adimensional, a unidade S.I. do equivalente de dose é o sievert (Sv). Esta grandeza constitui um fator de peso proveniente da simplificação dos valores da Eficiência Biológica Relativa (RBE), dos diferentes tipos de radiação, na indução de determinado tipo de efeito biológico. Assim, as diferenças entre as radiações são expressas pelos diferentes valores do LET, ou seja, o valor de Q é obtido em função do LET [Lou13].

A teoria da proteção radiológica é baseada na ideia de que a dose de radiação e os seus efeitos biológicos, nos tecidos vivos, acontece por meio da transferência linear de energia. O princípio de proteção radiológica ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) tem como objetivo a minimização de doses de radiação, empregando todos os métodos razoáveis, como a redução do tempo de exposição, o aumento da distância entre a fonte radioativa e o corpo irradiado e a utilização de uma blindagem,

adequada a cada tipo de radiação. Além disso, o princípio ALARA estabelece também limites de exposição ocupacional e a proibição da libertação de materiais radioativos no meio ambiente [Hea16]. Na prática, por uma questão de simplificação, é utilizado o valor médio do fator de qualidade Q, cujos valores efetivos são apresentados na tabela 2.3. É, no entanto, preciso notar que estes valores efetivos não são recomendáveis para se avaliar os efeitos de exposições acidentais que envolvem elevadas doses.

Tabela 2.3: Tabela de fatores de qualidade para diversos tipos de radiações [SAHJ⁺12].

Tipo de radiação/partícula	Q
Radiação X, Radiação gama e elétrons	1
Protões e partículas com uma unidade de carga, $m_0 > 1$ u e de energia desconhecida	10
Neutrões com energia desconhecida	20
Partículas alfa e outras partículas com carga superior a uma unidade de carga	20

A República de Angola é, desde 1999, membro da Agência Internacional de Energia Atômica, tendo a Assembleia Nacional aprovado a Lei da Energia Atômica, lei n^o 04/07 de 5 de Setembro, que nos Artigos 16^o e 17^o estabelece medidas de proteção e segurança radiológica. No entanto, tanto quanto se sabe, não existe até ao momento uma legislação que estabeleça os limites de dose efetiva para a população, também não existe uma regulamentação específica para trabalhadores e estudantes em situação de risco.

Capítulo 3

A interação da radiação com a matéria

A radiação interage com a matéria de diferentes formas e o processo de perda de energia da radiação eletromagnética é completamente distinto do que o que ocorre com as partículas carregadas.

Uma partícula sem carga pode atravessar praticamente todo o material sem nenhuma interação, no entanto, as partículas carregadas vão perdendo, progressivamente, a sua energia em cada ponto de interação. Todas as partículas carregadas, que são emitidas num decaimento nuclear, são diretamente ionizantes.

Este capítulo é dedicado à abordagem da interação de partículas carregadas com a matéria, com particular destaque a interação da radiação alfa, tendo em conta que este é o tipo de interação que nos interessa, uma vez que o radão, quando decai para o ^{218}Po , emite partícula alfa.

3.1 Interação das partículas carregadas com a matéria

As partículas carregadas ao percorrerem a matéria estão sujeitas a interações de Coulomb com os eletrões e com os núcleos atômicos e vão perdendo parte da sua energia, daí que, a probabilidade destas partículas atravessarem meios densos, sem sofrer qualquer interação é praticamente nula [Bic93].

As partículas carregadas provocam ionização direta, porque interagem fortemente com os eletrões orbitais do material no qual se movem. Como consequência, a velocidade das partículas diminui obrigando-as a desviarem-se em relação à sua direção inicial. Em energias mais elevadas, as partículas carregadas também estão sujeitas a perdas radiativas e eletrões, com energias acima de algumas dezenas de MeV, são mais sujeitos a processos de radiação de travagem, *Bremsstrahlung*, isto é, os eletrões perdem parte da sua energia, que é emitida sob a forma de um fóton [Lec18].

Para outras partículas carregadas, as perdas radiativas são importantes apenas a energias muito mais altas por terem massas elevadas (por exemplo, centenas de GeV para os muões). Os prótons com altas energias na ordem de GeV ao interagirem com a atmosfera são sujeitos a colisões nucleares inelásticas, produzindo, em média, uma série de hádrons; alguns desses hádrons (neutrões e píons carregados) podem ter outras colisões nucleares, resultando em uma cascata hadrónica. A perda média de energia da partícula carregada por unidade de comprimento, devido às perdas radiativas, é geralmente quantificada por meio do poder de paragem [Lec18].

3.1.1 Interação da radiação alfa com a matéria

A partícula alfa interage com a matéria transferindo-lhe energia. A maioria das energias das partículas alfa encontram-se no intervalo entre 4 e 6 MeV, apenas em alguns casos as suas energias são superiores a 7 MeV. Na tabela 3.1 pode ver-se que existe uma clara correlação entre a energia das partículas alfa e a meia-vida do isótopo emissor. A energia das partículas alfa emitidas pelos radionuclídeos com tempos de meia-vida mais curtos são as mais elevadas [CEF99].

Tabela 3.1: Radionuclídeos emissores de partícula alfa [CEF99].

Radionuclídeo	Meia-vida	Energia (MeV)	% de decaimento
¹⁴⁸ Gd	93 a	3,2	100
²³² Th	1.4×10^{10} a	4.0	77
²³⁸ U	4.5×10^9 a	4.2	77
²³⁵ U	7.1×10^8 a	4.4	56
²³⁶ U	2.4×10^7 a	4.5	74
²³⁰ Th	7.7×10^4 a	4.7	76
²⁴³ U	2.5×10^5 a	4.8	72
²³¹ Pa	3.2×10^4 a	5.0	25
²³⁹ Pu	2.4×10^4 a	5.2	73
²⁴⁰ Pu	6.5×10^3 a	5.2	76
²⁴³ Am	7.4×10^3 a	5.3	87
²⁴¹ Am	432 a	5.5	85
²⁴⁴ Cm	18 a	5.8	76
²⁴³ Cm	30 a	5.8	73
²⁴² Cm	163 d	6.1	74
²⁵³ Es	20.5 d	6.6	90
²¹⁴ Po	164 μ s	7.6	99

Embora as interações das partículas carregadas com os núcleos atômicos sejam possíveis, como acontece na dispersão de Rutherford e nas reações induzidas por partículas alfa, estas interações ocorrem com pouca frequência. A partícula alfa interage com a matéria principalmente através da interação coulombiana, entre a sua carga positiva e a carga negativa dos elétrons orbitais dentro dos átomos da matéria. A partícula alfa ao penetrar na matéria, interage simultaneamente com muito dos seus elétrons. Em qualquer uma destas interações o elétron é atraído através da força coulombiana quando a partícula alfa se aproxima dele. Dependendo da proximidade da interação, a força coulombiana pode ser suficiente para excitar o elétron para uma camada superior do átomo, processo de excitação, ou para remover completamente o elétron do átomo, processo de ionização. Devido à interação da partícula alfa com os elétrons, a sua velocidade diminui continuamente até que seja parada. Há exceção das interações finais, a trajetória da partícula alfa tende a ser uma linha reta, uma vez que, devido à sua elevada massa não é desviada em cada interação, e as interações ocorrem simultaneamente em todas as direções [Kno10].

Nas interações da radiação alfa que ocorrem a distâncias muito pequenas, se o elétron sofrer um impulso maior, depois de se libertar do átomo, adquire energia cinética suficiente para criar novos íons. Esses elétrons energéticos são chamados de raios delta e constituem também uma forma através da qual a energia das partículas carregadas é transferida para a matéria. Os elétrons, sobretudo os que possuem energias mais baixas, ou os que interagem com matéria de elevado elevado número atômico, são frequentemente desviados da sua trajetória, muitas vezes em ângulos de grande amplitude ao longo do seu percurso, o que origina o fenômeno de retrodifusão, *backscattering* [Kno10].

A perda da maior parte da energia da partícula alfa, ocorre quando são produzidos os raios delta, ou seja, em interações muito próximas com os elétrons. O alcance dos raios delta é sempre menor quando comparado com o alcance da partícula alfa incidente, de modo que a ionização ocorre logo no início do seu percurso.

3.1.2 Secção eficaz

Diferentes tipos de partículas interagem com a matéria de maneiras muito diferentes. As radiações que não têm carga, como é o caso dos fótons e neutrões, são designadas indiretamente ionizantes pois a sua energia é transferida, de forma aleatória, para os elétrons do meio que irão dar origem

a ionizações. Daí que estes processos sejam totalmente probabilísticos, isto é, existe uma determinada probabilidade da interação acontecer. Esta probabilidade de interação é também designada por secção eficaz.

O conceito de secção eficaz está relacionado com a probabilidade P de uma partícula incidente interagir com um átomo ou núcleo. Numa interpretação geométrica simples, a secção eficaz, pode ser considerada como a área dentro da qual pode ocorrer a interação entre duas partículas. Ou seja, é a probabilidade de interação por unidade de fluência, ϕ , que é o fluxo de partículas do feixe por unidade de área [Hub99]:

$$\sigma = \frac{P}{\phi} \quad (3.1)$$

A unidade S.I. de secção eficaz é o barn, $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$. A secção eficaz depende de muitos fatores, como por exemplo, da partícula alvo, isto é, da composição da sua massa em repouso, da energia das partículas incidentes e do tipo de interação que está envolvida. O conhecimento quantitativo da secção eficaz na interação de partículas permite simular o percurso dessas partículas e a energia depositada na matéria, utilizando códigos de Monte Carlo [UNO2, UNO6].

3.1.3 Poder de paragem de partículas carregadas

As partículas carregadas, leves ou pesadas são, como já foi dito, diretamente ionizantes e, quando interagem com a matéria, como resultado das suas múltiplas colisões, perdem energia. Uma vez que o número de eletrões é muito superior ao número de núcleos, estas partículas colidem mais frequentemente com eletrões, sendo por isso estas, as perdas de energia mais significativas. A média dessas perdas de energia, por unidade de comprimento, é conhecida como poder de paragem e o alcance da partícula carregada é o comprimento médio que percorrem na matéria antes de parar [Bic93].

Por exemplo, quando um próton penetra na matéria, interage em simultâneo com muitos eletrões devido à força de Coulomb. A energia máxima que pode ser transferida pelo próton de massa M , com energia cinética inicial E para um eletrão de massa m_e , em uma única colisão, é dada pela expressão [RL15] :

$$E_{max} = \frac{4Em_eM}{(M + m_e)^2} \quad (3.2)$$

Uma vez que a equação 3.2 representa uma pequena fração da energia total, a partícula primária perde a sua energia nas interações subsequentes durante a sua passagem pela matéria. Ao atravessar a matéria, a partícula interage com muitos eletrões, transferindo a sua energia por processos de colisão e de paragem, causando a continua diminuição da sua velocidade até que seja completamente parada. O poder de paragem, S , cuja unidade é MeV/cm, é definido como a taxa de energia dE que a partícula perde ao longo da sua trajetória dx , e pode ser calculado pela expressão [AGNM17]:

$$S = -\frac{dE}{dx} \quad (3.3)$$

Na figura 3.1 está representado o gráfico do poder de paragem de uma partícula carregada, com energia inicial 121.2 MeV, em função do comprimento percorrido na água, designado Curva de Bragg [ZLL+11].

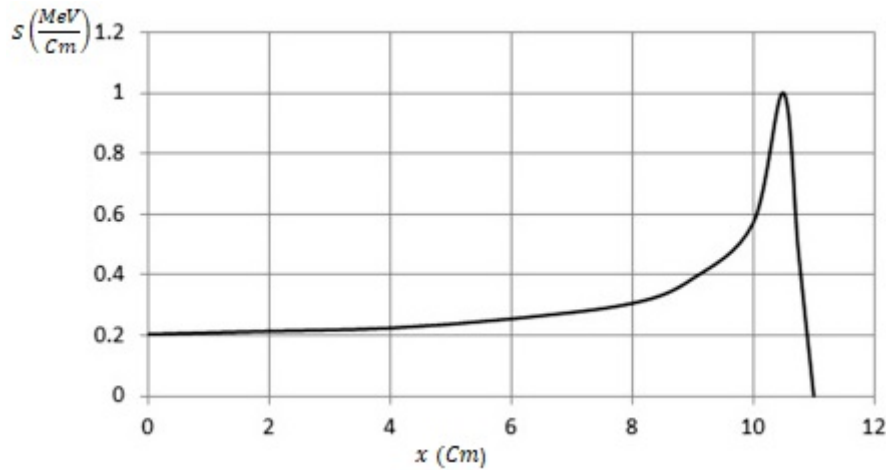


Figura 3.1: Curva de Bragg produzida por um feixe de prótons que se propaga na água com energia inicial 121.2 MeV.

Adaptada de [ZLL⁺11].

Usando a mecânica quântica relativística, Bethe derivou a seguinte expressão para o poder de paragem num meio uniforme para uma partícula carregada pesada [GWP17]:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi k_0^2 z^2 e^4 n}{m c^2 \beta^2} \left[\ln \frac{2 m c^2 \beta^2}{I (1 - \beta^2)} - \beta^2 \right] \quad (3.4)$$

onde $k_0 = 8.99 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^2$ é a constante de Coulomb, z é o número atômico, e é a carga do eletrão, ze representa a carga da partícula carregada pesada, n é o número de eletrões por unidade de volume no meio, m é massa de repouso do eletrão, $\beta = v/c$, v é velocidade do eletrão e I é energia média de excitação e ionização do meio.

O poder de paragem depende do tipo de partícula, da sua energia e das propriedades do meio material que ela atravessa. Os seus valores podem ser encontrados nas bases de dados da NIST e SRIM [Leo12].

3.1.4 Alcance das partículas carregadas

As partículas carregadas são consideradas pesadas quando possuem massas em repouso significativamente superiores à massa do eletrão. Fazem parte desta categoria os prótons, as partículas alfa e os iões. Uma partícula carregada pesada que atravessa a matéria perde energia principalmente através da ionização e da excitação de átomos. Esta partícula pode transferir apenas uma pequena fração da sua energia em uma única colisão eletrónica, sendo a sua deflexão, insignificante, por isso, as partículas carregadas pesadas deslocam-se através da matéria, em trajetórias praticamente retilíneas [Pod14].

As partículas carregadas leves são os eletrões e positrões. O eletrão na matéria colide com partículas de massas idênticas e, por isso, são desviados com grandes ângulos de deflexão, resultando em uma trajetória aleatória, em vez de um percurso retilíneo como acontece com as partículas carregadas pesadas [Pod14].

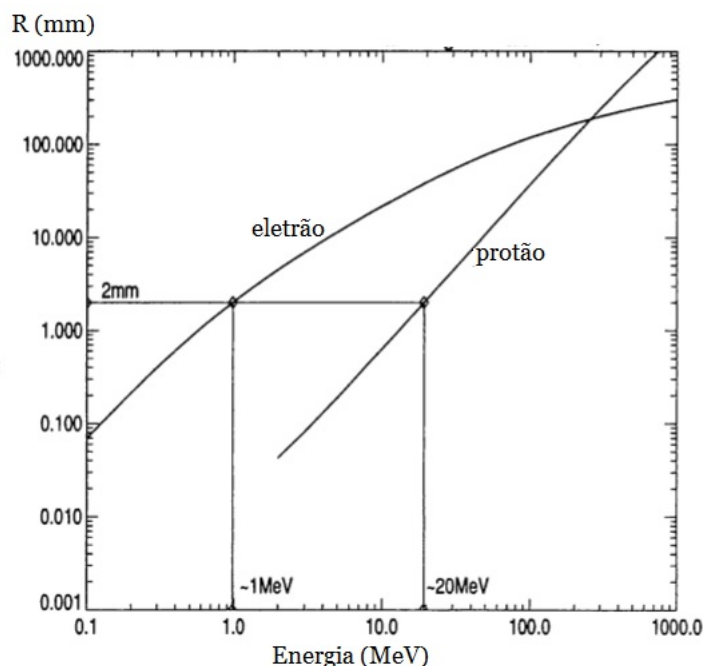


Figura 3.2: Trajetória e alcance médio em mm do elétron e do próton no alumínio. Adaptada de [DDHE96].

O alcance do próton num material de comprimento finito e o ângulo de deflexão (θ_0) resultante da interação elástica com um núcleo estão relacionados através da equação de Highland [Hig75]:

$$\theta_0 = \left(\frac{14.1 \text{ MeV}}{pv} \right) \sqrt{\frac{x}{x_0}} \left(1 + \frac{1}{9} \log_{10} \frac{x}{x_0} \right) \quad (3.5)$$

onde p é o momento linear do próton, v é a velocidade inicial da partícula, x_0 é o comprimento da matéria e x é o alcance do próton no material.

Para os elétrons, uma vez que não percorrem trajetórias retilíneas na matéria, pode existir dificuldade em distinguir a distância percorrida da distância de penetração. As equações empíricas do alcance R de um elétron com energia cinética inicial T em materiais com baixo número atômico, z (por exemplo o alumínio), são dadas pelas seguintes expressões [Turo8]:

Para $0.01 \leq T \leq 2.5 \text{ MeV}$

$$R = 0.412T^{1.27-0.0954 \ln T} \quad (3.6)$$

Para $T > 2.5 \text{ MeV}$

$$R = 0.530T - 0.106 \quad (3.7)$$

3.1.5 Alcance das partículas alfa

A partícula alfa, de energia E_α , por ser uma partícula pesada move-se lentamente e percorre curtas distâncias, sendo que uma folha de papel é suficiente para parar completamente o seu percurso. O seu alcance no ar é de cerca de alguns centímetros e pode ser calculado com a seguinte equação semi-empírica [LR11]:

$$R_{ar}(cm) = (0.05E_{\alpha} + 2.85)E_{\alpha}^{\frac{3}{2}} \quad (3.8)$$

O valor médio da velocidade da partícula alfa na matéria pode ser obtido através da equação clássica da energia cinética, isto é [Kno10]:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{2E}{m}} \quad (3.9)$$

onde m é a massa da partícula alfa expressa em Kg e E é a sua energia em Joule.

3.1.6 Alcance CSDA e alcance projetado

O alcance de uma partícula carregada com uma energia inicial conhecida é definido como sendo o valor do comprimento do passo percorrido até à sua paragem, não tendo em consideração o movimento térmico. O comprimento do passo da partícula é uma grandeza difícil de ser medida, embora seja mais facilmente obtida por simulação computacional a partir do alcance na aproximação CSDA (*continuous slowing-down approximation*), R_{CSDA} . O alcance R_{CSDA} é dado pelo integral do inverso do potencial de paragem total em ordem à energia [Atto8]:

$$R_{CSDA} = \int_0^{T_0} \left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE \quad (3.10)$$

onde T_0 é a energia cinética inicial da partícula. Se $\frac{dE}{dx}$ for expresso em $\frac{MeV}{cm}$ e ρ em $g\ m^{-3}$, o R_{CSDA} expressa-se em $g.cm^{-2}$.

Uma outra grandeza importante é o alcance projetado (*projected range*), $\langle t \rangle$, de uma partícula carregada, com uma determinada energia inicial. Este alcance é o valor esperado para a máxima penetração da partícula, na matéria, na sua direção inicial. Trata-se de uma quantidade que pode ser determinada experimentalmente. Para isso, considera-se um feixe de partículas que incide perpendicularmente num material com várias camadas, de espessura variável, e mede-se o fluxo de partículas que atravessam esse material, quando se varia essa mesma espessura, figura 3.3. A maioria das partículas carregadas pesadas, excluindo interações nucleares, atravessam o meio até alcançarem uma determinada espessura t_1 . A partir deste ponto verifica-se uma diminuição significativa do número de partículas que atravessam a camada seguinte. A máxima profundidade de penetração que a partícula atravessa corresponde à espessura $t_{m.x}$ [Atto8].

$$\langle t \rangle = \int_{t_1}^{t_{m.x}} t \frac{dN(t)}{dt} dt / \int_{t_1}^{t_{m.x}} \frac{dN(t)}{dt} dt \quad (3.11)$$

onde $dN(t)/dt$ é o número de partículas paradas na profundidade entre t e $t + dt$.

Para questões práticas o alcance projetado pode ser obtido a partir da curva experimental, onde a espessura do meio absorvedor reduz a intensidade do feixe das partículas carregadas para 50% do valor de *plateau*. O alcance de CSDA é obtido por simulação Monte Carlo através da soma de todos os passos efetuados pela partícula alfa ao longo do seu percurso na matéria. O programa usa a correção do passo da dispersão múltipla para obter o valor do alcance na aproximação CSDA [PL14].

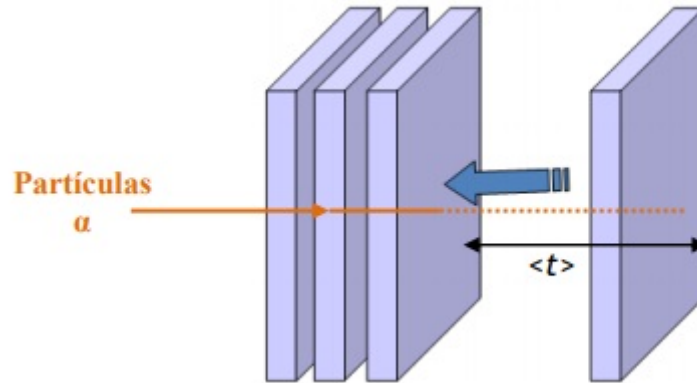


Figura 3.3: Diagrama ilustrativo subjacente ao cálculo do alcance projetado [Lou13].

A equação 3.12 relaciona o alcance de duas partículas carregadas pesadas no mesmo material e com a mesma energia inicial, permitindo calcular o alcance de uma das partículas quando é conhecido o alcance da outra partícula [Fico8]:

$$\frac{R_1(\beta)}{R_2(\beta)} = \frac{Z_1^2 M_1}{Z_2^2 M_2} \quad (3.12)$$

onde M_1 e M_2 são as massas em repouso, Z_1 e Z_2 são as cargas, R_1 e R_2 são os alcances das partículas carregadas na matéria.

3.2 Distribuição da perda de energia

A perda total de energia de uma partícula alfa é uma grandeza de natureza estocástica cuja dispersão pode ser representada por uma função de distribuição gaussiana. Quando a partícula atravessa um material, devido à natureza estatística da perda de energia da partícula alfa por ionização, podem ocorrer grandes flutuações na quantidade de energia depositada. A descrição das flutuações de ionização é caracterizada pelo parâmetro de significância k , isto é [Vav57]:

$$k = \frac{\varepsilon}{T_{max}} \quad (3.13)$$

onde ε é a energia depositada, no material, numa colisão, T_{max} é a energia máxima transferida durante uma única colisão com um eletrão, que é expressa pela equação 3.14:

$$T_{max} = \frac{2mc^2\beta^2\gamma^2}{1 + 2m/M} \quad (3.14)$$

Onde M é a massa da partícula, m é a massa do eletrão e

$$\gamma^2 = \frac{1}{1 - \beta^2} \quad (3.15)$$

Assim, a equação da energia em MeV depositada no material pode ser expressa por:

$$\varepsilon = 0.1536 \frac{zZ^2}{A\beta^2} \tau \quad (3.16)$$

onde z e Z são os números atômicos da partícula e do material, respectivamente, A é a massa atômica do material, τ a sua espessura e $\beta = \frac{v}{c}$. Esta equação é útil para o cálculo de k na equação 3.13 [Vav57]. As distribuições estatísticas simuladas por códigos de Monte Carlo fornecem valores da energia depositada no material e a probabilidade de ocorrência desses resultados. Uma vez que a energia depositada toma valores contínuos, as distribuições estatísticas utilizadas correspondem a distribuições de probabilidade.

3.3 Distribuição Gaussiana

A probabilidade de que, ao percorrer uma distância dx no material, uma partícula sofra uma colisão resultando na perda da sua energia, pode ser dada pela distribuição de probabilidade de gauss, ou seja [Phy99]:

$$f(x, \Delta x) = \frac{1}{\varepsilon \sqrt{\frac{2\varepsilon}{k} (1 - \beta^2/2)}} \exp \left(-\frac{(\bar{\varepsilon} - \varepsilon)^2}{2 \frac{k}{\varepsilon^2 (1 - \beta^2/2)}} \right) \quad (3.17)$$

onde $\bar{\varepsilon}$ é a energia média depositada na matéria.

3.4 Distribuição de Landau

A distribuição do Landau está relacionada com a perda de energia ε para $\varepsilon + d\varepsilon$ por unidade infinitesimal de comprimento no material e é expressa pela equação [LLL+44]:

$$f(x, \Delta x) = \frac{1}{\varepsilon} \phi(\lambda) \quad (3.18)$$

Sendo o parâmetro λ dado por:

$$\lambda = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} - \ln \frac{\varepsilon}{W_{max}} - \beta^2 - \gamma_E \quad (3.19)$$

onde $\gamma_E = 0.577$ é constante de Euler, $\Delta\varepsilon$ é a variação da energia depositada no material, ε é a energia depositada no material e W_{max} é a energia máxima transferida numa única colisão.

3.5 Distribuição de Vavilov

A perda de energia de partículas carregadas num material de espessura fina é geralmente calculada pela distribuição de Vavilov, de acordo com equação 3.20. Esta função depende essencialmente da velocidade da partícula [Vav57]:

$$f(x, \Delta x) = \frac{1}{\varepsilon} \phi(\lambda_v, k, \beta^2) \quad (3.20)$$

Onde λ_v é dado por:

$$\lambda_v = \left(\frac{\varepsilon - \bar{\varepsilon}}{\varepsilon} - \gamma - \beta^2 \right) \quad (3.21)$$

Portanto, os critérios práticos geralmente aceites são o uso da distribuição de Landau para $k \leq 0.01$, a aproximação gaussiana para $k \geq 10$ e a situação intermédia é descrita pela distribuição de Vavilov, $0.01 \leq k < 10$. A distribuição de Vavilov aproxima-se da distribuição de Landau quando k tende para zero e se aproxima da distribuição gaussiana, quando k tende para infinito [LLL+44, RM90].

3.6 Dispersão Múltipla

Uma partícula alfa é emitida isotropicamente, isto é, em todas direções, a partir de pequenos volumes virtuais e são continuamente desviadas, através de pequenos ângulos, da sua trajetória devido, principalmente, às múltiplas dispersões coulombianas dos núcleos, (figura 3.4). De acordo com a teoria de Fermi, os ângulos de deflexão θ_x e θ_y , nos planos xz e yz, têm distribuições gaussianas independentes e são dados pela equação 3.22 [B+12]:

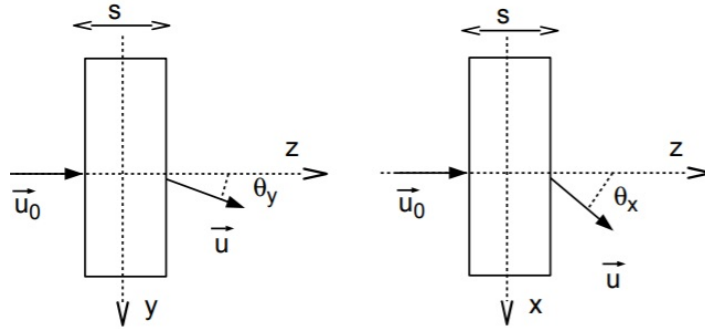


Figura 3.4: Representação esquemática do ângulos de deflexão da partícula alfa. Adaptado de [PL14].

$$\frac{dN}{d\theta_i} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\theta_0} \exp\left(-\frac{\theta_i^2}{2\theta_0^2}\right) \quad (3.22)$$

Sendo $i = x, y$. A escolha dos eixos x e y é arbitrária desde que os eixos x , y e z sejam ortogonais entre si.

O desvio padrão da distribuição gaussiana é aproximadamente igual a [B+12]:

$$\theta_0 = \frac{13.6MeV}{pc\beta} Z_\alpha \sqrt{\frac{S}{x_0}} \quad (3.23)$$

onde x_0 é o comprimento do material atravessado e S representa o valor de cada passo efetuado pela partícula no material. A direção da velocidade da partícula é dada pela seguinte equação [B+12],

WSP+90]:

$$\vec{v} = v_x \vec{e}_x + v_y \vec{e}_y + v_z \vec{e}_z \quad (3.24)$$

onde :

$$v_x = \sin \theta_x \quad (3.25)$$

$$v_y = \sin \theta_y \quad (3.26)$$

$$v_z = \sqrt{1 - v_x^2 - v_y^2} \quad (3.27)$$

Capítulo 4

O radão

Os seres humanos estão diariamente expostos a diferentes fontes de radiação ionizante, tanto naturais quanto aquelas produzidas pelo homem. De acordo com o relatório do Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica, cerca de 85% da dose de radiação recebida pela população tem a sua origem em fontes radioativas naturais, que contribuem com uma dose efetiva anual estimada em 2.4 mSv da qual, aproximadamente metade é provocada pela inalação ou ingestão do gás radão, figura 4.1 [Rad09].



Figura 4.1: Fontes naturais e artificiais de radiação [Rad09].

4.1 Propriedades físicas e químicas do radão

São conhecidos cerca de 40 isótopos de radão até hoje, sendo os três isótopos de radão mais comuns e naturalmente abundantes o ^{222}Rn , ^{220}Rn e ^{219}Rn [Koz17]. No entanto, o isótopo ^{222}Rn , que tem a sua origem na série de decaimento do ^{238}U constitui, em relação aos outros isótopos da mesma cadeia de decaimento, o radionuclídeo de maior interesse radiológico. Nesta série radioativa do ^{238}U , que é a que mais contribui para a dose da radioatividade ambiental, o ^{222}Rn é único elemento gasoso. Como se pode ver, a cadeia de decaimento do ^{238}U , representada na figura 4.2, é constituída por 15 radionuclídeos que decaem 8 vezes por emissão alfa e 6 vezes por emissão beta, até terminar no isótopo de chumbo, ^{206}Pb , que é estável [Wil90].

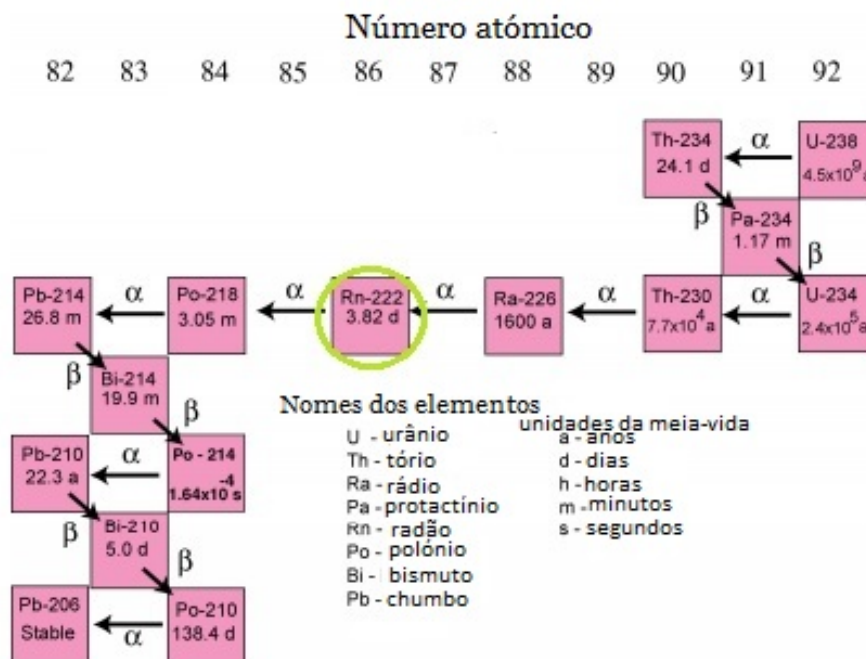


Figura 4.2: Série de decaimento do ^{238}U .
Adaptada de [DFFSo4].

O radão, ^{222}Rn , é um gás radioativo com um tempo de meia-vida de 3.8 dias que, em condições normais de temperatura e pressão, é insípido, inodoro e incolor. Como é um gás nobre, não reage quimicamente, pelo que a sua presença no ambiente não é perceptível pelos nossos sentidos. É um gás denso, com uma densidade nove vezes superior à do ar atmosférico e, por esta razão, acumula-se na camada mais baixa da atmosfera. O radão é solúvel na água e, uma vez que a água subterrânea está em contato permanente com o solo e com as rochas que contêm quantidades variáveis de ^{226}Ra , a presença do radão na água de consumo público de origem subterrânea, mesmo em pequena quantidade, é incontornável [ZSo6, APN17].

Na tabela 4.1 estão indicadas algumas das propriedades físicas e químicas, mais importantes do radão, uma das quais é o coeficiente de difusão no ar. Como se pode ver o seu valor é de $0.1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, o que lhe permite atingir velocidades média de até 165 m s^{-1} , conferindo-lhe desta forma uma grande liberdade de mobilidade e potenciar a sua rápida migração da rocha para a superfície [Bas16]. O risco radiológico associado ao radão deve-se, essencialmente aos seus descendentes sólidos, em particular ao ^{218}Po e ao ^{214}Po . Estes radionuclídeos têm uma meia-vida muito curta e, se as partículas alfa, altamente energéticas, que são libertadas no seu decaimento, aderirem aos tecidos pulmonares podem potenciar o desenvolvimento de neoplasias do foro respiratório [NYO2].

Tabela 4.1: Resumo das propriedades físicas e químicas do radão [Bas16].

Propriedades químicas/físicas	²²² Rn
Número Atômico (Z)	86
Raio atômico	120 pm
Massa Molar (M)	222.02 g/mol
Estado Físico (25 °C)	gasoso
Temperatura de fusão	- 71°C
Temperatura de ebulição	- 62°C
Densidade	9.73 g/L (0°C)
Meia-Vida	3.823 dias
Solubilidade na água a 20 °C	230 cm ³ /kg
Coefficiente de difusão no ar	0.1 cm ² s ⁻¹
Coefficiente de difusão na água	10 ⁻⁵ cm ² s ⁻¹

O radão decai por emissão alfa dando origem a outros radionuclídeos, sólidos, quimicamente ativos. Os radionuclídeos descendentes do radão são constituídos por isótopos de polônio, bismuto e chumbo, e formam uma cadeia de decaimento que termina com um isótopo estável de chumbo, ²⁰⁶Pb. Estes descendentes do radão são classificados em dois grupos: os descendentes de curta meia-vida (²¹⁸Po, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi e ²¹⁴Po) e os descendentes de longa meia-vida (²¹⁰Pb, ²¹⁰Bi, ²¹⁰Po). Como já foi dito, os isótopos do polônio (²¹⁴Po e ²¹⁸Po), quando decaem por emissão alfa, são os nuclídeos que libertam maior energia, respetivamente, de 6 MeV e 7.69 MeV, como indicado na tabela 4.2. Nesta tabela, para além da energia das partículas alfa, também são dados os tempos de meia-vida e a energia máxima das partículas beta- emitidas no decaimento beta [CEF99].

Tabela 4.2: Energias em MeV emitidas pelo radão e seus descendentes [CEF99].

Radionuclídeo	Meia-vida	E _α (MeV)	E _β (MeV)
²²² Rn	3.82 d	5.49	-
²¹⁸ Po	3.05 min	6.00	-
²¹⁴ Pb	36.8 min	-	1.02
²¹⁴ Bi	19.7 min	-	3.27
²¹⁴ Po	164 μs	7.69	-
²¹⁰ Pb	21 a	-	0,06
²¹⁰ Bi	5.01 d	-	1.16
²¹⁰ Po	138.4 d	5.40	-
²⁰⁶ Pb	estável	-	-

A identificação do radão ocorreu pela primeira vez na Alemanha e foi descoberto por Friedrich Ernest Dorn em 1900 que, inicialmente, chamou-lhe emanção do rádio. Em 1902, Rutherford e Soddy conseguiram condensar o radão, e cinco anos mais tarde, Soddy conseguiu provar que o radão era um membro da família dos gases nobres. Porém, foi na década de 1950 que se ganhou consciência do potencial perigo que o radão representa para a saúde, quando começaram a ser diagnosticados problemas respiratórios em mineiros de minas de urânio na região de Erz Mountains, na Europa Oriental [Wil90].

Os isótopos de polônio (²¹⁴Po e ²¹⁸Po), sendo sólidos, fixam-se nos aerossóis atmosféricos e podem, por isso, ser inalados ou ingeridos juntamente com os alimentos ou com a água de consumo público. Quando o radão é inalado, as partículas alfa emitidas a partir do decaimento do radão e dos seus descendentes sólidos interagem com os tecidos biológicos dos pulmões, o que provoca a destruição do ADN das células pulmonares [GCKM+20]. Por esta razão, o radão foi classificado como cancerígeno pela Organização Mundial da Saúde (OMS), em 1988, e como o maior causador de cancro de pulmão depois do tabaco, sendo os fumadores os mais vulneráveis devido à forte interação entre o fumo e a

exposição ao radão [DHD01, O+09]. Desde então, tem-se observado uma maior preocupação com a medição do radão e o aumento de estudos relacionados com a ocorrência de cancro de pulmão e do estômago, resultantes da exposição a este gás radioativo presente em espaços interiores e na água de consumo público [TDRRPL+14, AAB15, BLBDRR17, MS17, KRSS+20].

O desenvolvimento de cancro do pulmão, devido ao radão, não ocorre para um nível de exposição bem determinado, mas é consensual que deve existir um limite de concentração de radão no interior, acima do qual este gás tem potencialidades em provocar o aparecimento de neoplasias pulmonares. Esta probabilidade é maior quando aumenta o número de partículas alfas resultantes do decaimento do radão e dos seus descendentes no interior de espaços fechados. Por outro lado, existe um efeito sinérgico, em maior ou menor grau, entre o radão e o tabagismo, de modo que os fumadores expostos em ambientes com radão provavelmente têm um risco mais alto (6 a 10 vezes) do que os não fumadores, pese embora as estimativas numéricas desse sinergismo serem ainda muito incertas [ICR91]. O radão figura na lista das principais causas de morte na Europa e nos Estados Unidos. Na União Europeia, bem como em outras regiões mais desenvolvidas do mundo, o cancro de pulmão é a causa mais comum de morte por cancro, sendo responsável por cerca de 20% do total de mortes, incluindo o cancro do ovário, cérebro, estômago, melanoma e do fígado. O cancro do pulmão foi a causa, em toda Europa, de aproximadamente 9000 mortes em 2006, enquanto que nos Estados Unidos da América, segundo um estudo realizado em 2012 pela Agência de Proteção Ambiental, ocorrem todos os anos cerca de 21000 mortes por cancro de pulmão, devido à exposição em ambientes com elevada concentração de radão. De acordo com o gráfico da figura 4.3, apresentado pela US - EPA, o número anual de mortes devido ao radão é superior ao número de mortes por condução sob efeito de álcool, quedas em residências, afogamentos e mortes por incêndios em residências [Age12].

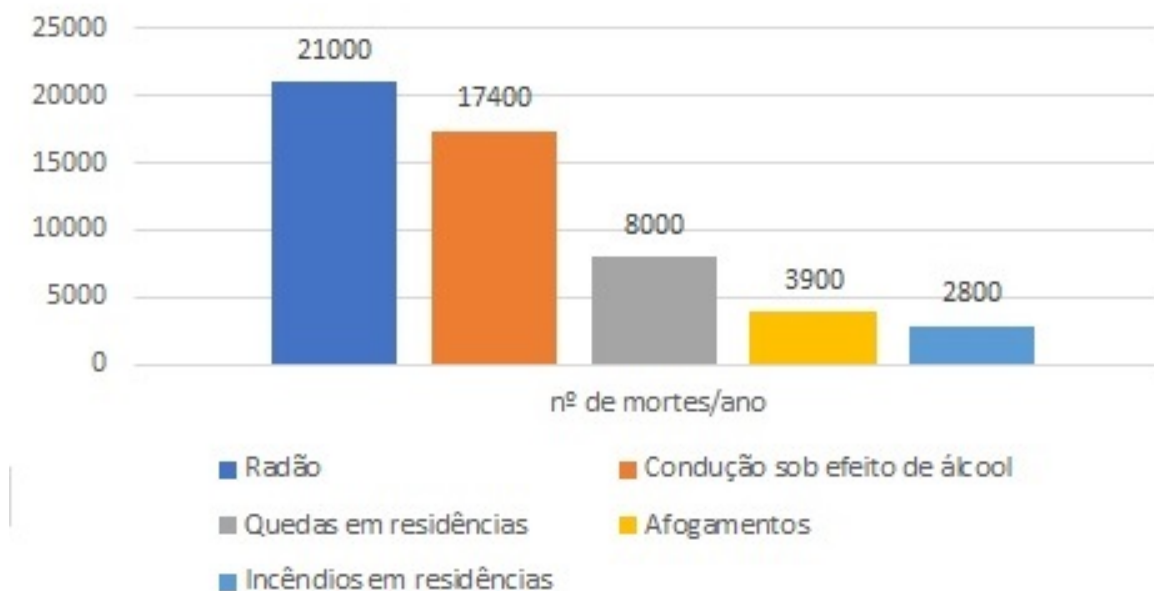


Figura 4.3: Principais causas de morte nos EUA.
Fonte: [Age12].

4.2 Aplicações do radão e dos seus descendentes

Embora o radão seja mais conhecido como cancerígeno, os seus descendentes são frequentemente utilizados para estudar diversos acontecimentos atmosféricos que ocorrem no meio ambiente. Sendo o radão quimicamente inerte, não desaparece no meio ambiente por meios químicos. Devido ao seu decaimento radioativo, o radão constitui a fonte primária da maioria dos radioisótopos ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{210}Pb , ^{210}Bi e ^{210}Po existentes na atmosfera. Estes descendentes de radão têm sido aplicados em estudos relacionados, por exemplo: a) a movimentos e estabilidades das massas de ar, processo de adesão e tempo de permanência dos aerossóis na atmosfera; b) identificação de depósitos superficiais e subterrâneos de hidrocarbonetos e urânio; c) previsão de terremotos; d) datação de água subterrânea e água meteórica infiltrada de no solo; e) condutividade elétrica na atmosfera [Bas16].

- **Aplicação do radão em estudos dos movimentos e estabilidades das massas de ar:**

A concentração do radão varia em cada região e esta variação está relacionada não só com as taxas de exalação do radão da superfície do solo, mas também com as condições meteorológicas e principalmente com os fenómenos de transporte horizontal e vertical das massas de ar atmosférico. Após o decaimento radioativo do radão, os seus descendentes (metais pesados) convertem-se em iões livres e depositam-se nos aerossóis no ar, tornando-os radioativos. Desta forma, o radão fornece indicadores sobre a origem das massas de ar na atmosfera, através da energia de 6.0 MeV emitida pelo ^{218}Po (carregado positivamente), que lhe transmite uma velocidade maior do que a velocidade das moléculas do gás atmosférico, sendo que esta velocidade se anula quando a energia do ^{218}Po for igual à do ar atmosférico, após o que este isótopo é depositado nos aerossóis atmosféricos [YHMY15, MAAB16].

- **Identificação de depósitos superficiais e subterrâneos de hidrocarbonetos e depósitos urânio:**

A aplicação do radão inclui também a prospeção de urânio e hidrocarbonetos. Estudos já realizados, indicam uma forte correlação entre as áreas de produção de hidrocarbonetos e as intensidades dos sinais de radão. Esta relação foi observada em diferentes estruturas geológicas de exploração de hidrocarbonetos, onde foram verificados níveis elevados de exalação de radão a partir do solo [FFA+16].

Muitos depósitos de urânio estão localizados ao longo de falhas, a partir das quais o radão pode facilmente escapar para o exterior. Como consequência, estas falhas podem constituir num indicador para a identificação de fontes de urânio. Quando o movimento do radão se realiza apenas por difusão, a partir dos dados da distância média da sua difusão no solo, é expectável a existência de rochas enriquecidas em urânio numa distância não superior a 10 metros da superfície. No entanto, as limitações na utilização do radão como instrumento de prospeção de urânio estão relacionadas com as mudanças sazonais de temperatura, pressão atmosférica e, também, pela humidade do solo. As variações destes elementos climáticos afetam o alcance do movimento do radão e, consequentemente, aumentam a complexidade na interpretação dos dados [FMC82].

- **Aplicação do radão em previsão de terremotos:**

A previsão eficiente de terremotos poderia, provavelmente, ajudar a reduzir significativamente o número de vítimas. Desde a década de 1970, um número crescente de cientistas começou a investigar precursores de terremotos com o objetivo final de prever fortes terremotos com precisão suficiente. Devido à propriedade de não adsorção, dissolução ou precipitação, a variação

da atividade do radão, no solo e na água subterrânea, fornece dados acerca de atividades sísmicas na crosta terrestre e, permite também, a obtenção de indicadores acerca do processo de formação do terramoto. Vários estudos permitiram observar que, se numa determinada região não existirem indícios de atividades vulcânicas ou sísmicas na superfície ambiental, é expectável que a taxa de exalação de radão se mantenha relativamente constante. Por exemplo, as elevadas taxas de emanação de radão em algumas áreas do Japão e no anel de fogo ($2.70 \text{ Bq cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) estão relacionadas com os inúmeros micro e macro terremotos ($> 70\%$ do total de terremotos que ocorrem no mundo) e são responsáveis pelos altos níveis de exalação de radão para a atmosfera naquela região [Fri12, CKA09, YIT+05].

- **Datação de água subterrânea e água meteórica infiltrada no solo:**

A razão radão/hélio tem sido utilizada não só em estudos relacionados com a previsão de terremotos, mas também para a datação da água subterrânea. O hélio é um gás nobre estável que não sofre precipitação, por isso, não é removido, nem desaparece da água subterrânea através da interação entre a água e a rocha. Assim, a concentração do hélio é acumulada na água subterrânea ao longo do tempo. Por outro lado, a presença do radão na água subterrânea está relacionada com a sua meia-vida, desta forma, quando a atividade do radão for constante, através da razão $^{222}\text{Rn}/^4\text{He}$ pode-se calcular a datação, I , em anos, da água subterrânea usando a equação [AGDY06, Tor80]:

$$I = (E_{Rn}/E_{He}) \times (A_{Rn}/A_{He}) \times (C_4/A_{222}) \quad (4.1)$$

onde E_{Rn}/E_{He} é a razão das taxas de exalação de radão e hélio libertado da matriz do aquífero para a água subterrânea, A_{Rn}/A_{He} representa a razão de taxa de acumulação do ^{222}Rn e do ^4He , C_4 é a concentração de hélio em átomos/litro, A_{222} é a atividade do radão em átomos/(litro \times ano) na água subterrânea.

A diferença do teor de radão existente na água subterrânea e na água superficial permite a datação de água meteorítica infiltrada no solo num determinado período. Esta técnica baseia-se na suposição de que, o fluxo de água transportada, flui através de meios porosos, onde a taxa de emanação do radão no solo, é relativamente uniforme. Devido à existência de maior quantidade de radão na água subterrânea, em relação à água superficial, uma certa quantidade de radão, existente nos poros do solo e na água subterrânea, entra em contacto com a água meteórica infiltrada no solo. Assim, a atividade do radão na água meteórica infiltrada no solo, aumenta até ser alcançado o equilíbrio radioativo com a água subterrânea existente no solo, e é possível determinar, aí, o tempo de existência da água meteorítica [SS97].

- **Condutividade elétrica na atmosfera:**

A condutividade elétrica do ar atmosférico, acima de 2 km de altitude, deve-se principalmente aos raios cósmicos. Porém, no interior da terra, a principal fonte de ionização é a radiação nuclear emitida por isótopos radioativos existentes na crosta terrestre. O radão e os seus descendentes de curta meia-vida são importantes no estudo da eletricidade atmosférica, não apenas pelo seu papel significativo na produção de pares de iões na baixa atmosfera mas, também, pela sua aplicação como traçadores atmosféricos. A condutividade elétrica na troposfera deve-se, principalmente, ao movimento dos iões produzidos pelos descendentes do radão (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po), que são partículas carregadas eletricamente e quimicamente ativas. Portanto, a condutividade elétrica na atmosfera depende não só dos descendentes do radão, mas também

está relacionada com as concentrações de aerossóis atmosféricos e com as condições meteorológicas [Wil90].

4.3 Emissão e transporte do radão

O radão está presente, em concentrações variáveis nas rochas, no solo e na água subterrânea. As zonas graníticas são tidas como aquelas que apresentam concentrações mais elevadas de urânio, assim, é expectável que quanto maior for a concentração do urânio no trato geológico de uma determinada região, tanto maior é o seu potencial em produzir o gás radão [LMP+17].

A emissão do radão ocorre quando o radão é gerado a partir do decaimento do ^{226}Ra dos grãos sólidos do solo, sendo que uma fração do radão escapa para os poros interligados do solo até atingir a atmosfera. A razão entre o número de átomos de radão libertados da rocha e o número de átomos de radão exalados para a atmosfera é conhecida como potencial de emissão [SGO04, Has14]. A posição inicial do radão na rocha e a direção do seu movimento determinam a emissão do radão (3) ou a não emissão do radão (1 e 2), figura 4.4 [SIY11, SGO7].

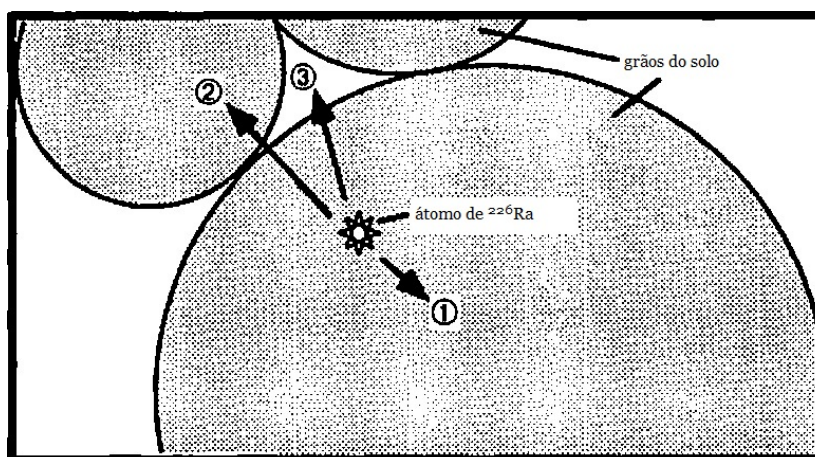


Figura 4.4: O diagrama esquemático ilustra três casos possíveis resultantes do decaimento do ^{226}Ra : 1) o átomo de radão recém-formado está embutido no grão do solo original; 2) o átomo de radão está embutido em um grão do solo adjacente; 3) o átomo de radão é ejetado para um poro do solo. Adaptada de [SGO7].

A emissão do radão é fortemente influenciada pelos elementos do clima como a temperatura, a pressão e pela humidade no solo. O coeficiente de difusão do radão na água é, como indicado na tabela 4.2, da ordem de $10^{-5}\text{cm}^2\text{ s}^{-1}$, e, devido a esta propriedade física, a humidade constitui um elemento determinante para a emissão do radão no solo. Assim sendo, se a humidade do solo for elevada, corresponderá a valores mais baixos de emissão. Por outro lado, quanto maior for a temperatura e a pressão, maior será a quantidade de átomos de radão libertados do solo. Portanto, as variações sazonais destes fatores climáticos fazem com que a concentração do gás radão na atmosfera, ao longo do tempo, seja variável de uma região para outra [Bas16].

A concentração de radão no solo aumenta com a profundidade, enquanto na superfície da terra diminui com a altitude. Devido à sua grande mobilidade, o movimento do radão para a superfície ocorre devido aos gradientes de difusão molecular e de pressão. O transporte e a exalação do radão da rocha para a superfície ocorre através da porosidade e dos espaços livres existentes entre as rochas [LR85].

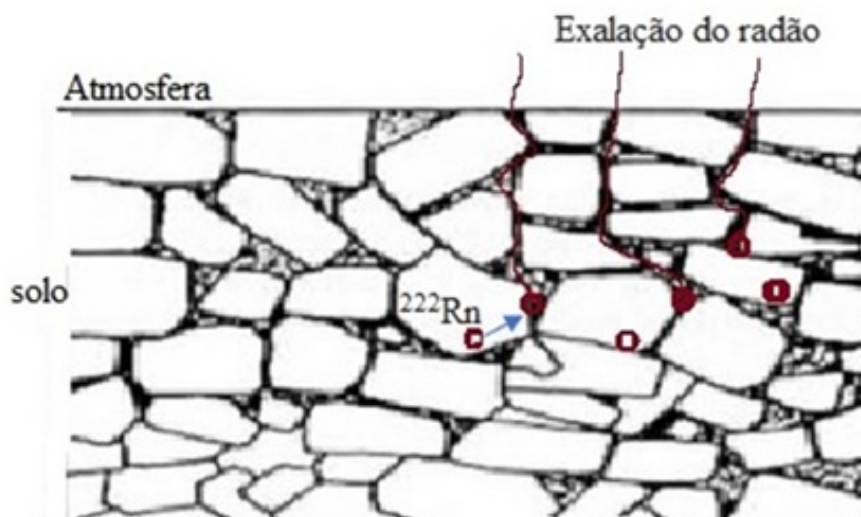


Figura 4.5: Transporte e exalação do radão.
Adaptada de [Sub19].

A densidade de fluxo do radão por difusão, do solo para a superfície, resultante do movimento aleatório molecular, é descrito pela lei de Fick, segundo a qual: a densidade de fluxo do radão é linearmente proporcional ao gradiente da sua concentração. A densidade de fluxo do radão no solo, j^d , representada pela equação 4.2, devido ao grau de fracturação e da porosidade do solo, é menor comparada com a sua densidade em meios homogêneos, como por exemplo no ar puro. devido ao grau de fracturação e da porosidade do solo. [BCC⁺01].

$$j^d = -D_m \nabla C \quad (4.2)$$

onde j^d é a densidade de fluxo do radão, D_m é o coeficiente de difusão molecular cuja unidade S.I. é ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), $-\nabla C$ é o gradiente da atividade da concentração de radão (Bq m^{-1}). O sinal negativo na equação, significa que a difusão ocorre de regiões com alta concentração de radão para locais com baixa concentração de radão.

O transporte do radão no solo ocorre predominantemente por difusão molecular, sendo que a velocidade de propagação do radão para a superfície é influenciada pelas seguintes características do solo (figura 4.6):

- **Permeabilidade** – A existência de poros interligados nas rochas facilita o movimento do radão;
- **Granulometria** (textura e estrutura dos sedimentos) – Granulometrias mais finas são mais impermeáveis. O radão move-se com mais velocidade em solos permeáveis como por exemplo em areia grossa, cascalho, mas desloca-se com menos velocidade em solos argilosos;
- **Grau de fracturação e configuração das fendas** – As fraturas em qualquer solo permitem um movimento mais rápido do radão [Ott92].

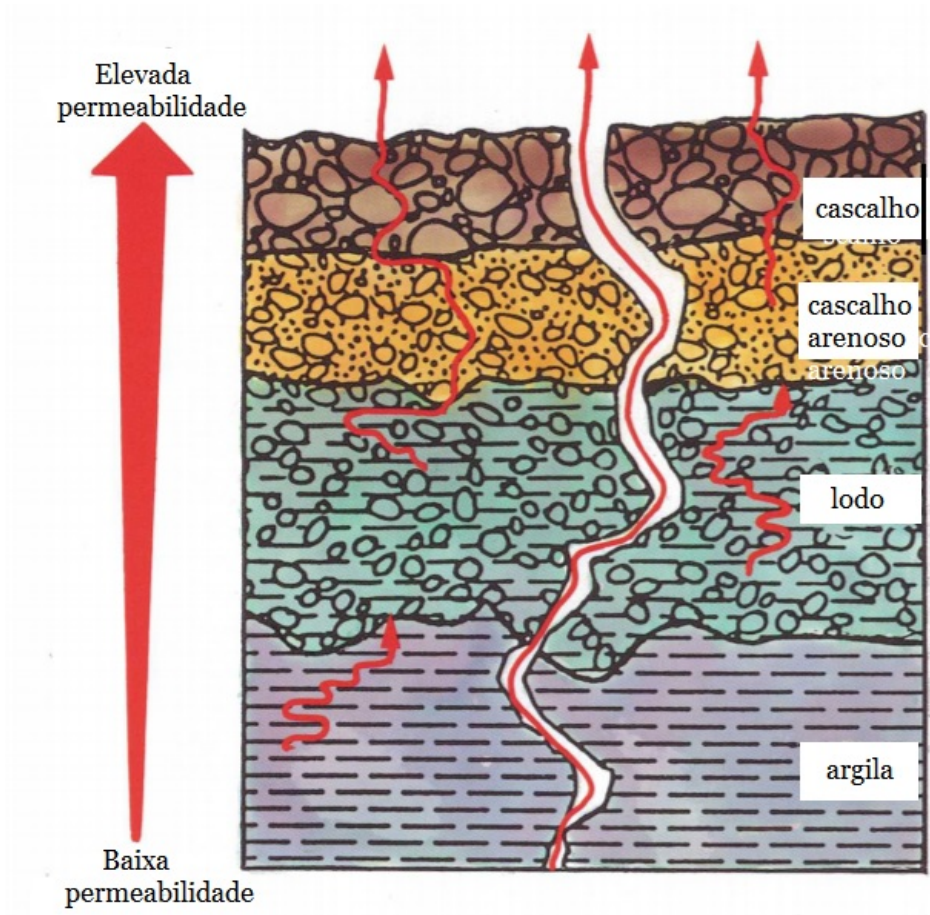


Figura 4.6: A mobilidade do radão é maior em solos de elevada permeabilidade, devido a existência de poros interligados e de rochas fraturadas. Adaptada de [Ott92] .

4.4 O radão no ar interior

A entrada do radão nos edifícios ocorre mais frequentemente através de zonas de contacto com o solo, devido à existência de fissuras na fundação ou de juntas de canalização mal vedadas. Por outro lado, se a água utilizada no edifício for originária de uma fonte subterrânea, o radão presente na água entra através do abastecimento, aumentando a sua concentração no interior, ao ser libertado da água durante a sua utilização para fins domésticos, figura 4.7. Embora em menor proporção, os materiais de construção contribuem para o aumento dos níveis de radiação gama no interior e às vezes, também, de radão, com maior incidência para aqueles materiais feitos com rochas graníticas e que são utilizados para ornamentação [SMPO3, Abb17].

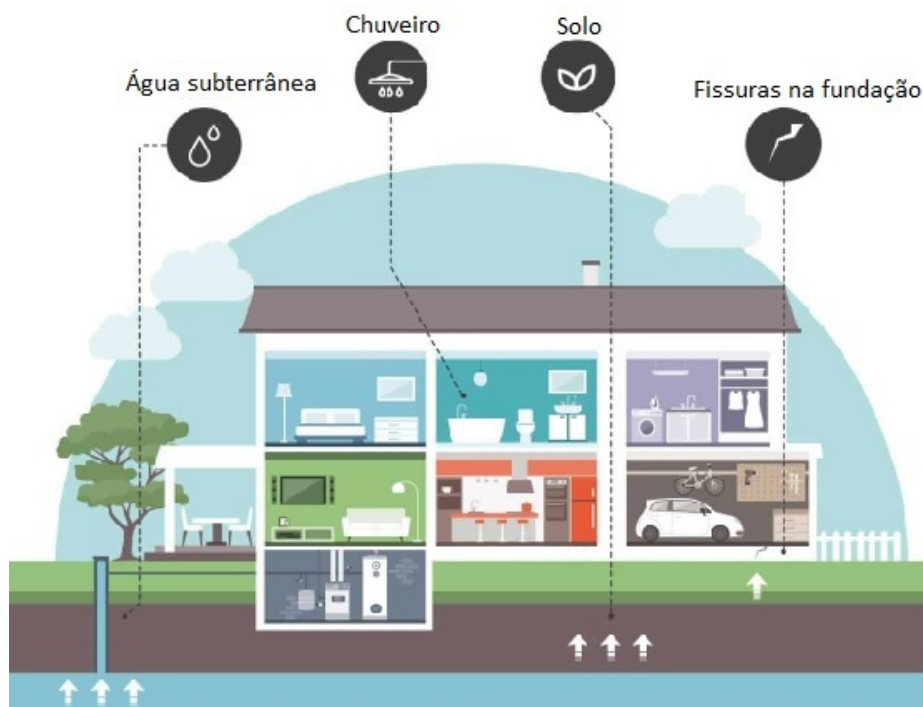


Figura 4.7: Entrada do radão no interior de edifícios.
Adaptada de [MM88].

4.5 O radão na água

A água constitui um recurso valioso e fundamental para a vida na terra, a sua importância vai desde o consumo doméstico, à agricultura e até para fins industriais. Por este facto, a criação de várias fontes de água superficiais, a descoberta de novas fontes de água subterrâneas (lençóis subterrâneos), bem como a melhoria da sua qualidade têm sido um desafio, tornando-se, deste modo, num assunto de interesse público. Em muitos países a água subterrânea constitui a principal fonte de água potável para consumo e para utilização nas atividades domésticas da população, pois, tem-se a ideia de que a água proveniente do solo é mais limpa e fácil de ser tratada em comparação com a água superficial por esta estar em contacto direto com poluentes atmosféricos (microrganismos e matéria inorgânica), por isso, inúmeros poços têm sido perfurados em várias regiões. Porém, a água subterrânea pode também ser poluída através da radioatividade natural proveniente da estrutura geológica local, sendo o radão um dos potenciais poluentes da água subterrânea. Esta, proveniente de aquíferos onde há maior presença de rochas graníticas ricas em urânio possui concentrações mais elevadas de radão do que a água superficial na mesma região, uma vez que a maior parte do radão contido na água superficial é libertado para a atmosfera [Haro7].

O radão na água é originário de duas vias principais, uma pelo decaimento da quantidade de ^{226}Ra nela contido (em solução) e outra, através da sua exalação direta proveniente do decaimento do ^{226}Ra presente na estrutura sólida do aquífero. Assim, a concentração de radão na água subterrânea é influenciada pela quantidade de ^{238}U existente na matriz mineral que compõe a estrutura sólida do aquífero, pela taxa de emanação do radão da rocha, pela porosidade e pela permeabilidade do aquífero [JAM⁺17].

A elevada concentração de radão dissolvido na água de consumo público, segundo a OMS, constitui um risco para a saúde devido ao facto de o gás libertado da água contribuir para a elevação da concen-

tração total de radão em espaços fechados, e, no caso dessa água ser ingerida, constituir um potencial causador de cancro do estômago. De acordo com o relatório da US-EPA, no ano de 1999 a concentração de radão na água potável foi responsável por 168 mortes, sendo que 89% das mortes foi devido ao cancro de pulmão causado pela concentração de radão no interior de habitações, libertado da água utilizada durante o banho, na lavandaria, no autoclismo e na lavagem de loiça; e 11% das mortes registadas deveu-se ao cancro do estômago por ingestão de água contendo elevada concentração de radão [C⁺99, App13].

4.6 Legislação aplicável

As organizações internacionais de proteção radiológica têm deliberado diretivas acerca dos limites de concentração de radão no ar interior e na água potável consumida pela população. Os níveis de referência estabelecidos pelas diferentes organizações, não especificam uma fronteira rígida entre o nível seguro e o nível que constitui perigo, mas definem um nível de risco que é considerado o mais seguro para a saúde.

- A OMS recomenda que o valor seja mantido abaixo de 100 Bq m^{-3} para a concentração máxima de radão em ambientes fechados e 100 Bq L^{-1} o limite recomendado para a água potável. Recomenda ainda que, em regiões com características geológicas específicas onde, por exemplo, a radioatividade natural é elevada, e que por isso os valores anteriormente recomendados nem sempre podem ser cumpridos, o limite do radão no interior não deva ultrapassar os 300 Bq m^{-3} [O⁺09].
- A US-EPA recomenda adoção de medida para a redução do radão no interior para níveis superiores a 4 pCi L^{-1} (148 Bq m^{-3}) e o nível máximo de concentração de 11.1 Bq L^{-1} na água de consumo público. O valor de 11.1 Bq L^{-1} (300 pCi L^{-1}) refere-se a um limite máximo de concentração, mas tendo em conta o risco de inalação, ou seja, considerando a proporção que será transferida da água para o ar interior. Para a ingestão, nos Estados Unidos, o nível máximo de concentração (MCL) para o radão é de 150 Bq L^{-1} [EPA99, Age12]. Baseada em resultados experimentais, a US-EPA em 1995, estimou que de um total de 157.400 mortes por cancro de pulmão, em toda América do Norte, cerca de 21.100 (13.4%) estavam relacionadas com a exposição a elevados níveis de radão. Embora não seja possível eliminar totalmente o radão do ar, estima-se que cerca de um quarto da população com cancro de pulmão, devido ao radão, poderia ser evitado através da redução das concentrações de radão em edifícios que excedam os 4 pCi L^{-1} , o limite recomendado [Age12, C⁺99].
- A diretiva 59 da EURATOM de 2013 recomenda que a concentração de radão no ar interior não ultrapasse o limite de 300 Bq m^{-3} , e a diretiva 2013/51/EURATOM define que na água potável a concentração de radão deve ser inferior a 100 Bq L^{-1} , definindo o limite de 1000 Bq L^{-1} como sendo o valor a partir do qual a água deve merecer intervenção, para a redução da concentração de radão, antes de ser consumida. A EURATOM recomenda, que os Estados-Membros devem garantir a realização de pesquisas representativas para determinar a escala e a natureza das prováveis exposições ao radão na água destinada ao consumo público, provenientes de diferentes fontes de águas subterrâneas e poços em diferentes áreas geológicas. Os inquéritos devem ser concebidos de modo a que os parâmetros subjacentes, e especialmente a geologia e hidrologia da área, a radioatividade da rocha ou solo e o tipo de poço, podem ser identificados e usados para direcionar ações adicionais para áreas onde a exposição é, provavelmente, elevada. A monitorização das concentrações de radão deve ser realizada quando houver motivos para acreditar, com base nos resultados das pesquisas representativas ou em outras informações confiáveis, que o valor paramétrico estabelecido de 100 Bq L^{-1} , pode ser excedido [Dir13, bREcm015].

4.7 A problemática do radão em alguns países

4.7.1 A situação do radão em Portugal e em outros países

Em Portugal está em vigor o Decreto-Lei 108/2018 de 3 de dezembro, que resulta da transposição da Diretiva da EURATOM 5a/2013, que estabelece o regime jurídico de proteção radiológica, bem como as atribuições de uma autoridade competente e de uma autoridade inspetiva para a proteção dos efeitos biológicos das radiações ionizantes. Uma das atribuições da referida autoridade consiste na avaliação da pertinência de modificação dos níveis de referência da concentração de radão em habitações, bem como em edifícios com elevados fatores de ocupação pelo público, locais de trabalho e na água de consumo público [dCdM]. É de notar que, nos Açores, a legislação regional fixa como limite do radão no interior de edifícios a concentração de 150 Bq m^{-3} [SFVA14].

Em várias regiões de Portugal têm sido realizados estudos relacionados com a concentração do radão na água e no ar, cujos resultados apresentam valores variáveis dependendo das características geológicas de cada região. As medições da concentração de radão no ar e na água potável realizadas em algumas zonas exibem valores acima dos limites recomendados pelas organizações internacionais de proteção radiológica, enquanto que em outras o nível de radão, no ar e na água, está abaixo dos limites estabelecidos [FTB92, PLM⁺17].

Por exemplo, num estudo realizado em 2010 na região de Amarante, distrito do Porto, foram encontrados valores de radão no ar interior e na água, superiores aos limites recomendados pela União Europeia e OMS, assim sendo, das 73 habitações estudadas 35 apresentavam valores superiores a 400 Bq m^{-3} , e 6 amostras de água, das 15 recolhidas, apresentavam valores de radão superiores a 1000 Bq L^{-1} [MGNP10]. A avaliação da radioatividade natural de água subterrânea em terrenos cristalinos na região de Ponte de Lima (Viana de Castelo), mostrou que a atividade média de radão na água subterrânea, analisada em 41 amostras, era de 239.63 Bq L^{-1} , sendo que, o valor mínimo encontrado foi de 9 Bq L^{-1} e o valor máximo 1164 Bq L^{-1} [dSM10]. No concelho de Barcelos, distrito de Braga, foi realizado um estudo de avaliação da concentração de radão em 10 moradias graníticas, das quais em alguns compartimentos foram encontrados valores acima de 400 Bq m^{-3} [Car17]. Um outro estudo realizado consistiu na avaliação da concentração de radão na água mineral natural em 17 estabelecimentos termais portugueses, sendo que os valores obtidos apresentaram concentrações de radão que variavam entre 0.1 e 6949 Bq L^{-1} com uma média geométrica de 175 Bq L^{-1} e média aritmética de 842 Bq L^{-1} . Das 54 amostras recolhidas, 27 amostras apresentavam valores de concentração de radão superiores a 100 Bq L^{-1} , o nível de referência recomendado pela União Europeia [SD16].

A avaliação da concentração de radão na água subterrânea e superficial tem sido feita também em vários outros países dos diferentes continentes. A partir dos resultados encontrados na bibliografia consultada e apresentados na tabela 4.3, pode observar-se que as concentrações de radão na água vão desde valores menores que 1 Bq L^{-1} e podem atingir valores superiores a 1000 Bq L^{-1} .

Tabela 4.3: Valores da concentração de radão na água em diferentes países.

Pais/região	Concentração de ^{222}Rn [Bq L⁻¹]/(mín - máx)	Referência
Brasil/Santos	0.95 – 36	[MdSG04]
Coreia do Sul/Busan	0 – 300	[CAKLo4]
Índia/Tumkur	2.96 – 299.06	[SRS14]
Polónia/região sul	0.42 – 10.52	[BPS ⁺ 14]
China/Beijing	7.48 – 49	[WMC ⁺ 14]
Hungria/região nordeste	100 – 350	[KSBF00]
Venezuela/região norte	1 – 560	[HBU ⁺ 00]
Romênia/Transylvania	0.5 – 129.3	[CMDKo8]
Suécia/Söderåsen	12 - 700	[EJJo1]
México/Aldama, Chihuahua	4.3 - 42	[SCV ⁺ 04]
EUA/Costa do Golfo do Texas	7 - 122.1	[CLKP88]
Portugal/Covilhã	2 – 1340	[ISA17]

4.7.2 A situação do radão em alguns países africanos

A água que é consumida pela maioria da população em África, tem a sua origem em poços de grande diâmetro e através de furos verticais que podem atingir profundidades de até várias dezenas de metros. Em muitos casos, água é imediatamente consumida sem antes passar por um processo de tratamento para a remoção de poluentes orgânicos e radioativos, que nela possam estar presentes. Em alguns países, foram realizados estudos de avaliação da radioatividade natural na água, particularmente a medição da concentração de radão na água subterrânea que a população consome diariamente.

Um desses estudos foi realizado na região de Ririwai, na Nigéria, e nas comunidades circunvizinhas onde foram determinadas as concentrações de radão na água superficial e subterrânea usando análise de cintilação líquida (L.S.A). O resultado obtido, do referido estudo, mostra que a água usada para fins domésticos (torneiras e poços cavados à mão) apresentava uma concentração média de 2.23 Bq L⁻¹, valor que está abaixo dos limites recomendados pela OMS (100 Bq L⁻¹) e pela US-EPA (11.1 Bq L⁻¹), sendo este último o limite adotado pela Organização Padrão de Proteção Radiológica da Nigéria. Um outro estudo semelhante, foi realizado na Africa do Sul, nos rios da região de Gauteng, onde foram recolhidas amostras de água e analisadas as concentrações de radão presente, através do equipamento RAD7 da Durridge. Do referido estudo, em todas as amostras analisadas, os resultados da concentração de radão apresentavam valores menores do que os limites recomendados pela US-EPA e OMS [ZNAA15, MMC17].

Em Angola foi aprovada, pela Assembleia do Parlamento Nacional, a Lei da Energia Atómica e Nuclear, LEI N.º 04/07 de 5 de Setembro, na qual o Artigo 6º refere que o estado tem obrigações de adotar medidas que visam proteger a população sobre os efeitos das radiações ionizantes:

1. Estabelecer medidas jurídicas e administrativas necessárias à proteção e segurança do público e do meio ambiente relativamente à atividades que envolvem a utilização de radiações ionizantes;
2. Promover atividades de investigação científica relacionadas com as aplicações pacíficas das radiações ionizantes, o seu impacto na saúde e na agricultura, bem como apoiar a participação de instituições e cientistas angolanos em projetos de âmbito internacional [MdCeTo7].

Embora exista em Angola uma lei que visa a proteção da população dos efeitos nocivos das radiações, a referida lei não faz nenhuma referência particular à medição das concentrações do radão no meio ambiente. E, tanto quanto se sabe, não existem em Angola medições feitas das concentrações de radão na água de consumo público, o que torna este trabalho ainda mais importante.

Capítulo 5

Técnicas para a medição do radão e medidas de mitigação no ar e na água

O radão é um gás nobre e, como já foi dito, isto significa que não reage quimicamente de modo que, ao misturar-se com o ar que inalamos, não é detetável pelos nossos sentidos. Para se conhecer e avaliar a sua presença é necessário recorrer a processos nucleares resultantes da interação da radiação ionizante emitida pelo radão e pelos seus descendentes, com um meio sensível a essa radiação. Para a medição do radão e dos seus descendentes no ar e na água, existem disponíveis diversas técnicas, utilizando diferentes equipamentos, sendo que cada técnica apresenta vantagens e desvantagens. A escolha da técnica apropriada a ser utilizada para a medição do radão deve ser baseada na viabilidade, precisão, tempo e custo da medição. Muitas vezes pretende-se conhecer a exposição do radão ao longo do tempo, porém, outras vezes, deseja-se fazer um diagnóstico acerca da presença do radão num determinado local. De acordo com o procedimento de medição, os métodos utilizados para a medir a concentração do radão são divididos em duas categorias: a) métodos ativos e b) métodos passivos [Milo4].

1. **Métodos ativos:** os detetores ativos para a medição de radão, são dispositivos eletrônicos que realizam medições instantâneas de radão e dos seus descendentes no ar, no solo e na água. A principal vantagem deste tipo de detetor é permitir a monitorização do radão a curto prazo, fornecendo os resultados diretamente ao utilizador sem ser necessário enviar os mesmos dados para um laboratório de análise de radão, sendo, por este motivo, mais utilizados para diagnosticar a existência de radão num determinado local.
2. **Métodos passivos:** o princípio de funcionamento dos detetores passivos baseia-se na diferença de absorção e permeabilidade do radão e dos seus descendentes em diferentes materiais através da exposição do detetor, num local de interesse, sem, no entanto, precisar de energia para o seu funcionamento. Os detetores passivos são utilizados para a obtenção do valor médio da concentração de radão no interior de edifícios num período determinado relativamente longo. O tempo de exposição do detetor no local da medição é variável, dependendo do tipo de detetor. Este é um método muito mais fiável.

5.1 Medição do radão no ar

A principal fonte de radão no ar deve-se ao decaimento do ^{226}Ra presente no solo do local e, também no interior de edifícios. Contudo, os materiais de construção utilizados podem igualmente contribuir para o aumento da concentração de radão, em ambientes fechados. A medição do radão no ar interior tem sido atualmente realizada usando diferentes tipos de detetores como por exemplo, detetores de estado sólido, detetores de traços, cintiladores, eletretos, detetores de carvão ativado e câmaras de ionização.

5.1.1 Detetores ativos de estado sólido

Os detetores de estado sólido são reconhecidos pelo seu potencial na resposta às energias emitidas pelas partículas alfa e por permitirem o desenvolvimento de métodos simples e quantitativos para a medição do radão. Este tipo de detetor consiste num material semiconductor que converte a radiação alfa diretamente em sinais elétricos. Uma das principais vantagens dos detetores de estado sólido é possibilitar a determinação eletrónica da energia de cada partícula, o que permite identificar os isótopos do polónio (^{218}Po e ^{214}Po) produzidos pelo decaimento do radão. Através da medição das energias das partículas emitidas pelos descendentes do radão, os detetores de estado sólido têm a capacidade de distinguir o radão novo, que resulta do ^{218}Po , do radão velho, bem como, o sinal elétrico do ruído [NI99].

Os detetores de estado sólido mais utilizados são os detetores de Germânio de alta pureza (HPGe) e os detetores de Silício. Os detetores HPGe são os mais eficazes devido à sua elevada eficiência em análises qualitativa e quantitativa de amostras emissoras de radão através da radiação gama emitida pelo ^{214}Bi e pelo ^{214}Pb . Por outro lado, os detetores de Silício são mais utilizados pela sua eficácia na detenção de partículas alfa, por isso são frequentemente utilizados para desenvolver detetores de baixo custo para a medição do radão. O equipamento RAD7, que foi utilizado neste estudo, é um dos detetores de radão construído com base em semiconductor de Silício [TRO9].

5.1.2 Detetores de traços

A descoberta de traços produzidos pelas partículas alfa aconteceu em materiais de celulose (nitrato de celulose), porém mais tarde foram observados também em policarbonatos. Os detetores de traços nucleares baseados em policarbonatos consistem em filmes plásticos, especiais, encerrados numa câmara. As partículas alfa emitidas pelo radão e pelos seus descendentes, ao decaírem no interior da câmara, interagem com o filme plástico e gravam nele traços microscópicos permanentes que, depois de um tratamento químico adequado, permitem avaliar a concentração de radão no ar. Uma das principais vantagens dos detetores de traços é que as radiações beta e gama produzidas por outros radionuclídeos naturais e pela radiação cósmica não são gravadas no detetor [NI99].

Os detetores de traços CR-39 e LR-115 são os mais conhecidos para a medição de radão no ar, sendo, atualmente, o CR-39 o detetor mais utilizado para a medição do radão no interior. O detetor de traços LR-115, de cor avermelhada, é feito de nitrato de celulose e tem uma espessura típica que varia de 12 μm a 13 μm . O detetor de traços nucleares CR-39, figura 5.1 a), consiste num *chip* de PADC (*polyallyl diglycol carbonate*), de dimensões $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$. Estes detetores são colocados no interior de uma câmara de difusão, figura 5.1 b), construída com um plástico de alta condutividade elétrica, que atrai os descendentes do radão para a sua superfície, reduzindo a sua acumulação no detetor. Esta câmara tem uma superfície porosa que é permeável ao radão, evitando a entrada de poeiras e outras contaminações. As partículas alfa geradas a partir do decaimento do radão e de seus descendentes, no volume de ar da câmara, podem interagir com o filme CR-39, causando danos às ligações moleculares do polímero. Estes detetores devem ser expostos durante um período que vai de um mês a um ano. O tempo médio de exposição do detetor de traços CR-39 é de 60 dias [dCM07, BC12, EKC16].



Figura 5.1: a) Detetor passivo CR-39 b) Câmara de difusão.

Após o tempo de exposição recomendado, os detetores são submetidos a um tratamento químico que designamos por revelação. No processo de revelação é utilizada uma solução de NaOH a uma temperatura constante de 90 °C, durante 4 horas, para que seja feito o alargamento químico do diâmetro dos traços. Em seguida os detetores são lavados com água destilada e secos. Posteriormente, os detetores são analisados. No nosso laboratório é utilizado um equipamento eletrônico, *Radosys Radometer2000*, que possui um microscópio que permite analisar a densidade de traços por unidade de área, registados no detetor. Os resultados da concentração de radão são calculados com um software adequado, *Radosys Watch Dog* totalmente automatizado. Entre as vantagens da utilização do detetor passivo CR-39 pode-se destacar a sua elevada sensibilidade, claridade ótica e estabilidade face a diferentes condições ambientais [dCMo7, BC12].

5.1.3 Cintiladores

A deteção de radiação ionizante através da cintilação produzida em certos materiais constituídos por uma base plástica e transparente, sobre a qual é depositada uma emulsão fotográfica, é uma das técnicas mais antigas no campo da Física Nuclear, que continua até aos dias de hoje sendo uma das vias mais úteis, disponíveis, para deteção e espectroscopia de uma ampla variedade de elementos radioativos. Os cintiladores são detetores de radiação feitos com materiais orgânicos ou inorgânicos que emitem luz quando a radiação ionizante interage com eles. Os fótons produzidos nesta interação são posteriormente convertidos em sinal elétrico por um fotomultiplicador [Kno10]. O material de cintilação ideal deve possuir as seguintes propriedades:

1. O cintilador deve converter a energia cinética da radiação incidente em luz detetável com uma alta eficiência;
2. A conversão da energia em luz deve ser linear. O rendimento da luz deve ser proporcional à energia depositada em uma faixa tão ampla quanto possível;
3. Para uma boa recolha da luz, pelo fotomultiplicador, o meio deve ser transparente ao comprimento de onda da sua própria emissão;

4. O tempo de decaimento da luminescência induzida deve ser curto para que os pulsos de sinal rápidos possam ser gerados;
5. O material deve ser de boa qualidade ótica e sujeito a fabricação em tamanhos suficientemente grandes para ser de interesse, na utilização como um detetor;
6. O seu índice de refração deve estar próximo do índice de refração do vidro (1.5) para permitir o acoplamento eficiente da luz de cintilação a um tubo fotomultiplicador ou outro sensor de luz [Kno10].

Todavia, nenhum material cintilador possui simultaneamente todas estas características, por isso, a escolha de um cintilador específico é sempre influenciada pela avaliação que é feita a estas propriedades. Os cintiladores mais amplamente escolhidos incluem os cristais inorgânicos de halogenetos alcalinos, dos quais o iodeto de sódio é o mais utilizado, seguido dos líquidos e plásticos de base orgânica, sendo que os materiais orgânicos, embora sejam mais rápidos na resposta à radiação, são menos eficientes do que os cintiladores inorgânicos [Kno10].

Um dos instrumentos mais comuns para a deteção do radão no ar, baseado em cintiladores, é a célula de Lucas (figura 5.2), desenvolvida em 1957, em homenagem ao inventor Henry Lucas. O interior da célula de Lucas é revestido com sulfato de zinco ativado com prata (ZnS(Ag)). O ZnS (Ag) tem uma propriedade de cintilação de comprimento de onda máximo de 4500 Å com um tempo de decaimento de 5 segundos. Este detetor tem uma válvula que permitem a entrada do radão. Para a medição do radão no ar através da célula de Lucas, o volume de ar é mantido durante 3 horas numa câmara de acumulação até o radão entrar em equilíbrio secular com os seus descendentes, ^{218}Po , ^{214}Po , ^{214}Pb e ^{214}Bi [AAM04, SJRT14].

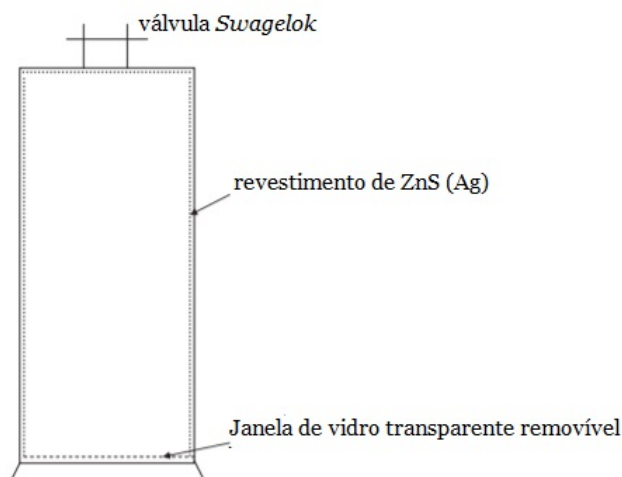


Figura 5.2: Diagrama esquemático da célula de Lucas.
Adaptada de [SJRT14].

O radão presente na célula de Lucas ao decair emite três partículas alfa a partir do decaimento do radão, do ^{218}Po e do ^{214}Po , e há também emissão de radiação gama pelo ^{214}Pb e ^{214}Bi que, depois de interagirem com o fósforo, produzem luz. A luz emitida é de seguida convertida em sinal elétrico pelo fotomultiplicador que, associado a outros equipamentos eletrónicos como o pré amplificador (PA) e o analisador multicanal (MCA) fornecem as contagens da concentração de radão no interior da câmara de acumulação. A radiação de fundo no interior da célula de Lucas aumenta com o número de vezes que é utilizada, pois é produzida uma quantidade enorme de ^{210}Pb que constitui uma fonte de contaminação do detetor. Por isso, para a obtenção de resultados mais fiáveis, é necessário a remoção

periódica da radiação de fundo utilizando gás nitrogénio (N₂) antes de se realizar cada medição de radão.

Os cintiladores estão sujeitos a danos quando expostos por períodos prolongados a elevados fluxos de radiação. O dano do cintilador é evidenciado quando se verifica uma redução na emissão de fótons e a interferências no processo que origina a emissão da luz, provocada pela criação de centros de cores que absorvem a luz. Além disso, a exposição dos cintiladores inorgânicos à radiação, por um período prolongado, provoca também a indução de emissão de luz de longa duração na forma de fosforescência, que pode influenciar os resultados das medições. Os efeitos dos danos, provocados pela radiação, nos cintiladores estão associados essencialmente ao tempo de exposição e ao tipo de radiação envolvida nessa exposição [Zhu98]. No entanto, esses danos são parcialmente reversíveis, se os cintiladores forem expostos à temperatura ambiente, durante horas ou dias, num local com baixa radiação de fundo. Os danos em halogenetos alcalinos estão associados à presença de contaminação por oxigénio, que provocam a formação de espécies hidroxila. Por outro lado, nos cintiladores construídos com óxidos, o dano está relacionado com defeitos estruturais, como as lacunas de oxigénio na rede cristalina. Deste modo, devido à presença de muitas variáveis como, por exemplo, o tempo de exposição, tipo de radiação incidente, energia da radiação, a presença ou ausência de oxigénio ou outras impurezas, torna-se difícil quantificar a dose exata, de radiação expectável, para produzir danos mensuráveis nos cintiladores em circunstâncias específicas [Zhu98].

5.1.4 Detetores de carvão ativado

Detetores de carvão ativado são usados para a medição da concentração de radão em residências, de acordo com o protocolo US-EPA dos EUA 520/5-87-005. O carvão ativado é um material produzido com carbono, com porosidade capaz de absorver átomos de radão. Este tipo de carvão é obtido a partir da queima controlada, com baixo teor de oxigénio, de certas madeiras a uma temperatura de 350°C, tomando-se o devido cuidado para se evitar que ocorra a queima total do material de forma a manter a porosidade adequada. Os átomos de radão são absorvidos pelo carvão onde são retidos e, através da radiação gama emitida pelo ²¹⁴Bi e pelo ²¹⁴Pb, é feita a contagem do radão por espectrometria gama. A medição é realizada com detetores de iodeto de sódio ativado com tálio, NaI(Tl) ou através de detetores de germânio de alta pureza (HPGe), sendo a concentração da atividade do radão, em Bq m⁻³, calculada através da equação [PSZ⁺14]:

$$C_{Rn} = \frac{G - B}{tE_f C_f D_f} \quad (5.1)$$

onde G corresponde a contagens dos picos de energia emitidas pelos descendentes do radão, o ²¹⁴Pb (295 keV, 352 keV) e o ²¹⁴Bi (609 keV), expresso em contagens por minuto (cpm), B é a contagem das mesmas áreas para a radiação de fundo, t é o tempo de medição em minutos, E_f é a eficiência do detetor em cpm; C_f é o fator de calibração para taxa de adsorção do radão em L/min e D_f é o fator de decaimento do ponto médio da exposição até ao momento da contagem, em cpm/Bq.

Uma vez que os detetores passivos feitos de carvão ativados são expostos por um período de 2 a 7 dias, a sua utilização permite obter com precisão valores da concentração de radão no interior a curto prazo. No entanto, tendo em conta que a concentração de radão no interior varia consideravelmente em períodos relativamente longos (variação sazonal), a utilização do detetor passivo feito de carvão ativado fornece resultados pouco significativos quando se deseja fazer a medição do radão no interior a longo prazo [PSZ⁺14, ITMK05].

5.1.5 Câmaras de ionização

5.1.5.1 Câmara de ionização de eletreto

A aplicação de eletretos para medição de radiação ionizante tem sido investigada há muitos anos, mas o seu uso na medição do radão é relativamente recente. Nos últimos tempos foram desenvolvidos diversos detetores de radão com eletretos, o que prova a aceitação desta tecnologia no campo da dosimetria. O monitor de radão eletreto (comercialmente conhecido por E-PERM) é um detetor de radão integrado que consiste em uma pequena câmara com um disco de teflon, eletricamente carregado na parte inferior e uma entrada filtrada na parte superior, (figura 5.3) [KJ93].

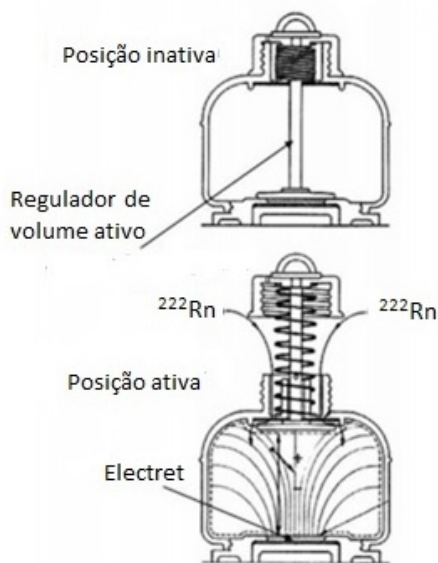


Figura 5.3: Representação esquemática de uma câmara de ionização de eletreto [KJ93].

O princípio de funcionamento do detetor eletreto consiste na medição da queda de potencial causada pelos iões produzidos no decaimento do radão no interior do volume ativo do detetor, depois de serem atraídos pelo campo elétrico nele produzido. O fator de calibração está relacionado com a tensão do ponto médio, que é simplesmente a média da leitura inicial e final da tensão do eletreto e é expresso em $\text{V}/(\text{Bq m}^{-3} \text{ d})$. A concentração de radão, em Bq m^{-3} , é calculada usando a equação [KJ93, KS10]:

$$C_{Rn} = \frac{I - J}{CF \times t} - BG \quad (5.2)$$

onde, I e J são as tensões inicial e final do eletreto, CF é o fator de calibração específico, t é o período de exposição em dias e BG é radiação gama de fundo.

Uma das principais vantagens da utilização do eletreto é o facto de este não ser afetado por elevados valores de humidade, o que o torna útil para medições ativa ou passiva de radão no ar, podendo ser também utilizado para a medição de radão dissolvido na água [KDS93].

5.1.5.2 Contador Geiger-Muller

Vários detetores de radiação, desde os mais antigos até aos mais usados atualmente, têm como base de funcionamento os efeitos produzidos quando uma partícula carregada passa através de um gás.

À medida que uma partícula carregada atravessa o gás, criam-se moléculas excitadas e moléculas ionizadas ao longo do seu caminho. A molécula ionizada forma um ião positivo e um eletrão livre que são chamados de par de iões, que constituem elementos fundamentais para a produção de sinal elétrico. Os iões podem ser produzidos pela interação direta das moléculas do gás com a radiação incidente ou por meio de um processo secundário no qual parte da energia da radiação é transferida em primeiro lugar para o eletrão mais energético. A câmara de ionização contém no seu interior um gás raro (Ar, Kr ou Xe) que possui afinidade eletrónica com iões e dois eléctrodos que produzem um campo eléctrico. Os eletrões e iões são atraídos para os eléctrodos e produzem um sinal eléctrico, (figura 5.4). O sinal eléctrico total pode ser obtido por todos os pares de iões presentes no interior da câmara, ou apenas pelos iões produzido por cada partícula alfa (5 MeV produzem aproximadamente 10^5 pares de iões- eletrões) [Kno10].

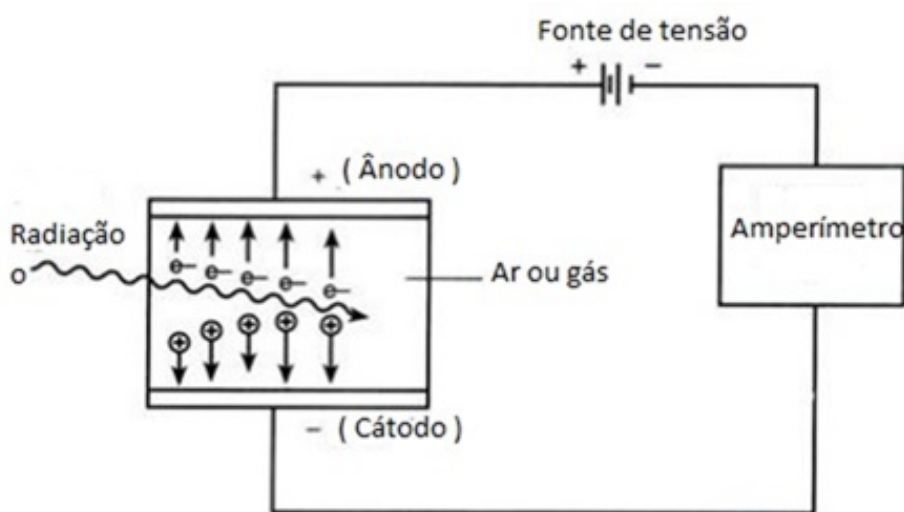


Figura 5.4: Câmara de ionização.
Adaptada de [Kum].

Uma das vantagens da câmara de ionização é permitir distinguir os sinais produzidos pelo radão e os pulsos produzidos pelos seus descendentes. O contador Geiger-Muller é o dispositivo mais conhecido cujo funcionamento se baseia numa câmara de ionização, que permite medir radiações alfa e beta. Quando o radão estiver em equilíbrio secular com os seus descendentes, a concentração de radão pode também ser determinada através da medição do decaimento beta dos isótopos, ^{214}Pb e ^{214}Bi , absorvidos usando filtros de papel específicos com densidade apropriada. A contagem da atividade beta pode ser feita através de cintiladores plásticos associados a tubos fotomultiplicadores, ou o filtro de papel pode ser associado diretamente a um contador Geiger-Muller com um filme absorvedor apropriado, como por exemplo o *Mylar* [Bas16].

5.2 Medidas para a remediação do radão no ar interior

A prevenção à entrada de radão e a sua remoção no interior de edifícios tem sido um assunto de interesse por parte de alguns arquitetos e engenheiros civis na construção de novos edifícios e na reabilitação de edifícios já existentes. É, obviamente, impossível a construção de edifícios completamente impermeáveis ao radão, contudo é possível planear a construção de edifícios com características especiais que permitem reduzir a penetração do radão no seu interior. Assim, as estratégias de mitigação de radão em edifícios baseiam-se na aplicação de diferentes técnicas [Hen94]:

- Selagem de superfícies que separam o espaço interno do edifício do solo sobre o qual foi construído, mediante a aplicação de barreiras ou membranas impermeáveis feitas de borracha, telas ou feltros betuminosos, capazes de impedir a exalação do radão, uma vez que, as infiltrações do radão, no interior do edifício, são essencialmente provenientes do solo e, devido a diferenças de pressão, entre o solo e o interior.
- Na construção e ornamentação do edifício deverão ser evitados os materiais fonte de radão como por exemplo as rochas graníticas.
- Aplicação de madeira como pavimento das habitações.
- Vedação de algumas fissuras existentes nas paredes do edifício que podem constituir formas de entrada do radão.
- Despressurização ativa do solo. Esta técnica consiste na colocação de um sistema de tubos que formam um ou mais pontos de sucção de radão, localizados numa camada de cascalho de elevada permeabilidade por baixo do piso de pavimentação do edifício.
- Manter as portas e janelas abertas para permitir maior ventilação dos compartimentos interiores.
- Nos pisos térreos, onde os níveis de radão são geralmente mais altos, devem ser feitas ventilação forçada em todos os compartimentos para permitir que haja troca de ar entre o interior e o exterior do edifício.

5.3 Técnicas para a medição do radão na água

A monitoração dos níveis de radão na água é de extrema importância para a proteção do público à exposição a radiação ionizante, daí que a OMS, a EURATOM e outras organizações internacionais, responsáveis pela proteção contra os efeitos nocivos da radiação, aconselhem a medição dos níveis de radão no interior das habitações e também na água, antes da sua utilização [O⁺09, Boc14]. Em função desta preocupação, vários estudos, sobre a medição dos níveis de radão em fontes de abastecimento de água para consumo público, têm sido realizados em várias regiões. Porém, a sua medição é uma tarefa bastante desafiadora, pois todo cuidado deve ser tido em conta para que o gás, dissolvido na água, não escape para o ar antes da medição. As técnicas mais utilizadas para a medição do radão na água são a espectrometria gama, espectrometria de partículas alfa e a cintilação líquida [STQ⁺95, VS13, RAB⁺04].

5.3.1 Espectrometria gama

Os acumuladores passivos de gás feitos de *polydimethylsiloxane* misturados com carvão ativado são utilizados, na medição de radão na água, devido à sua eficiência na absorção do radão dissolvido na água. Nestes compostos, as propriedades impermeáveis à água, do *polydimethylsiloxane*, atuam sinergicamente com as propriedades absorptivas do carvão ativado, mesmo quando os acumuladores são imersos em água por alguns dias. A medição do radão na água por espectrometria gama é feita através da radiação emitida pelo ²¹⁴Pb e ²¹⁴Bi, absorvidos pelo *polydimethylsiloxane*, assegurando que estes radionuclídeos se encontram em equilíbrio secular com o radão. A medição da concentração de radão é feita através de detetores de germânio de alta pureza (HPGe) ou detetores de iodeto de sódio NaI(Tl) através da radiação gama emitida pelo ²¹⁴Pb e ²¹⁴Bi [STQ⁺95, VS13].

5.3.2 Contagem por Cintilação líquida

A cintilação líquida é atualmente uma das técnicas mais usada para medir as concentrações de ^{222}Rn em águas subterrâneas. Esta técnica consiste na injeção de uma amostra de água num frasco contendo um cocktail cintilante à base de tolueno ou óleo mineral. A radiação beta e as partículas alfa emitidas pelo radão e seus descendentes são medidas usando um contador de cintilação líquida, figura 5.5. A eficiência de detecção de radão por cintilação líquida é extremamente elevada, aproximando-se de 100% [RAB⁺04, LHO6].

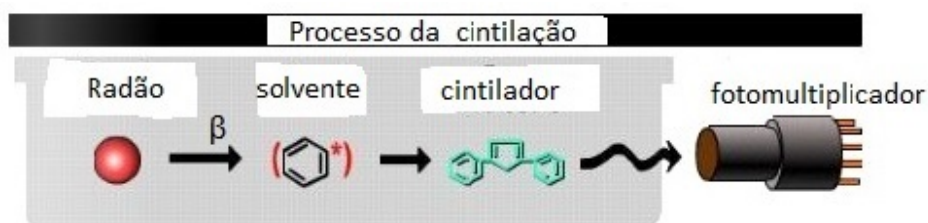


Figura 5.5: Processos da medição do radão por cintilação líquida.

Adaptada de: <https://www.yumpu.com/en/document/read/47432679/liquid-scintillation-counter>.

5.4 Medidas para a remoção do radão na água

Após mais de uma década de debate científico sobre o estabelecimento de um padrão para o radão na água de consumo público, foi promulgada a Emenda de 1996, conhecida como Lei da Água Potável Segura, que permitiu a EPA estabelecer limites de radão na água potável. Esta Emenda permitiu que muitos países desenvolvessem programas de mitigação e tratamento da água, com o objetivo de se reduzir o risco para a saúde, provocado por poluentes naturais ou antropogênicos, que podem estar contidos na água potável, incluindo o radão [HBD⁺00].

A presença do radão na água de consumo público não constitui preocupação quando a fonte é superficial. Porém, se a fonte for subterrânea, por exemplo, um poço privado ou um sistema público de abastecimento de água que tem a sua fonte subterrânea, torna-se recomendável a medição da concentração do radão antes da sua utilização. A mitigação da concentração de radão presente na água de consumo público é feita pelas seguintes técnicas básicas, através das quais, o radão presente na água potável pode ser removido com uma eficiência que pode ser de 90% [MGS04, Ves05, VTH⁺07]:

1. **Aeração** – na aeração forçada, o ar é libertado da água e é expelido para o exterior do reservatório. Esta técnica de remoção do radão é recomendável em centros de tratamento de água para abastecimento da população, pois, é dispendioso quando for utilizada simplesmente para o uso em habitações singulares.
2. **Filtração com carvão ativado** – esta técnica, de remoção do radão na água, consiste na retenção dos átomos do radão e dos seus descendentes pelo carvão ativado existente no interior do filtro. Devido à acumulação de radão e dos seus descendentes, no carbono ativado, os filtros convertem-se em fontes de radiação gama emitidas pelo ^{214}Pb e ^{214}Bi , por este motivo estes filtros devem ser instalados no exterior da habitação. Dependendo da concentração de radão na água o carbono, dentro do filtro, tem de ser trocado a cada 2 ou 3 anos.
3. **Aquecimento** – sendo o radão um gás, é expectável que seja menos solúvel na água quando a temperatura é elevada. No caso da concentração de radão na água potável ser relativamente

baixa, para a sua eliminação, é aplicada uma outra medida mais simples, que consiste em retardar a utilização da água, até que, a maior parte do radão, nela presente, decaia.

Capítulo 6

Avaliação dosimétrica populacional da concentração de radão na água do município da Bibala

6.1 Caracterização geográfica da região de estudo

6.1.1 Localização e clima

O município da Bibala está localizado no interior da província do Namibe, extremo Sudoeste de Angola, definido pelas coordenadas -14.76°S de latitude e 13.36°E de longitude, possui uma superfície de 7612 km^2 e cerca de 55000 habitantes, de acordo o censo populacional realizado em 2014, figura 6.1. O município da Bibala é limitado a Norte pelo município de Camucuiu, a Este pelos municípios de Quilengues, Cacula, Lubango e Humpata, a Sul pelo município de Virei, e a Oeste pelo município de Moçâmedes [Tch16].

O mapa de localização do município da Bibala bem como o mapa de distribuição geográfica das fontes de água (figura 6.9) foram construídos com o programa informático ArcGis e o procedimento das suas construções está desenvolvido na secção 6.3.

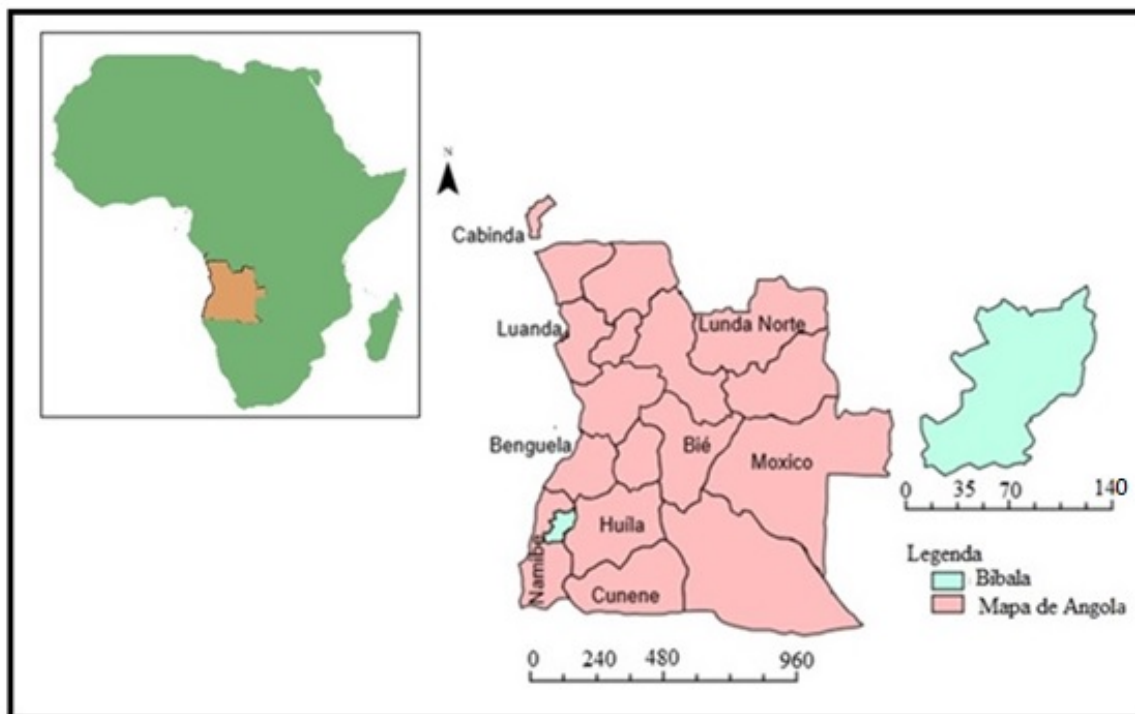


Figura 6.1: Mapa de localização do município da Bibala – Angola.

O clima da região da Bibala é semiárido e a temperatura média anual de 23.71°C . Esta região é influenciada pela corrente de Benguela e pelo relevo, onde se destacam inselbergs que atingem cotas

que podem atingir os 2500 m e a humidade relativa varia entre os 40% e os 70%. A pluviosidade média anual é de 815 mm, sendo junho o mês mais seco do ano com 0 mm e março o mês de maior precipitação, com uma média de 248 mm. A população do município da Bibala dedica-se à criação de animais e à agricultura de subsistência, uma vez que as quedas pluviométricas ocorrem com pouca regularidade entre os meses de outubro e abril [Tch16].

6.1.2 Geologia

Um levantamento geofísico feito em 2009, no âmbito do Plano Nacional de Geologia de Angola (PLANAGEO), permitiu descobrir um complexo de rochas graníticas ornamentais na região do Cunene, com uma área de 45000 km², abrangendo também as províncias da Huila e do Namibe, estendendo-se até ao território da Namíbia. As anomalias magnéticas detetadas pelo PLANAGEO evidenciaram também sinais favoráveis de prospeção de minerais metálicos e não metálicos, tais como ferro, diamante, fosfatos, cobre, chumbo, bauxite e, ainda, de minerais radioativos. Os minerais radioativos mais comuns são a Autunite, Branerita, Carnotita, Torianita e Uraninita. O conteúdo radioativo destes minerais é essencialmente baseado em ²³⁸U ou ²³²Th [Mar17].

Em quase todas as áreas de Angola, de acordo com a carta geológica apresentada na figura 6.2, principalmente na região sul-sudoeste, ocorrem exposições de rochas graníticas. As litologias graníticas em Angola exibem frequentemente intensa foliação e distribuem-se por quase todas as regiões em especial no Noroeste (NBanza Congo), Centro-Oeste, Nordeste (Lundas) e Sul-Sudoeste, que abrange as províncias da Huila, do Namibe e do Cunene. Os complexos graníticos da região da Bibala, província do Namibe são, em geral, de textura porfiróide e matriz grosseira e distribuem-se pelas áreas entre Moçâmedes, Caraculo, Munhino e Luchipa. As rochas graníticas da Bibala são ainda descritas como sendo cálcio-alcálico, rico em quartzo, microclínio e apresentam enriquecimento em minerais ferromagnesianos e também teores de urânio [DCT17, Silo5, Car81].

6.1.3 Hidrografia

A Bibala é uma região com rios intermitentes que chegam a secar durante o inverno, entre os meses de maio e agosto. Os principais rios do município da Bibala são o rio Munhino, Dáreia, Caitou, Pirangombe, Tchapitchapi, Lola, Ndukuta, Muhonda e o rio Tchimbanque - Lute. A mineralização das águas aumenta por faixas paralelas de Este para Oeste, com mais intensidade nos interflúvios e de forma gradual próximo aos vales aluvionares dos cursos de água. Na primeira faixa que abrange a serra da Chela e que engloba as zonas de Cainde, Vila Arriaga e Lola as águas são de baixa mineralização, menor que 50 mg L⁻¹, próprias para consumo humano e para a prática de atividades agrícolas [Tch16, Fra13].

Além da utilização da água dos rios para fins domésticos, a água de consumo público, no interior do município da Bibala, tem a sua origem em furos de água efetuados pelas autoridades locais. No entanto, na maioria dos edifícios existentes na sede municipal, a água consumida pela população é originária da rede de abastecimento público.

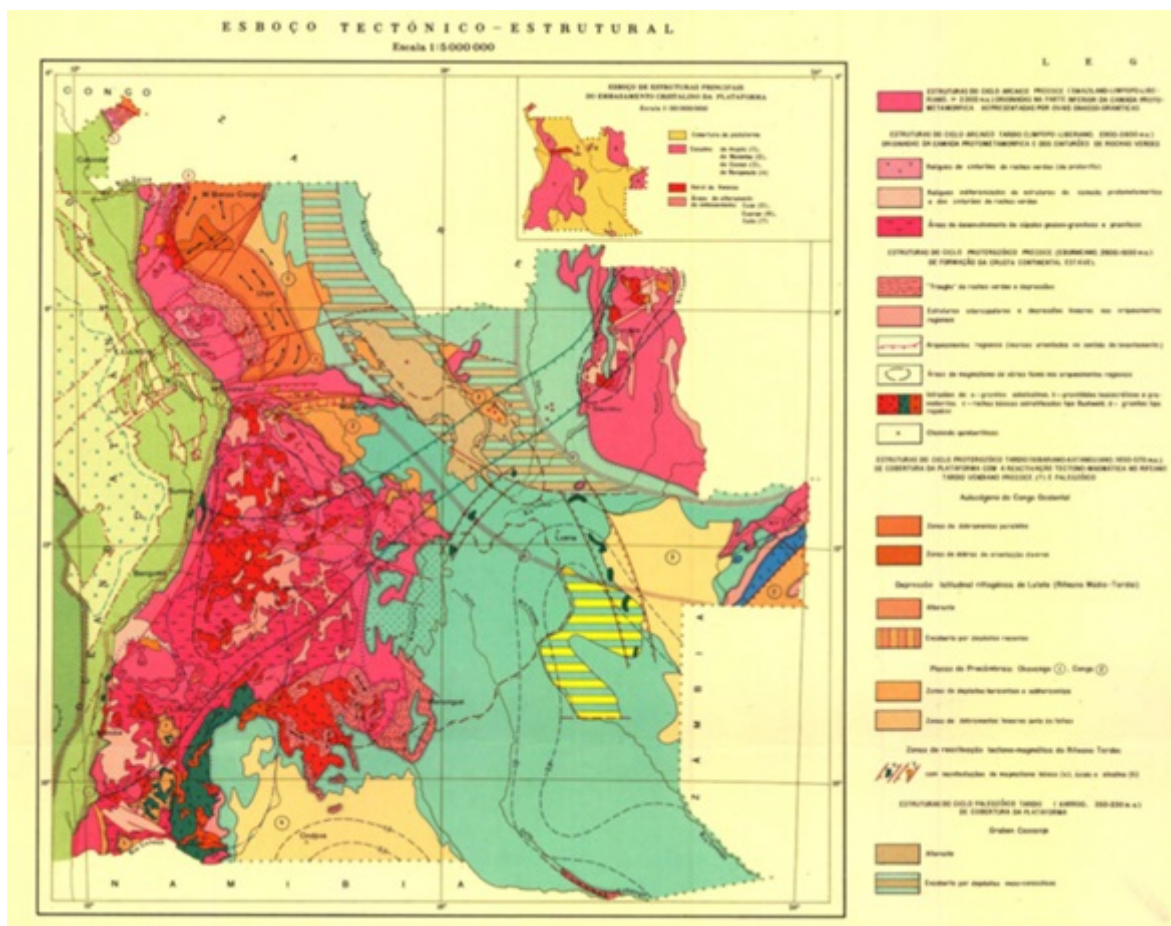


Figura 6.2: Carta geológica de Angola [NN].

6.2 Medição da concentração da atividade do radão na água do município da Bibala

6.2.1 Recolha das amostras

Neste estudo, 81 amostras de água foram cuidadosamente recolhidas em 27 locais no município da Bibala, durante o verão, em 2017 e 2018. Três amostras de água foram recolhidas da mesma fonte e as médias das concentrações da atividade específica de radão são representadas pelos códigos de S1 a S27.

O gás radão é solúvel em água e, uma vez que a sua solubilidade diminui com o aumento da temperatura, pode escapar rapidamente da água para o ar. Quando a água está estagnada na tubagem, a concentração de radão é menor do que abaixo da superfície do solo. Por esse motivo, quando queremos medir a sua concentração, é necessário retirar toda a água que está retida na tubagem antes da recolha das amostras (figura 6.3).



Figura 6.3: Uma das fontes de recolha das amostras de água analisadas.

Para melhor identificação dos locais de recolha são apresentadas na tabela [6.1](#) as coordenadas GPS dos furos de água onde foram recolhidas as amostras.

Tabela 6.1: Coordenadas GPS das fontes de água

ID	Locais de recolha	Latitude	Longitude
S1	Kipamba	-14.747778	13.375556
S2	Mahita	-14.770833	13.346111
S3	Bomba	-14.747500	13.356667
S4	Matadouro	-14.747222	13.358333
S5	Matuco	-14.757222	13.353056
S6	Jamba	-14.851389	13.168889
S7	Camupupa	-14.731389	13.451667
S8	Rio da areia	-14.635278	13.390556
S9	Montipa	-14.649167	13.259722
S10	Residência 1	-14.759167	13.349722
S11	Residência 2	-14.760150	13.351490
S12	Residência 3	-14.746890	13.353420
S13	Residência 4	-14.748180	13.313120
S14	Mukwahona	-14.794722	13.346667
S15	Humbia	-14.764722	13.404722
S16	Navindombo	-14.803889	13.340000
S17	Muhonda	-14.876111	13.122500
S18	Caitou	-14.482500	13.082222
S19	Posto médico	-14.480833	13.076667
S20	Kapangombe	-14.722500	13.443889
S21	Caminho de Ferro	-14.751667	13.371944
S22	Casas novas	-14.728056	13.352778
S23	Miquete	-14.724167	13.439167
S24	Escola nº 2004	-14.866944	13.100833
S25	Lola	-14.304444	13.990000
S26	Igreja protestante	-14.521389	13.125556
S27	Sonda	-14.863611	13.110278

A fim de preservar a qualidade da amostragem, a água foi recolhida após aproximadamente cinco minutos de bombeamento e selada imediatamente para evitar que o radão escapasse para a atmosfera. Para a recolha das amostras de água, foram utilizados frascos de vidro com capacidade de 40 mL. Esses frascos de vidro especiais, apresentados na figura 6.4, garantem que a perda de radão por degaseificação seja o mais baixa possível [SBo4]. As amostras recolhidas foram transportadas por meio aéreo para o Laboratório de Estudos dos Efeitos de Exposição ao Radão (LabExpoRad) na Covilhã, Portugal, para posterior análise.

Como as amostras foram analisadas 4 dias após a recolha, para compensar a perda de radão devido ao seu decaimento, foi utilizado o valor 2.065 correspondente ao fator de correção de decaimento (DCF). Embora a precisão analítica diminua, à medida que a amostra se torna cada vez menos ativa, a correção de decaimento pode ser usada para amostras cujo período de recolha não tenha sido superior a 10 dias. [Inc12].



Figura 6.4: Frascos especiais para transporte e análise das amostras.

6.2.2 Técnica utilizada para a medição da concentração de radão na água

A medição da concentração de radão na água do município da Bibala foi feita com o equipamento RAD7, um detetor de radão fabricado pela companhia americana DurrIDGE. O RAD7 DurrIDGE é um instrumento versátil constituído por um detetor de estado sólido capaz de medir, em tempo real, a concentração do radão na água, no ar e no solo [Inc12].

O funcionamento do RAD7 DurrIDGE, para a medição do radão na água, é condicionado por três componentes principais: uma câmara de ionização, um aerador e tubos de conexão. Também é utilizado um dessecante (CaSO_4 com 3% de CaCl_2) para manter, no interior do sistema de medição, a humidade relativa em valores inferiores a 10%. Quando a humidade no interior da câmara de ionização é elevada, além de diminuir a sensibilidade do detetor, provoca também a condensação do vapor de água na superfície do semicondutor, conseqüentemente a espessura molecular da camada de água vai permitir que ocorra condução iónica e, também, acelerar a taxa de corrosão no interior do equipamento RAD7. É, por isso, necessária uma inspeção regular da humidade no equipamento para se ter a certeza de que o dessecante é, e foi, eficaz durante o processo de medição. Todas as leituras de humidade relativa, durante a medição, devem permanecer abaixo de 10%. No pior dos casos, pelo menos nos primeiros dois ciclos de contagem, deve garantir-se que o valor da humidade relativa é inferior a 10% e, em caso contrário, deve ser feita uma correção da humidade [Inc12].

O RAD7 é calibrado pela DurrIDGE e tem uma precisão de calibração de cerca de 1%. A calibração é feita por meio de comparação cruzada com as câmaras de radão padrão secundárias projetadas pela US-EPA. A calibração permite determinar com exatidão as concentrações de radão e de tório. Existem três modos integrados no *firmware* RAD7:

- A sensibilidade *sniff*, fornece rápidas respostas e conta as partículas alfa emitidas no decaimento do ^{218}Po ;
- A sensibilidade normal, para a obtenção de maior precisão, conta as partículas alfa emitidas no decaimento do ^{218}Po e do ^{214}Po ;
- A sensibilidade tório, conta as partículas alfa emitidas no decaimento do ^{216}Po para a medição do tório [Inc12].

A técnica RAD7 H₂O, do equipamento RAD7, utiliza protocolos específicos que providenciam uma leitura direta da concentração de radão em amostras de água. Quando um núcleo de radão se desintegra no interior da câmara, os seus descendentes de curta meia-vida, o ^{214}Po e o ^{218}Po , se convertem em iões positivos, que são atraídos pelo campo elétrico do interior da câmara, cuja diferença de potencial elétrico varia entre os 2000 V e os 2500 V. Os iões são fixados na superfície ativa do detetor e, quando decaem, as suas partículas alfa têm 50% de probabilidade de entrarem no detector produzindo assim sinais elétricos com intensidades proporcionais à energia da partícula alfa emitida, que de seguida são devidamente amplificados pela eletrónica associada [BMMP17, Inc12].

Na figura 6.5, está representado o esquema da medição do radão e, como se pode perceber, a concentração da atividade do radão é medida em circuito fechado.

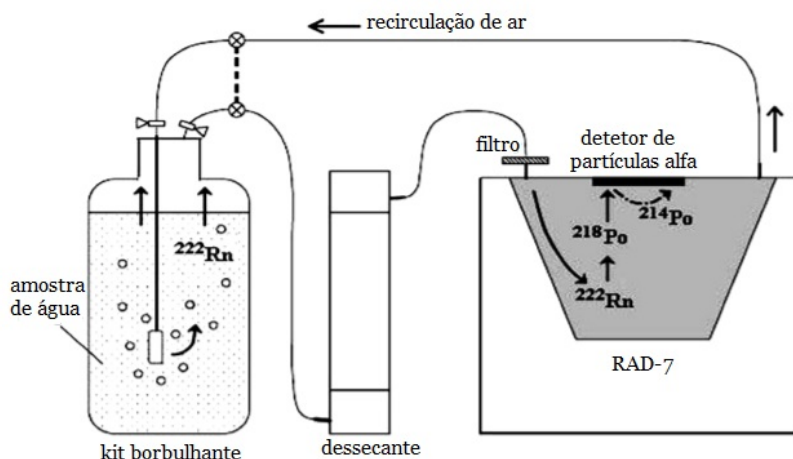


Figura 6.5: Representação esquemática da medição da concentração de radão na água com o RAD7. Adaptada de [MN17].

Para permitir que o computador receba os dados das medições foi utilizado o *software CAPTURE* da Durrige. A interface do programa *CAPTURE* fornece um espectro a partir do qual se podem observar as energias emitidas pelos descendentes sólidos, ^{218}Po e ^{214}Po , do radão. A janela A representa as energias das partículas alfa emitidas no decaimento do ^{218}Po e a janela C representa as energias das partículas alfa emitidas pelo ^{214}Po . Depois de mais de três horas a um nível constante de radão, a taxa de contagem na janela C é aproximadamente a mesma que a da janela A. As janelas B e D referem-se aos descendentes do tório, o ^{216}Po e o ^{212}Po , respetivamente, (figura 6.6) [Inc12].

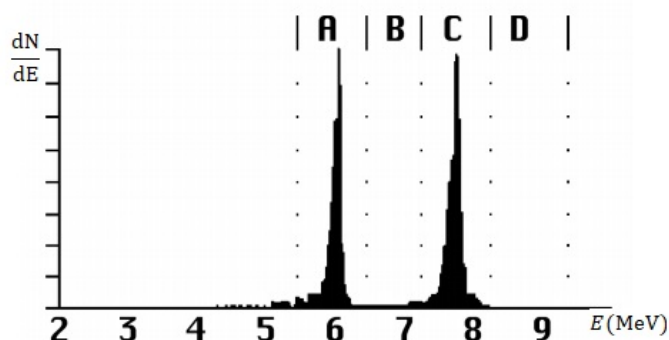


Figura 6.6: Espectro produzido pelo RAD7 quando o radão atinge o equilíbrio secular com os seus descendentes. [Inc12].

A medição do radão na água foi efetuada no modo normal através da realização de quatro ciclos em cada medição. Cada ciclo tem a duração de 5 minutos. No final os resultados são visualizados diretamente a partir da janela do software de aquisição e análise de dados do RAD7 (figura 6.7).

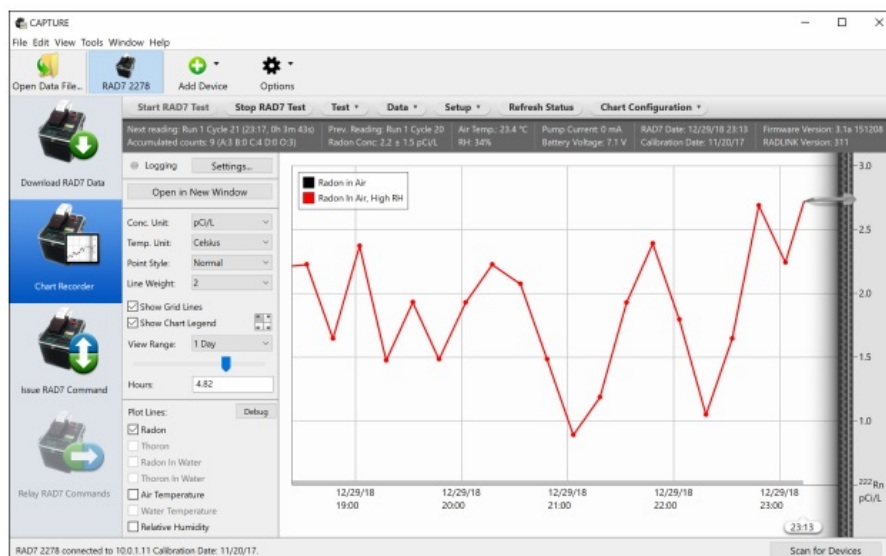


Figura 6.7: O software CAPTURE.

[inc12]

6.2.3 Resultados e discussão

Os resultados obtidos, da concentração de radão na água, no município da Bibala são apresentados na tabela 6.2 e foram utilizados para construir o gráfico apresentado na figura 6.8.

Tabela 6.2: Concentração de radão na água e respetivos locais de recolha

ID	Locais de recolha	DCF × $\langle C_{Rn} \rangle$ (Bq L⁻¹)
S1	Kipamba	41.7 ± 5.0
S2	Mahita	19.1 ± 2.3
S3	Bomba	11.9 ± 1.4
S4	Matadouro	24.4 ± 2.9
S5	Matuco	11.1 ± 1.3
S6	Jamba	14.5 ± 1.8
S7	Camupupa	14.4 ± 1.7
S8	Rio da areia	17.7 ± 2.1
S9	Montipa	8.16 ± 1.0
S10	Residência 1	17.4 ± 2.1
S11	Residência 2	12.6 ± 1.5
S12	Residência 3	10.9 ± 1.3
S13	Residência 4	19.6 ± 2.4
S14	Mukwahona	16.3 ± 2.0
S15	Humbia	18.0 ± 2.2
S16	Navindombo	17.1 ± 2.1
S17	Muhonda	9.5 ± 1.2
S18	Caitou	12.4 ± 1.5
S19	Posto médico	6.8 ± 0.8
S20	Kapangombe	6.01 ± 0.7
S21	Caminho de Ferro	5.3 ± 0.6
S22	Casas novas	16.6 ± 2.0
S23	Miquete	12.3 ± 1.5
S24	Escola nº 2004	9.5 ± 1.1
S25	Lola	9.2 ± 1.1
S26	Igreja protestante	8.6 ± 1.0
S27	Sonda	9.2 ± 1.1
	Average	14.1 ± 1.7
	SD	7.12

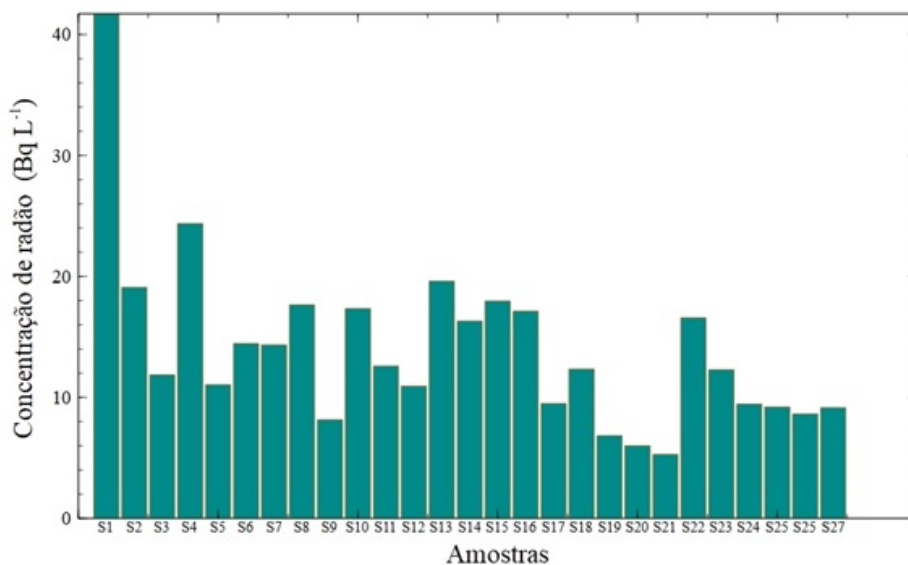


Figura 6.8: Distribuição da concentração de radão das amostras de água recolhidas no município da Bibala.

Na figura [6.9](#) está representado o mapa da distribuição geográfica das fontes de água de consumo público no município da Bibala e os respetivos valores da concentração da atividade específica de radão.

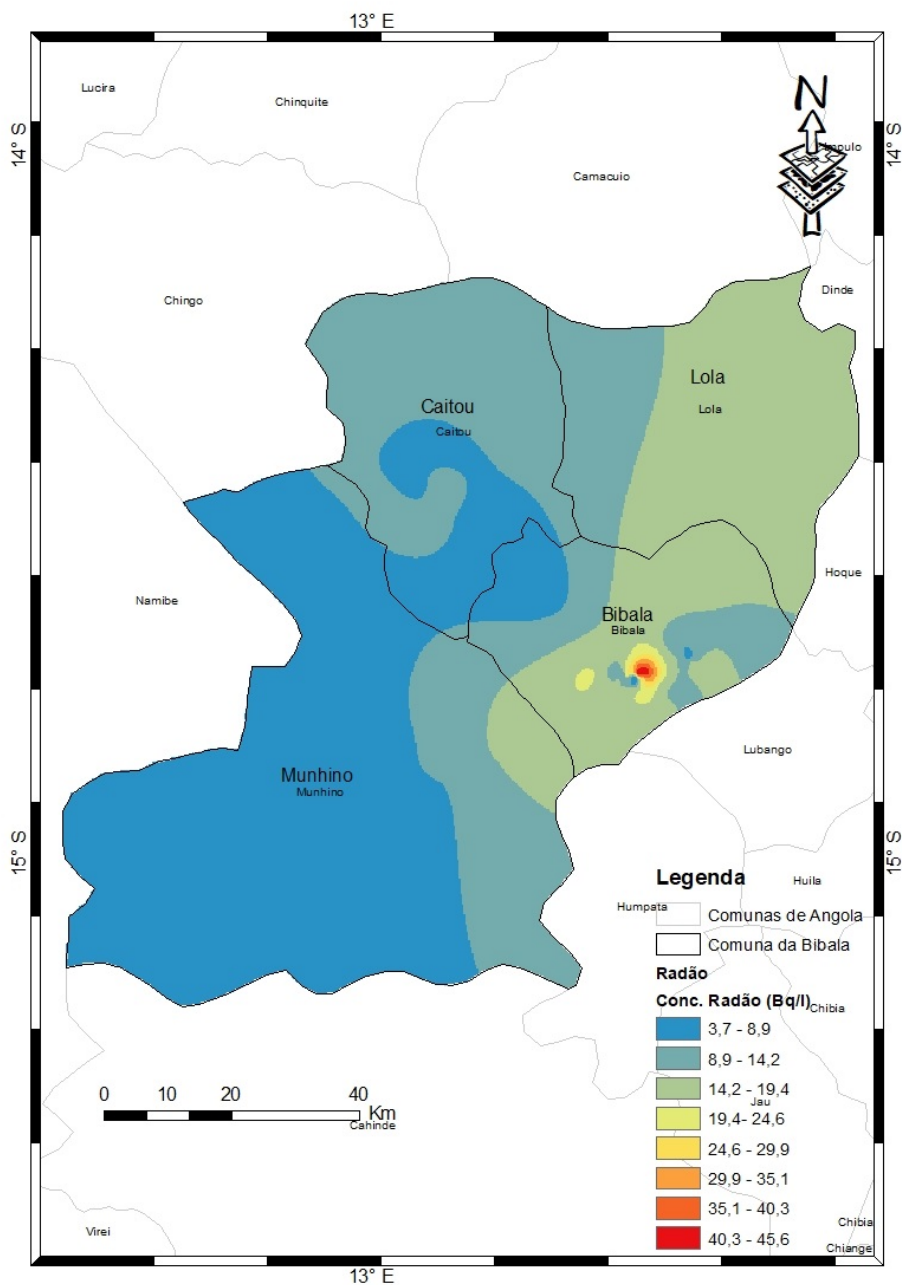


Figura 6.9: Mapa de distribuição geográfica da concentração da atividade específica de radão no município da Bibala.

6.2.3.1 Dose efetiva anual comprometida devido a ingestão de radão presente na água

Para a avaliação do efeito radiológico resultante da ingestão de radão dissolvido na água de consumo público foi calculada a dose efetiva anual comprometida recebida pela população do município da Bibala. A dose efetiva anual comprometida por ingestão de água contendo radão pode ser estimada usando a equação 6.1. De acordo com esta equação, a dose efetiva anual, devida ao consumo de água, depende da quantidade de água ingerida, da concentração de radão presente na água e do fator de conversão de dose [RSMCo3].

$$D_{ing} = K_w \times C_{Rn} \times V \quad (6.1)$$

onde, C_{Rn} é a concentração de atividade de radão (Bq L^{-1}), V é a quantidade de água consumida por ano (L a^{-1}) e K_w é o fator de conversão da dose (Sv Bq^{-1}).

Para uma mesma concentração da atividade específica de radão, a dose estimada pode variar significativamente, dependendo das taxas de consumo de água e dos fatores de conversão de dose utilizados. Para o cálculo da dose efetiva, devido a ingestão de água, foram utilizadas taxas médias de consumo anual, para o público, estabelecidos pela IAEA para bebês, crianças e adultos, apresentados na tabela 6.3 [FIN].

Tabela 6.3: Grupos etários da ICRP e suas taxas anuais de consumo de água estabelecidos pela IAEA [FIN].

Faixa etária	Grupos	Intervalos de idades (a)	Taxa de consumo de água (L a^{-1})
Bebés	GI	0 – 1	200
	GII	1 – 2	260
Crianças	GIII	3 – 7	300
	GIV	7 – 12	350
	GV	12 – 17	600
Adultos	GVI	>17	730

Neste trabalho, para estimar a dose efetiva anual devida à ingestão de radão na água, foram utilizados os seguintes fatores de conversão, K_w , sugeridos pela UNSCEAR e pelo ICRP [uni96, TDR00, Jac96]:

- $1 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$ para adultos
- $2 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$ para crianças
- $7 \times 10^{-8} \text{ Sv Bq}^{-1}$ para bebês

O consumo anual de água por grupos de indivíduos pode variar significativamente. Tendo em conta que o consumo médio de água no verão é superior ao consumo de água no inverno e como o radão é, geralmente, removido da água, de forma eficiente, por agitação ou ebulição, a dose efetiva depende da quantidade de água consumida sem estes procedimentos e, também, dos hábitos de consumo adotados pela população [TDR00]. Os hábitos de consumo de água da população do município da Bibala não foram considerados para este estudo. Na tabela 6.4 são apresentados os valores médios da dose efetiva anual comprometida devido à ingestão da água do município de Bibala.

Tabela 6.4: Concentração média de radão e dose efetiva anual comprometida devido a ingestão de radão para diferentes faixas etárias

ID	$\langle C_{Rn} \rangle (\text{Bq L}^{-1})$	GI	GII	GIII	GIV	GV	GVI
S1	41.7	0.58	0.76	0.25	0.29	0.50	0.30
S2	19.1	0.27	0.35	0.11	0.13	0.23	0.14
S3	11.9	0.17	0.22	0.07	0.08	0.14	0.09
S4	24.4	0.34	0.44	0.15	0.17	0.29	0.18
S5	11.1	0.15	0.20	0.07	0.08	0.13	0.08
S6	14.5	0.20	0.26	0.09	0.10	0.17	0.11
S7	14.4	0.20	0.26	0.09	0.10	0.17	0.10
S8	17.7	0.25	0.32	0.11	0.12	0.21	0.13
S9	8.2	0.11	0.15	0.05	0.06	0.10	0.06
S10	17.4	0.24	0.32	0.10	0.12	0.21	0.13
S11	12.6	0.18	0.23	0.08	0.09	0.15	0.09
S12	10.9	0.15	0.20	0.07	0.08	0.13	0.08
S13	19.6	0.27	0.36	0.12	0.14	0.24	0.14
S14	16.3	0.23	0.30	0.10	0.11	0.20	0.12
S15	18.0	0.25	0.33	0.11	0.13	0.22	0.13
S16	17.1	0.24	0.31	0.10	0.12	0.21	0.13
S17	9.5	0.13	0.17	0.06	0.07	0.11	0.07
S18	12.4	0.17	0.22	0.07	0.09	0.15	0.09
S19	6.8	0.10	0.12	0.04	0.05	0.08	0.05
S20	6.01	0.08	0.11	0.04	0.04	0.07	0.04
S21	5.3	0.07	0.10	0.03	0.04	0.06	0.04
S22	16.6	0.23	0.30	0.10	0.12	0.20	0.12
S23	12.3	0.17	0.22	0.07	0.09	0.15	0.09
S24	9.5	0.13	0.17	0.06	0.07	0.11	0.07
S25	9.2	0.13	0.17	0.06	0.06	0.11	0.07
S26	8.6	0.12	0.16	0.05	0.06	0.10	0.06
S27	9.2	0.13	0.17	0.05	0.06	0.11	0.07
Média	14.1	0.20	0.26	0.08	0.10	0.17	0.10

6.2.3.2 Dose efetiva anual comprometida devido a inalação de radão presente na água

Quando o radão entra no corpo humano, os seus descendentes de curta semivida podem decair, não apenas no estômago e nos pulmões, mas também noutros órgãos internos. A dose efetiva anual comprometida no epitélio brônquico, devido o radão libertado durante o manuseamento da água, foi calculada com a equação 6.2:

$$D_{inh} = K'_w \times C_{Rn} \times F \times R \times t \quad (6.2)$$

Usando os parâmetros estabelecidos no relatório da UNSCEAR [otEoAR00]:

- $K'_w = 9 \times 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ m}^3$ – fator de conversão da dose
- $F = 0,4$ – fator de equilíbrio entre o radão e a sua descendência
- $R = 10^{-4}$ – coeficiente de transferência do radão da água para o ar .

O coeficiente de transferência do radão da água para o ar (R) é a fração da concentração média inicial de radão na água que contribui para a concentração de radão no ar interior. O coeficiente de transferência do radão da água para o ar é definido pela equação 6.3 :

$$R = \frac{\Delta \overline{C}_a}{\overline{C}_w} \quad (6.3)$$

onde $\Delta \overline{C}_a$ é o valor médio do incremento da concentração de radão no ar interior e \overline{C}_w é o valor médio da concentração da radão na água.

- 7000 h a^{-1} – fator de tempo médio de exposição ocupacional no interior
- C_{Rn} – concentração de radão transferida da água para o ar em metro cúbico.

Na tabela 6.5 são apresentadas as doses efetivas anuais devido à inalação do radão resultante do manuseamento da água. . O valor médio da dose encontrado é de 0.04 mSv a^{-1} , bastante menor do que o limite de 1 mSv a^{-1} recomendado pela UNSCEAR e pela OMS [Unsod, Org93, O+09].

Tabela 6.5: Dose efetiva anual comprometida por inalação do radão resultante do manuseamento da água.

ID	$\langle C_{Rn} \rangle (\text{Bq m}^{-3})$	$D_{inat} (\text{mSv a}^{-1})$
S1	41.7×10^3	0.11
S2	19.1×10^3	0.05
S3	11.9×10^3	0.03
S4	24.4×10^3	0.06
S5	11.0×10^3	0.03
S6	14.5×10^3	0.04
S7	14.4×10^3	0.04
S8	17.7×10^3	0.04
S9	8.2×10^3	0.02
S10	17.4×10^3	0.04
S11	12.6×10^3	0.03
S12	10.9×10^3	0.03
S13	19.6×10^3	0.05
S14	16.3×10^3	0.04
S15	18.0×10^3	0.05
S16	17.1×10^3	0.04
S17	9.5×10^3	0.02
S18	12.3×10^3	0.03
S19	6.8×10^3	0.02
S20	6.0×10^3	0.02
S21	5.3×10^3	0.01
S22	16.6×10^3	0.04
S23	12.3×10^3	0.03
S24	9.5×10^3	0.02
S25	9.2×10^3	0.02
S26	8.6×10^3	0.02
S27	9.1×10^3	0.02
Média	14.1×10^3	0.04

Analisando os resultados obtidos, quando o radão é transferido da água para o ar, podemos ver claramente que a dose efetiva anual comprometida nas paredes do estômago (tabela 6.4), devido à ingestão, é superior à dose efetiva anual comprometida no epitélio brônquico (tabela 6.5). Esta diferença deve-se ao baixo valor do coeficiente de transferência do radão da água para o ar interior (10^{-4}), ou seja, o radão liberado da água tem uma contribuição reduzida para a concentração de radão no ar interior.

A água de consumo público com radão constitui uma fonte natural de radiação para o corpo humano através da ingestão e através da inalação do radão libertado dessa água durante o seu uso doméstico. Na tabela 6.6 é apresentada a dose efetiva anual comprometida para órgãos internos (paredes do estômago e epitélio brônquico) por faixas etárias, obtida pela soma dos valores da dose por ingestão e dos valores da dose por inalação de radão. Os valores médios da dose efetiva por ingestão de radão presente na água, o valor médio da dose efetiva por inalação de radão libertado da água para o ar e os valores médios da dose efetiva anual comprometida para órgãos internos, paredes do estômago e epitélio brônquico, estão apresentados nas figuras 6.10, 6.11 e 6.12.

Tabela 6.6: Dose efetiva anual comprometida devido ao radão (radiação alfa) para órgãos internos: paredes do estômago e epitélio brônquico.

ID	GI	GII	GIII				GIV	GV	GVI
			(mSv a ⁻¹)						
S1	0.69	0.86	0.36	0.40	0.61	0.41			
S2	0.32	0.40	0.16	0.18	0.28	0.19			
S3	0.20	0.25	0.10	0.11	0.17	0.12			
S4	0.40	0.50	0.21	0.23	0.35	0.24			
S5	0.18	0.23	0.09	0.11	0.16	0.11			
S6	0.24	0.30	0.12	0.14	0.21	0.14			
S7	0.24	0.30	0.12	0.14	0.21	0.14			
S8	0.29	0.37	0.15	0.17	0.26	0.17			
S9	0.13	0.17	0.07	0.08	0.12	0.08			
S10	0.29	0.36	0.15	0.17	0.25	0.17			
S11	0.21	0.26	0.11	0.12	0.18	0.12			
S12	0.18	0.23	0.09	0.10	0.16	0.11			
S13	0.32	0.41	0.17	0.19	0.28	0.19			
S14	0.27	0.34	0.14	0.16	0.24	0.16			
S15	0.30	0.37	0.15	0.17	0.26	0.18			
S16	0.28	0.36	0.15	0.16	0.25	0.17			
S17	0.16	0.20	0.08	0.09	0.14	0.09			
S18	0.20	0.26	0.11	0.12	0.18	0.12			
S19	0.11	0.14	0.06	0.07	0.10	0.07			
S20	0.10	0.12	0.05	0.06	0.09	0.06			
S21	0.09	0.11	0.05	0.05	0.08	0.05			
S22	0.27	0.34	0.14	0.16	0.24	0.16			
S23	0.20	0.25	0.10	0.12	0.18	0.12			
S24	0.16	0.20	0.08	0.09	0.14	0.09			
S25	0.15	0.19	0.08	0.09	0.13	0.09			
S26	0.14	0.18	0.07	0.08	0.13	0.08			
S27	0.15	0.19	0.08	0.09	0.13	0.09			
Média	0.23	0.29	0.12	0.13	0.20	0.14			

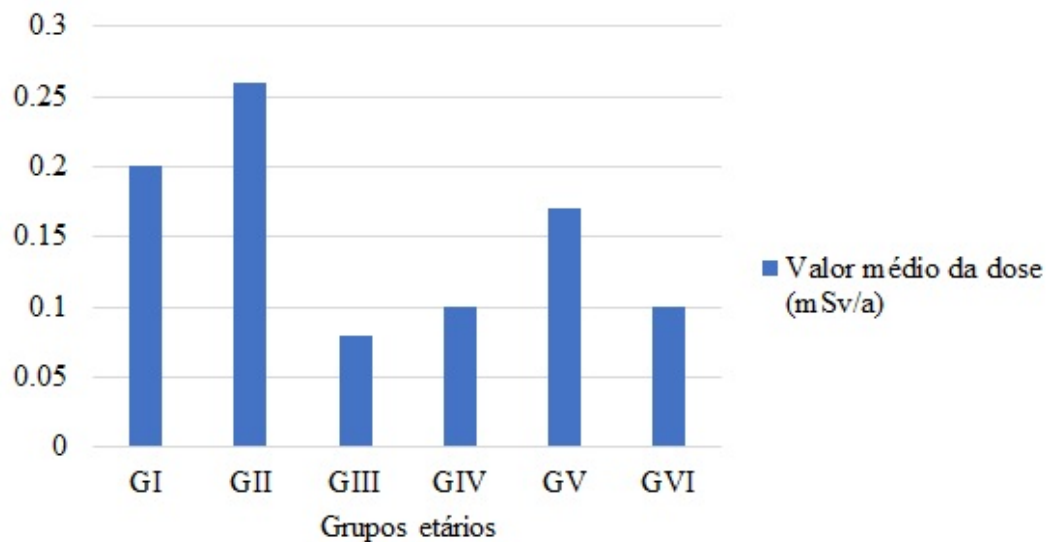


Figura 6.10: Valores médios das doses efetiva por ingestão de radão presente na água.

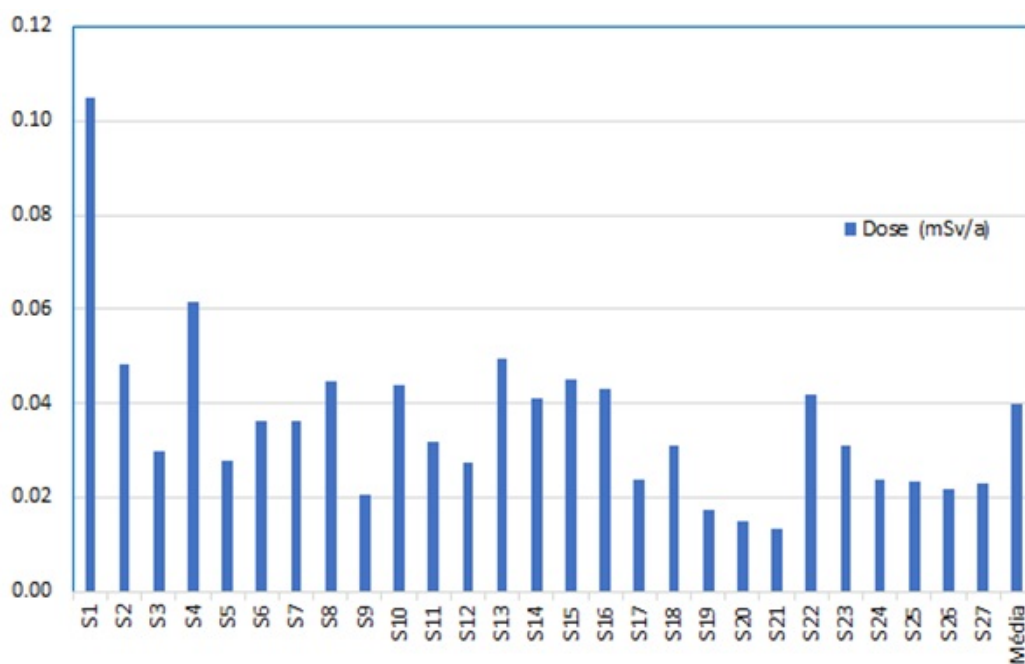


Figura 6.11: Resultados das doses efetiva por inalação de radão libertado da água para o ar.

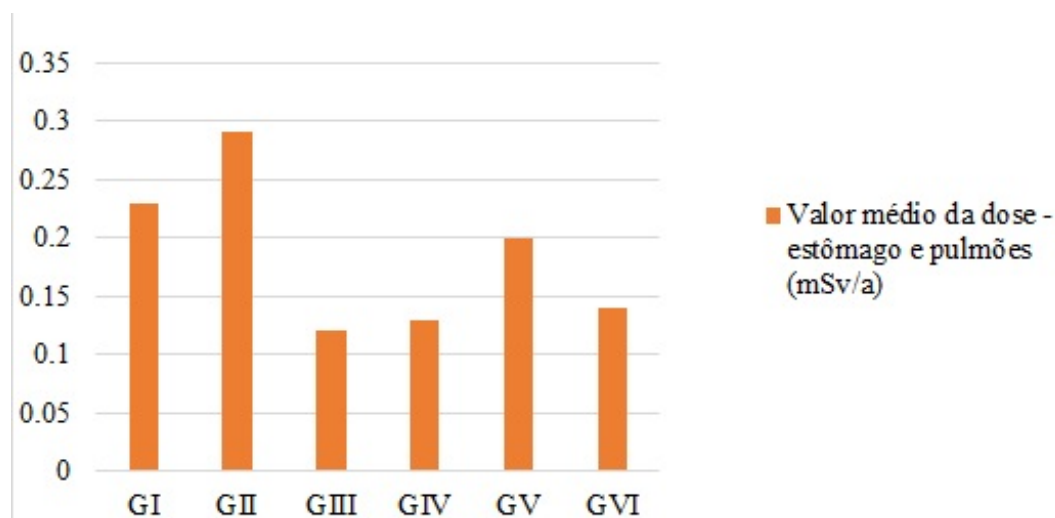


Figura 6.12: Valores médios das doses efetiva anual para órgãos internos, estômago e pulmões.

6.3 Mapeamento da concentração de radão na água em Angola

Tanto quanto se sabe, em Angola, não existe informação acerca da realização de medições da concentração da atividade de radão na água de consumo público, nem da água que é utilizada para fins domésticos.

Por outro lado, não existe uma legislação local que regule os limites da concentração de radão na água e/ou no ar no interior de edifícios. Daí que o estudo desenvolvido no município da Bibala e apresentado nesta tese, pode ser considerado um trabalho pioneiro sobre a medição de radão na água, que uma parte da população utiliza diariamente, e pode constituir um ponto de partida para um trabalho futuro a ser desenvolvido em outras regiões do país.

Tendo a consciência de que se pretende alargar a área de recolha das amostras de água para a medição da concentração de radão, abrangendo não só toda a extensão do município da Bibala, mas também outros municípios da região sul de Angola e, a seu tempo, todo o país, considera-se necessária a construção de mapas de distribuição interpolada da concentração de radão na água, para melhor identificação e tomada de medidas de mitigação, ou remediação, nos locais onde os níveis de radão apresentarem valores superiores aos limites recomendados pelas Instituições Internacionais de Proteção Radiológica. Para a realização dessa tarefa os SIG, que foram também utilizados neste trabalho para a construção dos mapas de localização e de distribuição geográfica da concentração de radão na água do município da Bibala, serão uma ferramenta imprescindível.

6.3.1 Sistema de informação geográfica

Para melhor localização e identificação dos locais de recolha das amostras de água e representação das respetivas concentrações de radão, foram construídos os mapas de localização do município da Bibala, o mapa de distribuição geográfica das fontes de água, bem como a sua interligação com os valores das concentrações de radão encontrados, utilizando os SIG.

Os SIG são uma ferramenta que integra os fundamentos da geografia associada as novas tecnologias, com maior incidência a aplicação informática, na representação de elementos geográficos. Com o melhoramento da qualidade dos computadores, o SIG teve uma rápida evolução a partir do princípio

da década de 70 em termos de capacidade técnica e de processamento e, é hoje utilizado em todo mundo, para os mais diversos propósitos [Heq11].

A importância da aplicação dos SIG nas mais diversas áreas, reside no facto de permitir a integração e a manipulação de informação de natureza diversa, sendo especialmente adequados para variáveis de natureza espacial de âmbito global, regional ou local, por isso, são atualmente, uma ferramenta essencial para a utilização efetiva da informação geográfica. Por este motivo, o SIG é, por exemplo, aplicado no ordenamento do território, os biólogos utilizam o SIG para localização de determinadas espécies e os engenheiros civis e arquitetos, utilizam o SIG para a identificação dos melhores locais para construção de edifícios e implantação de outras infraestruturas. Pode por isso afirmar-se que constitui uma ferramenta indispensável para todos os profissionais que lidam com dados relacionados com a localização de objetos em relação à superfície da terra [HdB09].

Por outro lado, o SIG tem como suporte de execução de tarefas o programa ArcGIS, que permite e facilita a análise, gestão ou representação do espaço e dos fenómenos que nele ocorrem. A construção dos mapas apresentados nesta tese foi realizada com o ArcGIS, versão 10.3, propriedade da empresa norte americana ESRI. A interface do ArcGIS é constituída por três componentes: O *ArcMap*, o *ArcCatalog* e o *ArcToolbox* (Figura 6.13).

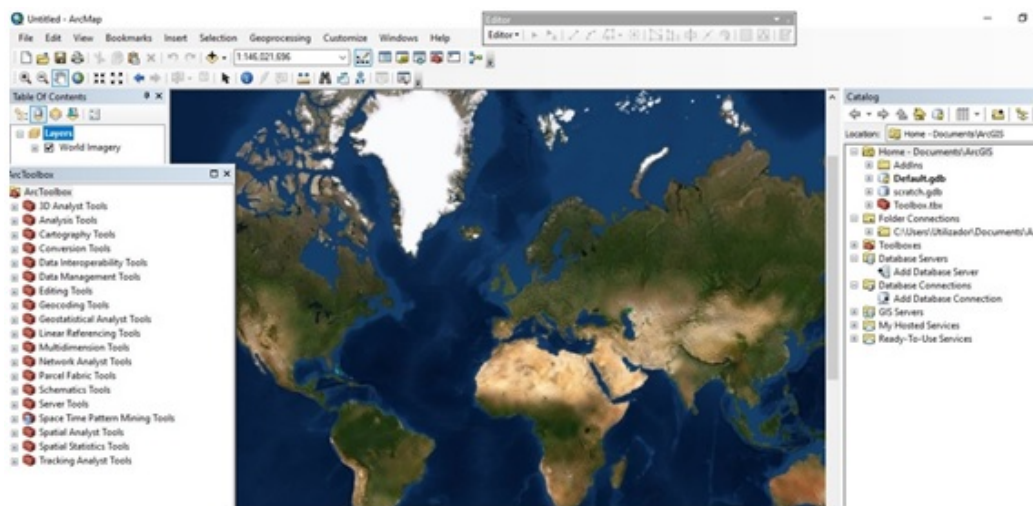


Figura 6.13: Janela principal do ArcGIS 10.3.

Na borda superior da interface do ArcGIS, figura o *ArcMAP*, que é o componente principal do ArcGIS, com ferramentas que permitem a criação, edição, exibição de mapas integrados e analisar dados georreferenciados. O *Catalog* é uma aplicação de gestão de dados e permite pesquisar, explorar, visualizar mapas, gerir e importar ficheiros. O *ArcToolbox* é uma ferramenta de geoprocessamento, que tem como funções a conversão e a sobreposição de dados, análise de proximidade e transformação de mapas [ONB+04].

6.3.2 Sistemas de referência

Como já foi referido, os sistemas de referência são utilizados para descrever as posições de objetos em relação à superfície da terra. Sobre um sistema de referência podem ser definidos diversos tipos de sistemas de coordenadas, sobre os quais se efetuam os cálculos envolvendo posições, distâncias, desníveis e ângulos. O SIG assume que os fenómenos espaciais ocorrem em duas ou três dimensões, espaço euclidiano, denominado por coordenadas geográficas. A representação das coordenadas geográficas (geodésica) em duas dimensões, plano euclidiano, é a mais utilizada no SIG [HdB09].

Toda informação produzida no SIG está organizada em pelo menos um dos dois sistemas de coordenadas existentes: Sistema de coordenadas geográficas (geodésico) ou sistema de coordenadas planas ou projetadas. As coordenadas do sistema de referência geodésico são a latitude e longitude e as coordenadas projetadas, correspondem às coordenadas cartesianas (métricas). Independente do sistema de coordenadas utilizado para se representar ou projetar uma determinada superfície no plano, deve-se adotar uma superfície de referência, que garanta a concordância com as coordenadas na superfície esférica da Terra. Com este propósito, deve-se escolher uma figura geométrica regular, muito próxima da forma da Terra, a qual permite, mediante um sistema coordenado, posicionar espacialmente as diferentes entidades topográficas. Esta figura recebe a denominação de elipsóide e as coordenadas correspondentes são a latitude e longitude geodésicas. O sistema de referência mundial é o *World Geodetic System*, mais conhecido pela designação de WGS84, cujas coordenadas são as mesmas do centro da Terra e são utilizadas como referência para os sistemas GPS e pelo *Google Earth* [Mato7].

6.3.3 Georreferenciação

Frequentemente, os dados com os quais se pretende trabalhar no SIG, não se encontram associados a nenhum sistema de referência espacial, como por exemplo, os mapas digitalizados ou as fotografias. Nestes casos, a geometria destas imagens, não está associada a nenhum sistema de referência, assim, torna-se necessário adaptá-las à geometria de outros dados de maior precisão, cujo sistema de coordenadas é já conhecido, esta operação é conhecida por georreferenciação. Existem diversos sistemas de referência e podem ser locais ou globais [ONB⁺04, HdBo9].

6.3.4 Projeção de sistemas de coordenadas geográfica

Embora seja atualmente possível realizar cálculos sobre uma superfície elipsoidal e até mesmo a sua representação para visualização, a utilização de representações planas, da superfície terrestre e das características geográficas sobre ela distribuídas, é mais prática. A projeção cartográfica consiste em transformar uma posição sobre a superfície terrestre, representada pela latitude e longitude, em uma posição, em coordenadas cartesianas no plano (x, y). O sistema de projeção mais utilizado é o UTM, que divide a Terra em 60 fusos de 6 graus de amplitude em longitude. Cada fuso também é denominado por Zona UTM que é numerada, iniciando em "1" da esquerda para a direita em relação à longitude, 180 graus oeste. Assim, para cada coordenada geográfica corresponde uma projeção numa zona específica do plano cartográfico UTM [Mato7].

6.3.5 Mapas

Os mapas têm sido utilizados há centenas de anos para a representação de informação acerca do mundo real e continuam a ser extremamente úteis para várias aplicações em diferentes domínios. O mapa geográfico, é uma representação gráfica, normalmente plana, da superfície da Terra, numa determinada escala e através de uma projeção cartográfica específica. Sendo um mapa, a representação gráfica tem um certo nível de pormenor, pelo que, a precisão da informação nele contido é determinado pela escala adotada. A escala do mapa determina a resolução espacial da representação da característica gráfica do mapa, ou seja, indica o número de vezes que a realidade foi reduzida. Quanto mais reduzida for a escala, menos pormenor o mapa mostrará. Por isso, a seleção correta da escala, constitui uma tarefa importante na construção de mapas. A escala numérica, ou fracionária, é a mais utilizada na construção de mapas, cujo denominador representa a dimensão real e o numerador, representa a dimensão que lhe corresponde no mapa. A escala de 1 para 10.000 (notação 1:10000 ou 1/10000), por exemplo, indica que uma unidade de medida no mapa equivale a 10000 unidades da

mesma medida sobre o terreno. Assim, 1 cm no mapa, corresponde a 10000 cm (ou 100 m) no terreno. Por outro lado, a escala gráfica, representada por uma linha horizontal, é formada por divisões ao longo das quais são representadas as distâncias existentes na superfície real e as correspondentes dimensões no mapa, entre os referidos intervalos [CCM96].

Os mapas podem ser classificados em duas categorias: mapas topográficos e mapas temáticos. Os mapas topográficos referem-se à representação de características topográficas, fundamentalmente relacionadas com a forma da superfície terrestre, mostrando as características principais e possíveis de objetos naturais. Por outro lado, os mapas temáticos, referem-se à representação de características temáticas na sua relação espacial. Os mapas temáticos de distribuição, constituem uma técnica genérica recomendável para apresentação, visualização e análise de resultados associados a informação geográfica [DKo6].

Portanto, para a construção de mapas é necessária a aplicação de determinados procedimentos que visam estabelecer uma relação entre os pontos da superfície da terra e os pontos correspondentes no plano de projeção. Os procedimentos para a construção de mapas podem ser resumidos nos seguintes aspetos fundamentais:

- Definir um sistema de referência mundial;
- Projetar as coordenadas geográficas na superfície terrestre;
- Relacionar o sistema de referência escolhido com o plano de projeção, selecionando uma escala adequada.

A construção do mapa de localização e o mapa de distribuição da concentração de radão no município da Bibala-Angola foi feita com a aplicação dos três componentes do *ArcGIS*. Através do *ArcMap* foi selecionado o mapa base, *Imagery with labels*, de onde foram extraídos, através das funções do *ArcCatalog*, polígonos georreferenciados (*shapefile*), que representam os perímetros de Angola e do município da Bibala. Sendo o *ArcToolbox* uma ferramenta de processamento da informação geográfica, permitiu fazer a sobreposição dos mapas base para a seleção da área de interesse (*buffer*), bem como interpolar os valores da concentração de radão.

Uma vez que os perímetros selecionados se encontram no sistema de referência mundial, WGS84, há necessidade de serem transformados para um sistema de coordenadas projetadas local. Para o caso específico de Angola, o sistema de projeção adotado, para os trabalhos de mapeamento, foi o *UTM ZONE 33S*. Em seguida, foram exportados para o polígono que representa o perímetro do município da Bibala as coordenadas geográficas das fontes de recolha das amostras de água, obtidas através do GPS *Garmin 64sx*, bem como os respetivos valores da concentração da atividade de radão na água. Nos mapas de localização e de distribuição, da concentração da atividade de radão na água do município da Bibala, foi adotada a escala gráfica, pois esta escala tem a vantagem de não se alterar mesmo quando são alteradas as dimensões do mapa, conservando sempre as proporções corretas. Para uma melhor clareza dos mapas elaborados, foi também inserida a legenda, para descodificar o significado dos símbolos e das cores presentes nos mapas e, no canto superior esquerdo, foi ainda inserida a orientação em cada mapa, representado pelo ponto cardeal Norte (N) [ONB⁺04].

Capítulo 7

Construção do protótipo para a medição do radão

O aparecimento dos semicondutores veio, sem dúvida, tornar mais simples e dinâmico o mundo das comunicações e do processamento de dados, pois estes materiais possuem características que permitem controlar o movimento dos portadores de carga, por isso, são a base para a construção de componentes eletrônicos como é o caso dos retificadores, dos díodos e dos transístores, cuja aplicação em circuitos integrados é fundamental para a construção de detetores de radiação. Em Angola ainda não estão disponíveis equipamentos para a monitorização do radão e, também, há pouca informação por parte da população acerca deste gás radioativo. Por este motivo considera-se necessário construir protótipos capazes de medir a concentração de radão do meio ambiente, utilizando materiais de fácil aquisição, para que seja possível a sua reprodução nas várias regiões do país.

O detetor para a medição do radão, desenvolvido neste trabalho, é uma evolução do protótipo feito no âmbito da dissertação de mestrado da Soraia Elísio, realizada na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa [El19]. O detetor ativo de radão no ar foi desenvolvido usando como sensor principal um fotodíodo PIN de silício de baixo custo, aproximadamente dez euros. A operação do detetor é baseada na contagem das interações da partícula alfa com o volume sensível do fotodíodo, devido principalmente ao decaimento do ^{218}Po e ^{214}Po . O detetor não discrimina as energias e opera em modo de contagem de pulso para medições contínuas em tempo real. A sensibilidade do sensor tem uma pequena dependência da polarização e o dispositivo pode funcionar mesmo com voltagem pequena. Como sistema de aquisição de dados foi utilizado um microcontrolador flexível, o Arduino Uno.

7.1 Semicondutores

Um semicondutor é definido como sendo um material cuja condutividade elétrica se encontra entre a condutividade elétrica dos condutores e a condutividade elétrica dos isoladores, tendo, portanto, a resistividade elétrica valores na ordem de 10^{-2} a $10^9 \Omega \text{ cm}$. De acordo com a composição atômica, os semicondutores são classificados em intrínsecos e extrínsecos (do tipo P e do tipo N). Os semicondutores intrínsecos (elementares) são formados por átomos de um mesmo elemento químico. Os semicondutores extrínsecos são compostos por átomos de dois elementos químicos. O Silício e o Germânio são, atualmente, os semicondutores intrínsecos mais conhecidos, porém existem também alguns compostos orgânicos, como por exemplo o poliacetileno $(\text{C}_2\text{H}_2)_n$, que também apresenta propriedades de semicondutor. O Silício é o principal semicondutor intrínseco utilizado para a construção de dispositivos eletrônicos, e pode ser encontrado em abundância na natureza, pois, é o principal constituinte da areia do mar. Contudo, existem outros materiais semicondutores que são sintetizados em laboratório [Lan03].

7.1.1 Semicondutor intrínseco

A estrutura cristalina dos semicondutores estabelece bandas de energia nas quais os eletrões podem permanecer, devido à interação com o núcleo, ou estarem livres no material (figura 7.1). No átomo, a

banda de valência é a banda de orbitais de elétrons de onde os elétrons podem emigrar para a banda de condução quando são excitados. Na banda de valência os elétrons estão na camada externa dos átomos e são os responsáveis pelas ligações covalentes. A banda seguinte é a banda de condução onde os elétrons se movem livremente, estando estas duas bandas de energia separadas pela banda proibida, cujo valor é igual à diferença entre os valores de energia da banda de condução e a energia da banda de valência como indicado na equação 7.1 [Dal12].

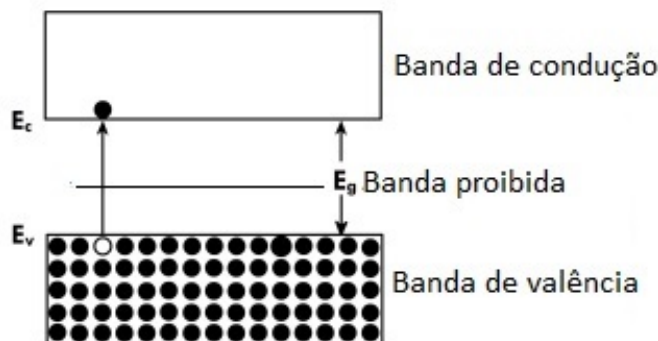


Figura 7.1: Bandas de energia do semicondutor.
Adaptado de [Dal12].

$$E_g = E_c - E_v \quad (7.1)$$

onde E_g é a energia da banda proibida, E_v e E_c são respetivamente, os limites da banda de valência e da banda de condução.

O Silício e o Germânio, os semicondutores intrínsecos, são encontrados no grupo 14 da tabela periódica dos elementos químicos. Isso significa que todos eles têm apenas 4 elétrons de valência que estão disponíveis para se ligar na camada mais externa. Por possuírem esses quatro elétrons, os elementos considerados no grupo 14 podem formar estruturas que são formadas por inúmeros átomos daquele elemento em particular. Essas estruturas são chamadas de estruturas reticuladas. Quando os elétrons se unem para formar estruturas reticuladas, todos os elétrons são usados para criar a estrutura de ligação covalente, não deixando elétrons livres que possam transportar qualquer corrente disponível. Por causa dessa estrutura, um semicondutor intrínseco depende de diferentes mecanismos para transportar a corrente. Isso se deve ao facto de não possuírem nenhum tipo de dopagem, ou impureza que pudesse criar mais elétrons [ASA11].

À temperatura de zero Kelvin estes semicondutores intrínsecos têm a banda de valência totalmente preenchida e a banda de condução vazia, neste caso, o semicondutor age como um isolador. À medida que se eleva a temperatura e devido aos baixos valores de energia da banda proibida, uma parte da energia térmica é transferida aos elétrons que, por excitação térmica, migram da banda de valência para a banda de condução convertendo-se em portadores de carga. Os elétrons ao passarem da banda de valência para a banda de condução deixam lacunas na zona de valência, sendo que estas lacunas agem como portadores de carga positiva. Sob ação de um campo elétrico, as lacunas deslocam-se em sentido contrário ao sentido dos elétrons, deste modo, os elétrons e as lacunas formam um par de portadores de carga elétron-lacuna, que são os responsáveis pela condutividade elétrica no material semicondutor. A densidade de elétrons na banda de condução (n_e) e a densidade de lacunas na banda de valência (n_p) são calculados pelas equações 7.2 e 7.3, respetivamente [ASA11].

$$n_e = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{K_B T}\right) \quad (7.2)$$

$$n_p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{K_B T}\right) \quad (7.3)$$

onde N_C e N_V são, respetivamente as densidades de estados efetivas da banda de condução e da banda de valência, apresentados respetivamente pelas equações [7.4](#) e [7.5](#).

$$N_C = 2\left(\frac{m_e^* K_B T}{2\pi \hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (7.4)$$

$$N_V = 2\left(\frac{m_p^* K_B T}{2\pi \hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (7.5)$$

onde m_e^* e m_p^* são as massas efetivas do eletrão e da lacuna, respetivamente, K_B é a constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K), T é a temperatura absoluta, E_F é a energia de Fermi e \hbar é a constante de Plank (6.63×10^{-34} J.s).

Num semiconductor intrínseco, o nível de Fermi, que representa o trabalho médio realizado para remover um eletrão do material (função de trabalho), está localizado próximo do centro da banda proibida (equação [7.6](#)). De acordo com o nível de Fermi a probabilidade de um eletrão ocupar a banda de condução é igual a 0.5, por isso, num semiconductor intrínseco a concentração de eletrões é igual à concentração de lacunas [\[Böe92\]](#).

$$E_{F_i} = \frac{E_C + E_V}{2} \quad (7.6)$$

E_{F_i} é a energia do nível de Fermi para um semiconductor intrínseco.

O n_i é a concentração dos portadores intrínsecos. Num condutor intrínseco a concentração de eletrões livres é igual ao número de lacunas. Então, n_i pode ser representada pela equação [\[Dal12\]](#) :

$$n_i = (N_C N_V)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2K_B T}\right) \quad (7.7)$$

Se a um semiconductor intrínseco for adicionada uma impureza na sua estrutura cristalina, verifica-se um aumento dos portadores de carga e, conseqüentemente, da sua condutividade elétrica e este semiconductor é convertido num semiconductor extrínseco.

7.1.2 Semiconductor extrínseco do tipo N

Quando uma impureza pentavalente, por exemplo o fósforo, é adicionada a um semiconductor puro, os seus eletrões formam uma ligação covalente, sendo que o quinto eletrão de valência da impureza fica sem eletrão de ligação e converte-se num eletrão livre. Este tipo de semiconductor extrínseco é chamado semiconductor do tipo N, e o material pentavalente é chamado de impureza doadora (figura [7.2](#)) [\[Böe92\]](#).

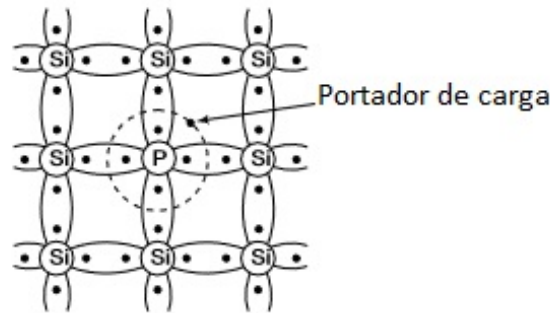


Figura 7.2: Semicondutor do tipo N
Adaptado de [ASA11].

No semicondutor extrínseco do tipo N a energia de Fermi é criada próxima da banda de condução, pelo que os elétrons livres adquirem energia suficiente que lhes permite migrar para banda de condução (equação 7.8). Neste caso os elétrons são os portadores maioritários e as lacunas os portadores minoritários (figura 7.3), [Dal12].

$$E_{Fn} = K_B T \ln\left(\frac{n_e}{n_i}\right) + E_{Fi} \quad (7.8)$$

onde E_{Fn} é a energia de Fermi no semicondutor do tipo N, n_e é a concentração de elétrons na banda de condução, n_i é a concentração de portadores de carga (elétrons e lacunas) e E_{Fi} é a energia do nível de Fermi para um semicondutor intrínseco.

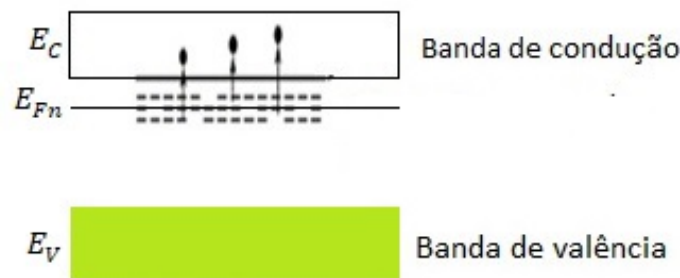


Figura 7.3: Nível de Fermi no semicondutor do tipo N
Adaptado de [ASA11].

7.1.3 Semicondutor extrínseco do tipo P

Os semicondutores do tipo P são formados através da dopagem de semicondutores puros com impurezas trivalentes. O boro também pode ser usado para dopar um cristal puro de silício. Mas, como o boro oferece apenas 3 dos quatro elétrons que um átomo de silício precisa, cada átomo de silício é deixado com uma lacuna (figura 7.4). Assim sendo, as lacunas constituem os portadores maioritários e os elétrons são portadores minoritários, e a impureza é denominada de impureza aceitadora [Böe92]

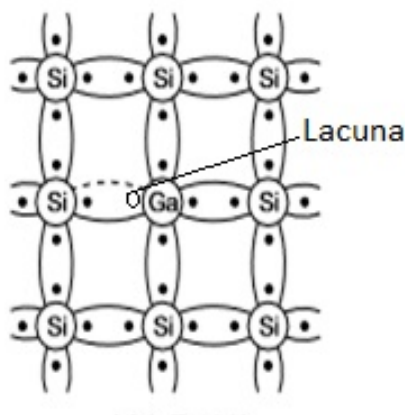


Figura 7.4: Semicondutor do tipo P
Adaptado de [ASA11].

No semicondutor extrínseco do tipo P, a energia de Fermi, E_{F_p} , é criada junto a banda de valência (equação 7.9). Assim, a energia de Fermi é responsável pela absorção dos elétrons na banda de valência, sendo que a condutividade elétrica é feita pelas lacunas (figura 7.5), [Dal12].

$$E_{F_p} = E_{F_i} - K_B T \ln\left(\frac{n_p}{n_i}\right) \quad (7.9)$$

onde n_p é a concentração de lacunas, n_i é a concentração de portadores de carga (elétrons e lacunas) e E_{F_i} é a energia de Fermi do semicondutor intrínseco.

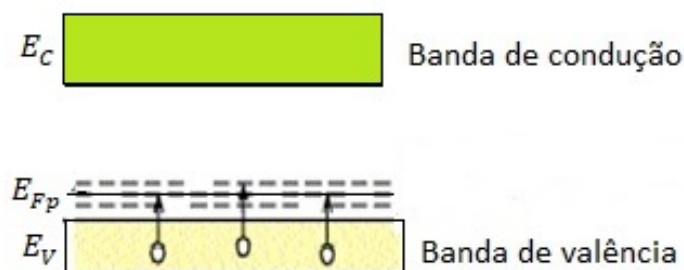


Figura 7.5: Energia de fermi no semicondutor do tipo P
Adaptado de [ASA11].

7.2 Fotodíodos

O fotodíodo é um dispositivo com capacidade de detetar e converter a radiação em corrente elétrica. Existem diferentes tipos de fotodíodos, porém, todos possuem o mesmo princípio básico de funcionamento, baseado na interação da radiação com este material semicondutor. Quando a energia da radiação incidente for maior do que a energia da banda proibida do fotodíodo, a energia absorvida quebra as ligações existentes entre os portadores de carga e, conseqüentemente, há emissão de pares elétron-lacuna, que criam pulsos de sinais elétricos proporcionais à energia da radiação incidente. Portanto, os fotodíodos funcionam por meio da absorção de radiação que resulta na produção de corrente num circuito externo [Mal13].

A aplicação do fotodíodo é feita em dois modos de operação, o modo fotovoltaico e o modo fotocondutor. No modo fotovoltaico, o fotodíodo não é polarizado, desde modo, a tensão é apenas produzida pela radiação que incide no fotodíodo, o que resulta numa tensão não linear e de baixo valor. Por outro lado, o modo fotocondutor é aplicado para aumentar a condutividade elétrica resultando no aumento no número de portadores livres, quando a radiação é absorvida.

Se o fotodíodo, no modo fotocondutor, é polarizado inversamente, verifica-se o aumento da espessura da região de depleção e, uma consequente, diminuição da capacitância da junção pn. A dependência corrente - tensão no fotodíodo, apresentada na figura 7.6, na ausência da radiação incidente, é semelhante a um díodo retificador. Quando o fotodíodo é polarizado diretamente verifica-se um aumento exponencial da corrente. No entanto, se o fotodíodo for polarizado inversamente, surge uma pequena corrente de saturação inversa. Quando há um aumento da tensão até um valor suficientemente elevado, tensão de corte, a junção pn é sobreaquecida e danificada, provocando o aumento brusco da corrente elétrica devido ao curto circuito no fotodíodo. Este fenómeno é conhecido por efeito avalanche. A tensão e a corrente de fuga estão relacionadas através da equação 7.10 [Mal13].

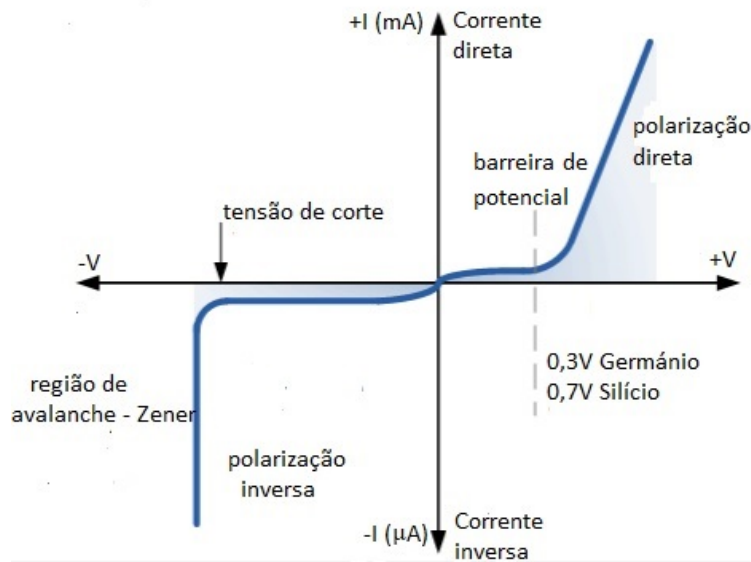


Figura 7.6: Dependência I-V num díodo de junção PN [Tut].

$$I_D = I_{Sat} \left(e^{\frac{qV_A}{k_B T}} - 1 \right) \quad (7.10)$$

onde I_D é a corrente no díodo em função da tensão aplicada, I_{Sat} é a corrente de saturação inversa, V_A é a tensão de polarização aplicada e q é a carga de eletrão (1.60×10^{-19} C).

Existem vários tipos de fotodíodos e todos funcionam com base no mesmo princípio básico, porém, alguns fotodíodos são melhorados para desempenharem tarefas específicas. Estes podem ser classificados com base na sua construção e de acordo com as funções que executam: fotodíodo PN, fotodíodo Schottky, fotodíodo Avalanche e fotodíodo PIN [Mal13].

7.2.1 Fotodíodo PN

O fotodíodo PN é baseado na junção de dois materiais semicondutores, um do tipo p e outro do tipo N, constitui, por isso, o fotodíodo mais básico. O fotodíodo PN sensível a radiação, converte a luz em corrente elétrica, sendo que foi o primeiro a ser desenvolvido e utilizado para a construção de dispositivos eletrônicos. Porém, atualmente, a sua aplicação é reduzida devido ao aparecimento de outros fotodíodos capazes de funcionar com melhor desempenho [Spro3].

7.2.2 Foto díodo PIN

Um díodo PIN é muito semelhante a um díodo PN (uma junção PN), exceto que uma camada intrínseca é colocada entre os materiais semicondutores do tipo p e n. Os fotodíodos PIN são mais utilizados na construção de detetores do que os fotodíodos PN, uma vez que a região intrínseca possui um volume no qual a radiação aumenta a produção de pares elétron – lacuna. O volume da região intrínseca pode ser adaptado para produzir a quantidade de pares elétron – lacuna desejados. A espessura desta região também lhes confere uma menor capacidade que um díodo PN comum. Quando o fotodíodo PIN é diretamente polarizado, comporta-se como uma resistência variável para sinais de alta frequência. Se a polarização for inversa, o fotodíodo atua como um condensador de placas paralelas. Os detetores baseados em silício PIN são utilizados para detectar raios X, espectrometria alfa de baixa resolução e a contagem em bruto de partículas alfas. Portanto, uma das principais aplicações do silício PIN consiste em desenvolver detetores portáteis para monitorizar a radioatividade ambiente [SHTo7].

7.3 Propriedades dos detetores de radiação

As principais propriedades dos detetores de radiação são a sensibilidade, eficiência, resolução, tempo morto, linearidade, ganho e ruído, sendo que estas características são importantes na avaliação do desempenho de qualquer tipo de detetor de radiação [SCP14].

7.3.1 Sensibilidade do detetor

A sensibilidade caracteriza o tipo de radiação capaz de ser detetada por um determinado detetor. Os detetores baseados em semicondutores de estado sólido, por exemplo, são normalmente utilizados para a detenção de partículas alfa a partir de decaimentos radioativos de radionuclídeos, pois estas partículas interagem facilmente com a matéria. Os detetores baseados em cintiladores não são eficazes para detectar partículas alfa, porque a partícula alfa não é capaz de atravessar a cobertura do detetor [BP71].

7.3.2 Eficiência do detetor

Os detetores de radiação dão origem a pulsos de saída para cada quantum de radiação que interage dentro do seu volume ativo. A eficiência total ou absoluta do detetor ε relaciona o número de contagens registadas pelo detetor e o número de radiações emitidas pela fonte radioativa, em todas as direções [AGA14].

$$\varepsilon = \frac{N_c}{N_s} \quad (7.11)$$

onde N_c é o número de partículas detetadas, N_s é o número de partículas emitidas pela fonte radioativa.

A eficiência absoluta depende não só das propriedades do detetor, mas também dos detalhes da geometria de contagem, sobretudo da distância entre a fonte radioativa e o detetor. No caso dos detetores de partículas alfa e beta, a interação na forma de ionização ou excitação ocorrerá imediatamente após a entrada da partícula no volume ativo do detetor. Depois de percorrer uma pequena fração do seu alcance, uma partícula típica formará pares de iões suficientes, ao longo de seu caminho, para garantir que o pulso resultante seja suficientemente grande para ser gravado pelo detetor. Deste modo, torna-se mais simples criar condições para que um detetor identifique todas as partículas alfa ou beta que entram no seu volume ativo. Nestas condições, o detetor pode atingir uma eficiência intrínseca de contagem de até 100%. A radiação gama e os neutrões, por não possuírem carga elétrica, devem inicialmente produzir uma interação significativa no detetor antes que aconteça a sua deteção. E, devido ao facto da radiação gama e dos neutrões percorrerem grandes distâncias antes da sua interação com a matéria, os detetores apresentam, geralmente, eficiência intrínseca inferior a 100%. Torna-se, por isso, necessário ter um valor constante da eficiência do detetor, para que seja estabelecida uma relação entre o número de pulsos contados com o número de neutrões ou fótons incidentes no detetor [Kno10].

7.3.3 Resolução do detetor

Um dos métodos utilizados pelos detetores de radiação consiste na medição da distribuição das energias da radiação incidente. Este método é denominada espectrometria. Uma propriedade importante de um detetor em espectrometria consiste na distribuição de energia e na resposta do detetor a uma fonte radioativa mono energética. Portanto, a resolução de energia de um detetor R , de acordo com a equação 7.12 e figura 7.7, é calculada através da largura total de um determinado pico de energia a metade da altura máxima (FWHM) e da energia correspondente, E_0 . Os detetores de radiação são construídos com o objetivo de possuírem alta resolução de energia. Uma alta resolução de energia favorece a separação de dois picos de energia adjacentes, o que permite identificar, com precisão, diferentes radionuclídeos através do espectro de energia [Kno10, AGA14].

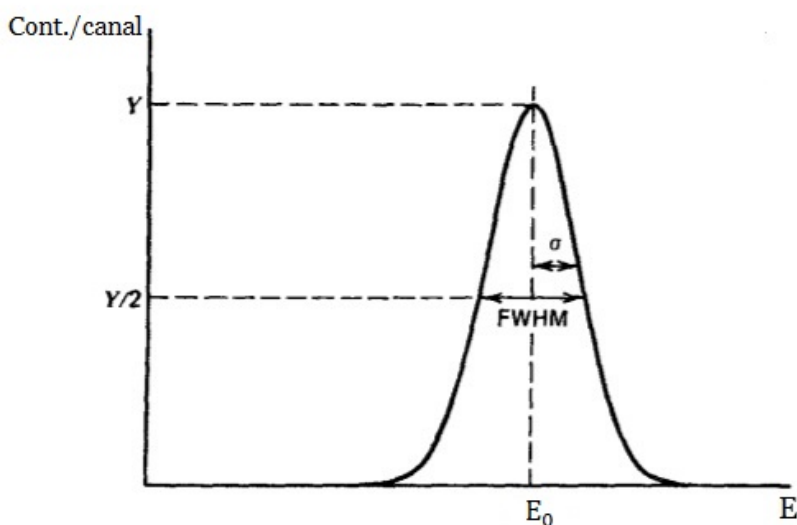


Figura 7.7: Resolução de energia em função do número de contagens por canal. σ é o desvio padrão. Adaptada de [Kno10]

$$R = \frac{FWHM}{E_0} \quad (7.12)$$

A resolução de energia é uma fração adimensional, convencionalmente expressa em percentagem. Os detetores de díodos semicondutores utilizados na espectrometria alfa apresentam uma resolução de energia menor que os cintiladores utilizados em espectrometria gama [AGA14].

7.3.4 Tempo morto

O desempenho dos detetores de radiação está também associada ao tempo que este leva para lidar com um determinado evento inicial e não poder lidar com quaisquer novos eventos. Em quase todos os sistemas de detetores, haverá um período mínimo de tempo que deve separar dois eventos para que eles sejam registados como dois pulsos separados e independentes. O tempo mínimo de separação para detecção adequada dos eventos no detetor é chamado de tempo morto [SCP14].

Em alguns casos, o tempo morto é determinado por processos no próprio detetor, mas na maioria dos casos o tempo morto surge da eletrônica associada. Devido à natureza aleatória do decaimento radioativo, sempre há alguma probabilidade de que um evento verdadeiro seja perdido porque ocorre muito rapidamente após um evento anterior. Essas "perdas de tempo morto" podem se tornar bastante graves quando altas taxas de contagem são encontrados, e quaisquer medições de contagem precisas feitas sob essas condições deve incluir alguma correção para essas perdas. Assim, há necessidade de correção em três níveis diferentes; primeiro, para as perdas internas inerentes ao próprio detetor, em segundo lugar, para as perdas geradas pelo circuito do sistema e, por último, para o analisador multicanal, ou seja, a conversão e armazenamento do sinal analógico para digital [Kno10, UP18].

7.3.5 Linearidade

Se tivermos uma grandeza Y (sinal dado pelo detetor), que é uma função da energia depositada (X), diz-se que há linearidade se $Y = mX + b$. Onde m é um multiplicador que dá a inclinação da reta e b é um coeficiente linear relacionado ao ADC do multicanal [SCP14].

7.3.6 Ganho

Em geral, o ganho é uma medida da capacidade de um circuito eletrónico aumentar a amplitude ou a potência de um sinal. Existem diferentes tipos de ganho, no detetor, pré-amplificador, amplificador, ADC. O ganho num detetor resulta de um processo de multiplicação, por exemplo: multiplicação da carga primária, carga total resultante da interação da radiação no volume sensível do detetor, num processo de avalanche; conversão da energia dos eletrões primários em fótons de cintilação. Portanto, o ganho depende do tipo de detetor. Por exemplo, num tubo fotomultiplicador (PMT) o ganho pode ser da ordem de 10^6 e num contador Geiger-Muller o ganho pode ser maior do que 10^{11} [SCP14].

7.3.7 Ruído

O ruído é qualquer flutuação indesejada que aparece sobreposta a uma fonte de sinal, sendo, por isso, um elemento a ter em atenção na construção de detetores de radiação. Um detetor de radiação de elevado desempenho deve ter um valor alto na relação sinal / ruído [Rad88].

As fontes de ruído podem ser classificadas nas que são paralelas à entrada do sinal e nas que estão em série com a fonte de sinal. As fontes de ruído paralelas ao sinal de entrada incluem a corrente de

entrada no pré-amplificador e as flutuações na corrente de fuga dentro do próprio detetor. A principal origem de ruído num circuito, ocorre no início da cadeia de sinal, onde o nível do sinal é mínimo. O ruído gerado nesse ponto passa pela mesma amplificação que o sinal, enquanto o ruído gerado ao longo da cadeia de sinal é, geralmente, muito menor que o ruído produzido pelo sinal de entrada no amplificador. As fontes de ruído em série envolvem a contribuição do ruído associado às resistências ligadas em série e, também, ao ruído produzido devido a flutuações térmicas nos componentes condutores do circuito eletrónico (ruído de Johnson) [Rad88].

7.4 Construção do protótipo para a medição do radão

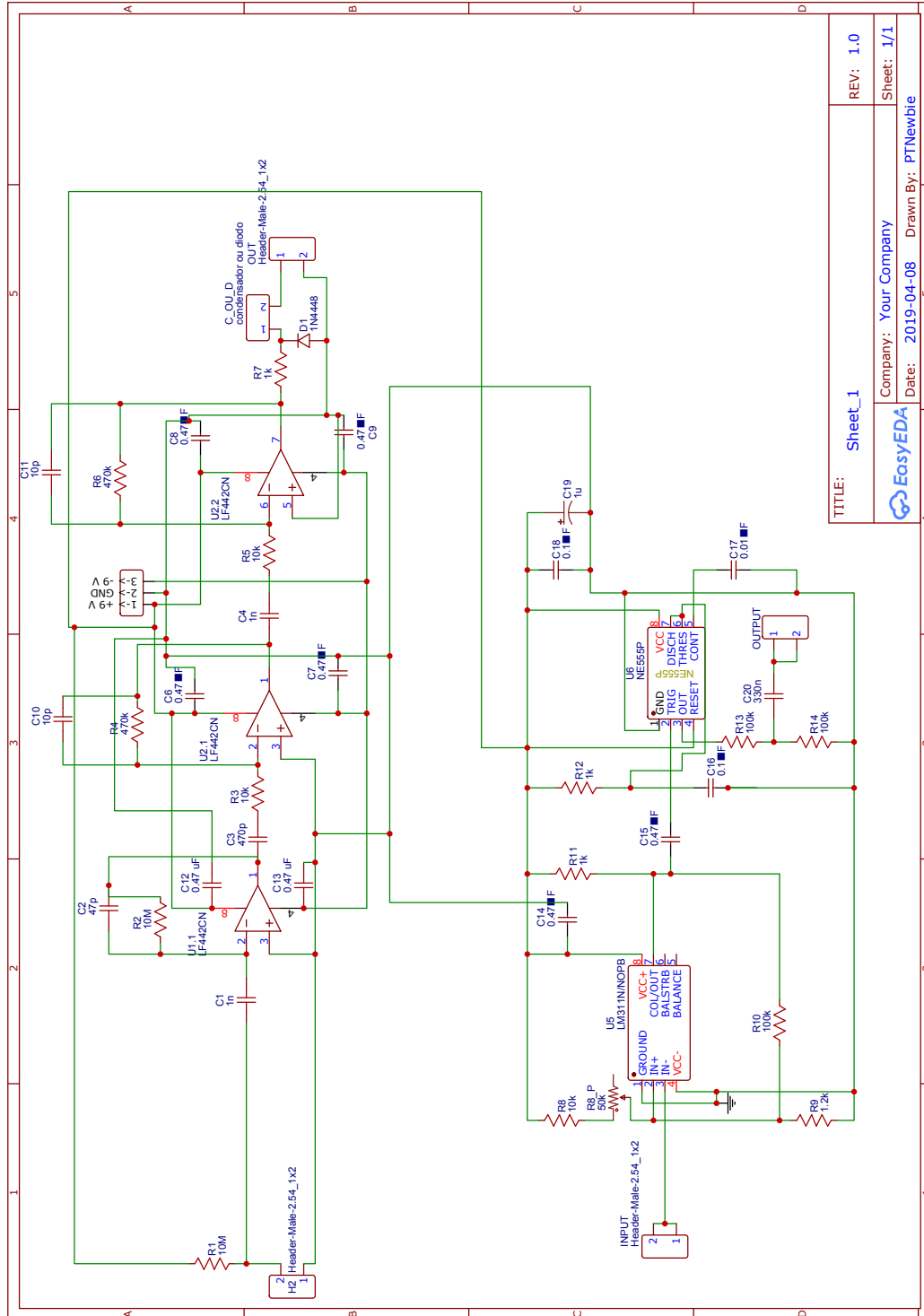
7.4.1 O circuito eletrónico do detetor

O equipamento RAD7 mede a concentração do radão no ar e na água, contudo trata-se de um detetor caro e, por isso, não é fácil a sua aquisição. De forma a ultrapassar o obstáculo económico, neste trabalho foi desenvolvido um protótipo de um detetor ativo de medição para a radão no ar, baseado num fotodíodo de silício PIN. A construção de detetores de radão de baixo custo económico é uma prática que tem despertado um grande interesse na atualidade [RVB⁺08, ŠŠŠ10, AGDR20].

A cadeia de ligação dos diferentes componentes do circuito para a medição do radão é, como se pode ver na figura 7.8, constituída pelos seguintes componentes: fotodíodo, pré amplificador, amplificador, discriminador, temporizador e sistema de contagem. Na figura (apêndice A.1) é apresentado o esquema do circuito eletrónico completo do sistema de medição. O circuito eletrónico do detetor, para a medição do radão, foi construído com o programa EasyEDA, uma ferramenta de acesso livre, que permite projetar, simular diferentes tipos de esquemas de circuitos eletrónicos e placas de circuito impresso (PCB), nos formatos pdf, PNG e SVG.



Figura 7.8: Sistema de medição do radão.



TITLE:	Sheet_1	REV:	1.0
Company:	Your Company	Sheet:	1/1
Date:	2019-04-08	Drawn By:	PTNewbie

Na construção do protótipo para a medição da concentração de radão foi utilizado o fotodíodo SLCD61N2, que possui uma janela ativa de $9.67 \times 9.67 \text{ mm}^2$ e espessura da ordem de $0.1 \mu\text{m}$. Este fotodetector fornece pulsos de saída de pequena amplitude, por isso, é necessário que esteja associado a um sistema de pré amplificação e amplificação do sinal de saída. O fotodíodo possui, na parte superior, um pequeno contacto metálico, o ânodo, que é ligado a um conjunto de pinos na base inferior de suporte. Na parte inferior do fotodíodo, o cátodo foi soldado na mesma base e conectado a outro conjunto de pinos, figura 7.9 [TI18].

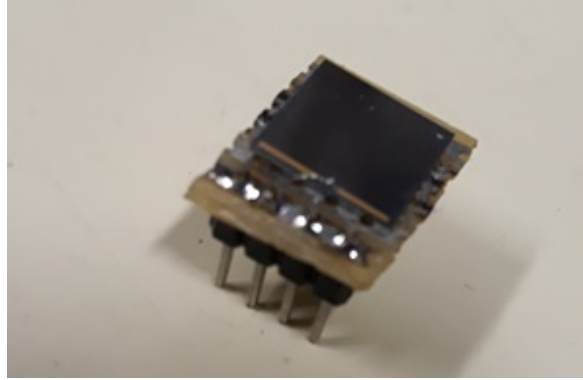


Figura 7.9: Foto díodo SLCD61N2.

No circuito, o fotodíodo foi polarizado inversamente, ligando o cátodo a uma tensão de +9 V e o ânodo foi ligado à massa. A resistência R_1 de $10 \text{ M}\Omega$, resistência de polarização do fotodíodo, limita a corrente inversa. Para o fotodíodo SLCD61N2, a tensão de ruptura é de -20 V . O condensador de acoplamento C_1 separa os sinais da componente contínua de polarização.

Quando a partícula alfa atinge a área sensível do fotodíodo, uma pequena corrente é gerada com amplitude proporcional à energia depositada. Esse sinal de corrente pode ser convertido num sinal de tensão usando um amplificador de transimpedância, conhecido como pré-amplificador sensível à carga [Kno10].

7.4.2 Pré amplificador

O circuito do pré-amplificador implementado neste trabalho é apresentado na figura 7.10.

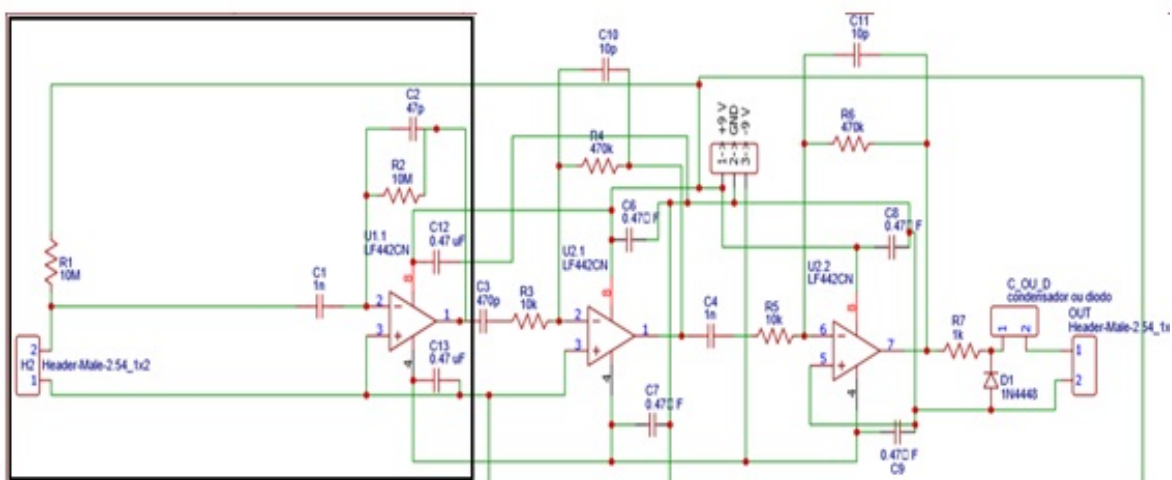


Figura 7.10: Esquema do circuito eletrônico do pré amplificador.

A pré amplificação, do sinal produzido pelo fotodíodo, foi feita por um amplificador operacional com entrada FET de baixa potência, o LF442. O LF442 é um circuito integrado constituído por dois amplificadores operacionais de baixa potência com produto ganho-largura de banda elevado (1MHz). No entanto, no circuito do pré amplificador, foi utilizado apenas um dos amplificadores operacionais do LF442. [TI16]. A tensão de saída do pré-amplificador foi calculada através das seguintes equações:

$$V = \frac{Q_d}{C_f} \quad (7.13)$$

$$Q_d = \frac{E \times e \times 10^6}{\epsilon} \quad (7.14)$$

onde Q_d é a carga total produzida no fotodíodo, C_f é o condensador de realimentação ($C_f = 47$ pF), E é a energia depositada no foto díodo em MeV, e é a carga do eletrão ($e = 1.602 \times 10^{-19}$ C), ϵ é a energia média do par eletrão - lacuna na junção do foto díodo (para o silício $\epsilon = 3.62$ eV) e o valor 10^6 corresponde à conversão da energia de MeV para eV [EI19].

Uma vez que o detetor será exposto a uma atmosfera de radão, a energia máxima depositada no fotodíodo é de 7.69 MeV, correspondente à energia das partículas alfa emitidas no decaimento do ^{214}Po . Deste modo, de acordo com as equações 7.13 e 7.14, a tensão máxima esperada à saída do pré amplificador é da ordem de alguns mV.

Para ter uma conversão sem degradação significativa da relação sinal-ruído intrínseco, o pré-amplificador deve estar localizado o mais próximo possível do sensor e o amplificador operacional usado deve ter um estágio de entrada FET (transistor de efeito de campo) [HH89].

7.4.3 Amplificador

Para aumentar a amplitude do sinal à saída do pré amplificador da faixa de mV para faixas perto de 1 V e para possibilitar a deteção precisa do pulso, foram implementadas duas fases de amplificação. No circuito do amplificador implementado neste trabalho, apresentado na figura 7.11, cada andar de amplificação tem um ganho de 47, perfazendo no conjunto dos dois andares um ganho de 2209. O acoplamento entre amplificadores é feito por condensadores de acoplamento que também funcionam como filtros. Na saída do amplificador, foi colocado um diodo retificador (1N4148) para eliminar a fase negativa do sinal de saída do amplificador.

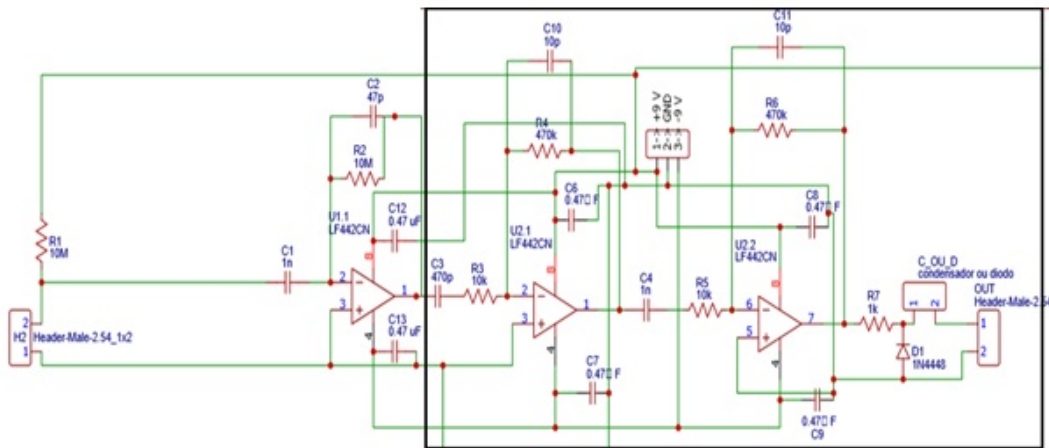


Figura 7.11: Esquema do circuito eletrônico do amplificador.

circuito tenha histerese, impedindo a ativação de múltiplos disparos para um mesmo sinal de entrada. O comparador *Schmitt Trigger* é um tipo de circuito comparador que utiliza realimentação positiva [FB94]. O comparador *Schmitt Trigger* (comparador com histerese) é a designação do circuito que foi implementado no circuito discriminador - comparador *Schmitt Trigger* em montagem inversora. Quando o sinal de entrada está abaixo do valor máximo de discriminação, o sinal de saída é mantido num valor fixo 'alto'. Quando o sinal de entrada é exibido como um valor acima do limite inferior de discriminação, o sinal de saída é enviado para um valor fixo de baixo valor. Para se obter o sinal da diferença entre a tensão de saída máxima (+V) e mínima (0 V), o pino 1 do comparador foi ligado à terra e a resistência R₁₁, de 1 kΩ, foi colocada na saída do discriminador, de forma a manter alta a tensão de saída. Os limiares foram ajustados, experimentalmente, através do reóstato de 50 kΩ, levando em consideração a amplitude do ruído e os sinais de pulso de maior amplitude observada no osciloscópio. As equações 7.15 e 7.16 representam, respetivamente, o limite alto e o limite baixo de discriminação e foram deduzidas a partir das leis de Kirchhoff quando a tensão de saída é +9 V e 0 V, respetivamente.

$$\text{Limite alto} = \frac{R_9}{R_9 + R_{10} // R_8} V_+ \quad (7.15)$$

$$\text{Limite baixo} = \frac{R_{10} // R_9}{R_8 + R_{10} // R_9} V_+ \quad (7.16)$$

onde: +V = 9V.

7.4.5 Temporizador

A última etapa da construção do circuito de detenção de radão consistiu na introdução de um temporizador monoestável com objetivo de criar um pulso de largura constante à entrada do Arduino UNO, como se pode ver no esquema representado na figura 7.14. Este circuito foi implementado com o temporizador LM555 que opera numa configuração monoestável inversa.

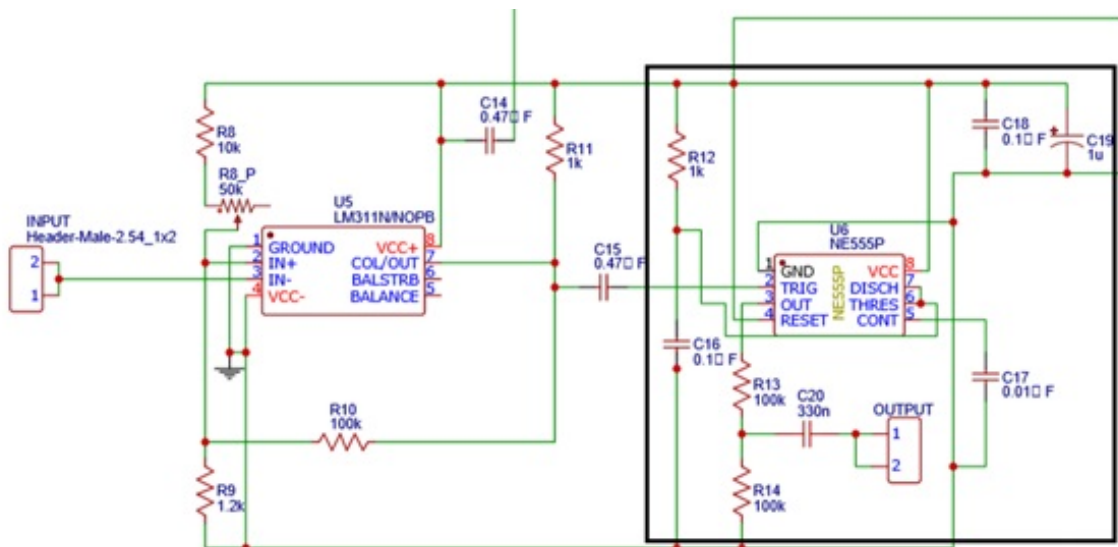


Figura 7.14: Esquema do circuito eletrónico do temporizador.

Quando o sinal de entrada é alto, o gatilho é desativado, portanto, o sinal de saída é mantido próximo de zero; quando o sinal de entrada passa de alto para baixo, o gatilho é ativado e o sinal de saída é mantido próximo à tensão $V+$ ($V+ = 9\text{ V}$). O tempo da largura do pulso de saída, T , é determinado pela equação [7.15]:

$$T = 1.1 R_{12} C_{16} \quad (7.17)$$

Na saída do temporizador foi também colocado um divisor de tensão constituído por duas resistências iguais (R_{13} e R_{14}), de $100\text{ k}\Omega$, ligadas em série, que dividem o sinal de saída por uma fração de $1/2$, uma vez que o Arduino apenas aceita sinais até 5 V . A tensão de operação é direcionada ao pino 3 do microcontrolador Arduino UNO, para a contagem digital dos pulsos.

A partir do esquema do circuito impresso (PCB) foi produzida a placa eletrónica na qual, na camada superior, figuram as ligações entre os diferentes componentes eletrónicos do circuito e cuja camada inferior é essencialmente constituída por um plano de massa (figura 7.15).

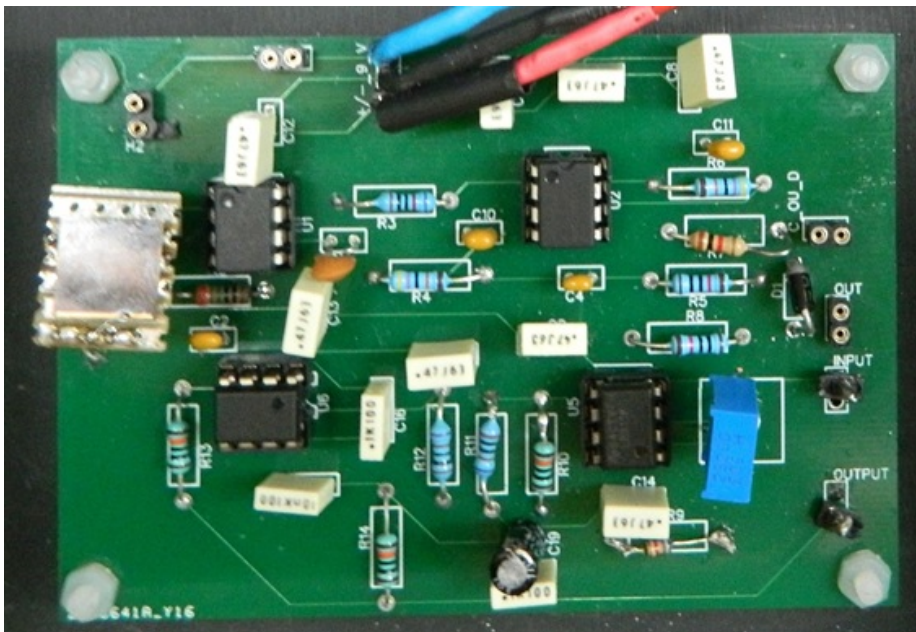


Figura 7.15: Placa do circuito eletrónico.

Para que o circuito ficasse mais protegido e, também, ser minimizada a influência de ruído externo, produzido no meio ambiente, a placa do circuito do fotodíodo e o Arduino Uno, responsável pela contagem de radão, foram colocados numa caixa metálica de alumínio.

7.5 Construção da caixa de proteção eletrónica

Os componentes do circuito foram colocados numa caixa metálica fabricado pela HAMMOND de volume $22 \times 14.5 \times 5.5\text{ cm}^3$ e foram fixados através de furos feitos à medida de cada componente do protótipo (figura 7.16). Para reduzir a reflexão da luz, que poderá entrar pelos orifícios concebidos apenas para a entrada do radão, pintou-se de preto o interior da caixa.



Figura 7.16: Caixa metálica de proteção do circuito eletrônico.

O circuito apresentado, foi inicialmente concebido para ser alimentado por meio de duas pilhas alcalinas, de 4.5 V cada, ligadas em série. No entanto, depois de ser feito o teste, verificou-se que, alimentando o circuito com pilhas alcalinas, o circuito poderia funcionar apenas durante um período menor do que 24 horas devido ao consumo elevado do Arduino. Por isso, achou-se conveniente a construção de uma fonte de alimentação para o funcionamento do circuito de forma ininterrupta quando o circuito é ligado à eletricidade, pese embora que, neste caso, o circuito estaria com menos autonomia.

7.6 A fonte de alimentação do circuito

Uma inovação feita no protótipo para a medição do radão no ar é a possibilidade de poder funcionar também com pilhas alcalinas (figura 7.17). Porém, tendo-se constatado que, usando pilhas alcalinas, o circuito não funcionava por um período superior a 24 horas, contrariamente ao que estava inicialmente previsto, foi construída uma fonte de alimentação, permitindo o funcionamento ininterrupto do circuito quando este é ligado à eletricidade. Contudo, esta alternativa é desvantajosa, pois torna o sistema menos autónomo, em particular se se pretender realizar medições no campo.

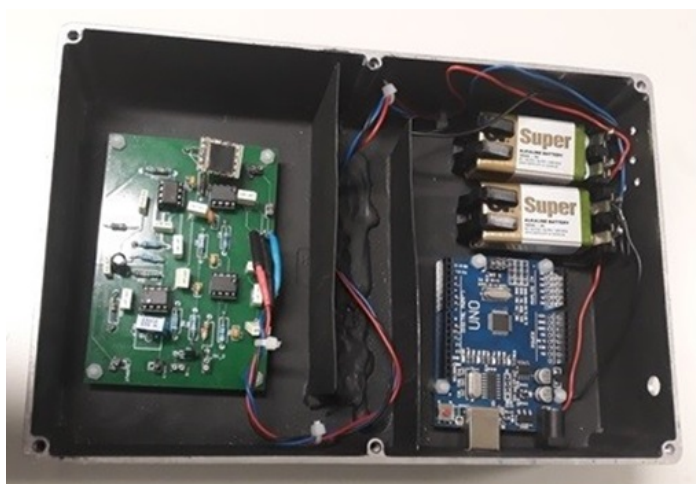


Figura 7.17: Alimentação do circuito com base em pilhas alcalinas de 4.5 V.

Assim, para a alimentação do circuito foi construída uma fonte de alimentação simétrica de 9 V e -9 V, cujo esquema é apresentado na figura (apêndice A.2). Na construção da fonte de alimentação (figura 7.18) foi utilizado um transformador de tensão primária de 230 V AC e tensão secundária de 24 V. À saída da ponte de díodos foi colocado um regulador de tensão positiva fixa (LM317) de 9 V e outro regulador de tensão negativa fixa (LM337), de -9 V, [117]. Na parte exterior anterior foi colocada uma ficha macho de painel, que permite a conexão da fonte de alimentação à eletricidade.

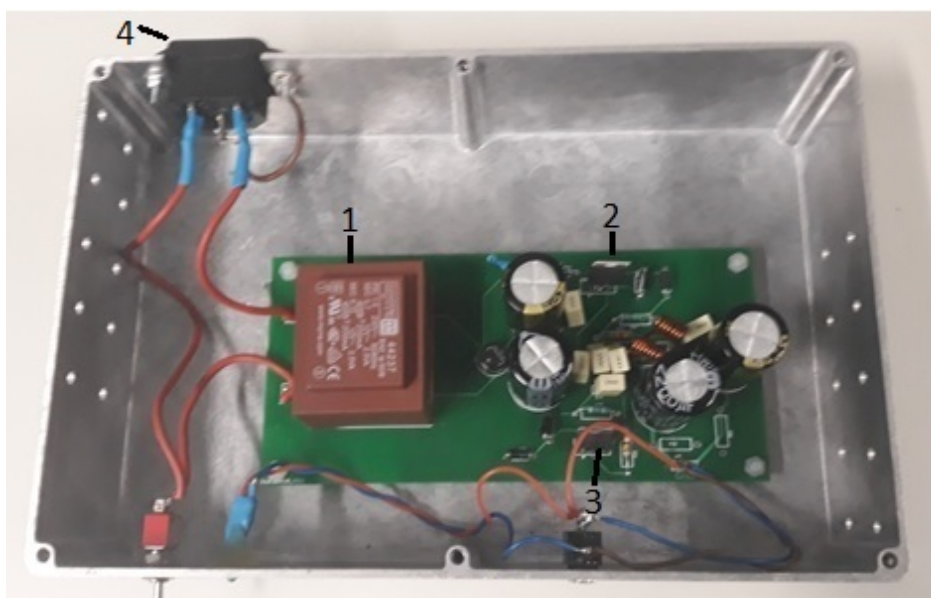


Figura 7.18: Fonte de alimentação. (1) transformador de tensão, (2) e (3) reguladores de tensão e (4) entrada 230 V.

Na parte exterior frontal da fonte de alimentação, foi colocado um led, que permite certificar se a fonte de alimentação é ligada ou desligada da eletricidade e um cabo constituído por dois condutores e uma malha para a saída da tensão que alimenta o circuito do fotodíodo (figura 7.19).

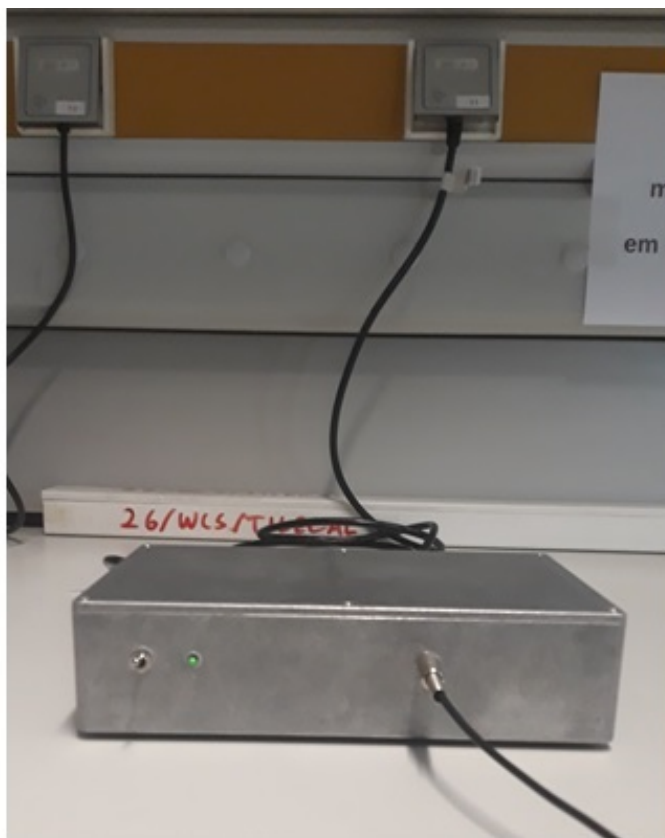


Figura 7.19: Parte exterior frontal da fonte de alimentação.

7.7 Realização de testes ao circuito eletrónico

Os testes ao circuito foram realizados com uma fonte emissora de partículas alfa, ^{241}Am , colocada sobre o fotodíodo. Os sinais do pulso da saída foram observados a partir dos pontos de testes (PT) do amplificador (PT1), do discriminador (PT2) e do temporizador (PT3) e foram visualizados usando um osciloscópio Tektronix TDS2012C, ver figura [7.20](#).

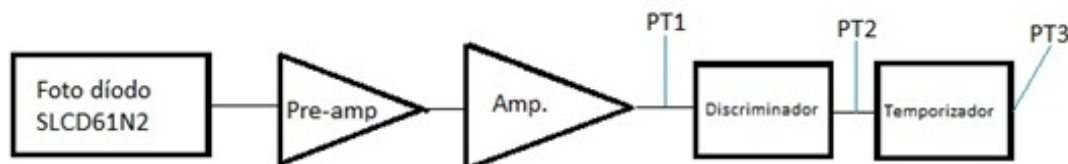


Figura 7.20: Esquema de medição.

Os testes ao circuito foram realizados colocando-o numa caixa de cartão cuja cobertura é facilmente removível, o que permitia fazer alterações nas ligações sempre que fosse necessário, figura [7.21](#). Na ausência da fonte radioativa, à saída do amplificador, no osciloscópio é observada a tensão de 100 mV originada pelo ruído produzido pelo circuito eletrónico, pela radiação de fundo e devido a luz existente no laboratório.

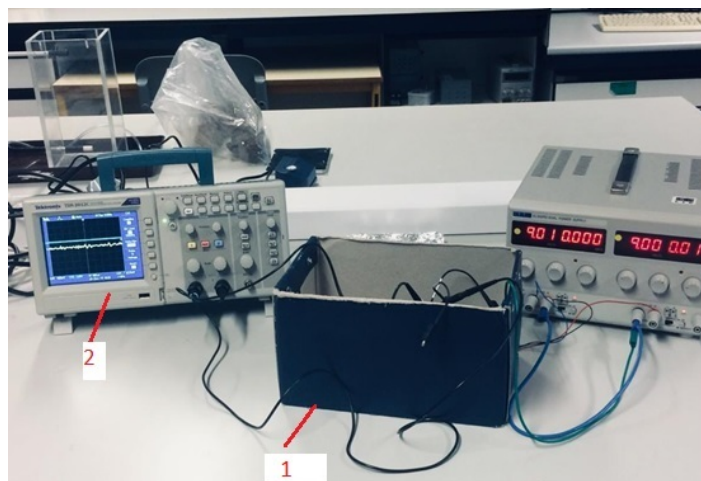


Figura 7.21: Sinal observado na ausência da fonte radioativa. (1) caixa de cartão e (2) osciloscópio.

No entanto, quando a fonte radioativa é colocada no fotodíodo (figura 7.22), no osciloscópio são observados sinais de pulsos a saída do amplificador com tensões superiores a 1 V (figura 7.23).

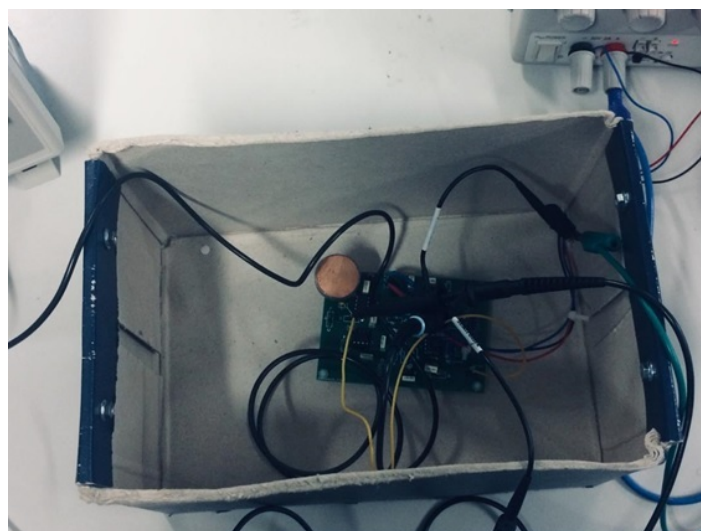


Figura 7.22: A fonte radioativa no detetor.

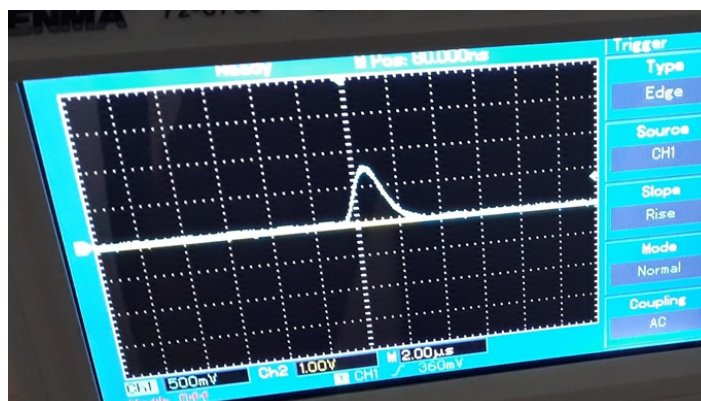


Figura 7.23: Sinal produzido pela fonte radioativa.

Na figura 7.24 pode ver-se a discriminação do sinal quando é alcançada uma tensão superior a 300

mV, à saída do amplificador, suficiente para que o discriminador seja disparado.

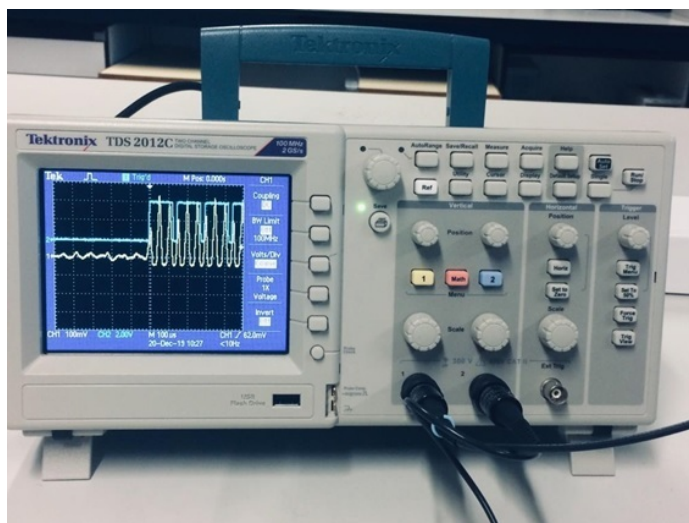


Figura 7.24: Discriminação do sinal.

Uma vez terminados os testes com a fonte radioativa de ^{241}Am , o circuito final e o Arduino Uno foram fixados na caixa metálica (figura 7.25). Foram feitos nove orifícios no lado direito da caixa metálica para a entrada do radão por difusão. O Arduino UNO foi colocado no lado direito do circuito eletrônico e, entre estes dois componentes, foram colocadas duas placas paralelas em forma de labirinto para impedir que a luz proveniente dos orifícios de entrada do radão e a luz produzida pelo *LED* do Arduino UNO, durante a aquisição, atinjam o fotodiodo. O Arduino é alimentado pelo computador com uma tensão de 5 V através da ligação USB.

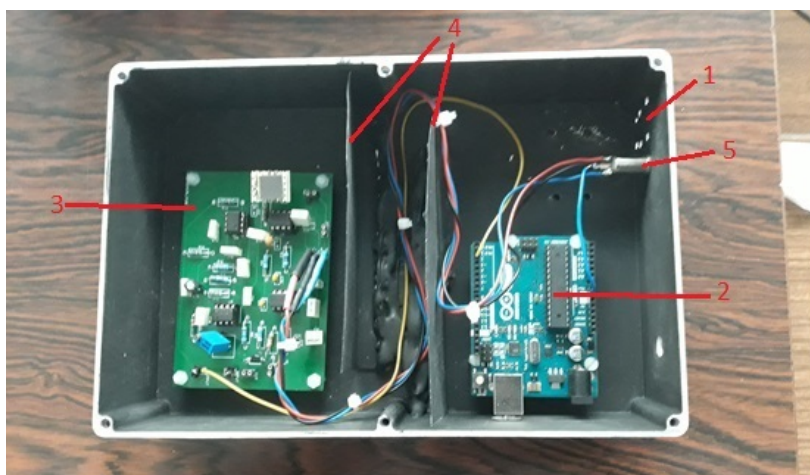


Figura 7.25: Protótipo final para a medição de radão. (1) orifícios para a entrada do radão, (2) Arduino UNO, (3) circuito eletrônico, (4) placas e (5) *jack* fêmea.

Na última etapa da construção do protótipo, para a medição do radão no ar, foi escrito um programa de contagem dos pulsos lógicos, que devem ser acumulados e registado por um período de tempo fixo. Neste trabalho foi utilizado o Arduíno UNO, com a função de contar, armazenar e exibir o número de pulsos digitais detetados, correspondente à interação da partícula alfa no detetor. Para que o Arduíno executasse essas tarefas foi desenvolvido um código que consta no apêndice A.3 desta tese.

A última etapa da construção do protótipo, para a medição do radão no ar, foi o desenvolvimento de um código para a contagem das interações dos descendentes sólidos do radão no foto díodo. Neste trabalho foi utilizado o microcontrolador Arduíno UNO. O código desenvolvido consta no apêndice A.3 desta tese. O código do Arduíno usa um ciclo infinito onde a maioria das ações são programadas. Para que um sinal externo seja controlado, é necessário efetuar um código de interrupção ao microcontrolador. Para esta operação, são utilizados os pinos digitais do Arduíno. O sinal à saída do temporizador é conectado no pino digital 3, na placa Arduíno. Este pino foi configurado como sendo a entrada do sinal usando a função "pinMode ()". O sinal de entrada do Arduíno é um pulso quadrado. A mudança do estado *LOW* para *HIGH* significa uma interação no foto díodo e, como consequência, o Arduíno executa mais uma contagem. Quando nenhum sinal chega ao pino 3 do Arduíno, é feita uma interrupção no microcontrolador. Cada variável de estado *HIGH* é armazenada pela rotina de repetição do Arduíno. Finalmente o número de contagens detetadas são exibidos a cada 10 minutos e o programa reinicia a contagem.

7.7.1 Realização de testes ao protótipo final

O protótipo final foi de seguida testado em condições de laboratório, como se pode ver na figura 7.26, onde a atmosfera de radão era fornecida por uma caixa com rochas com potencial de exalação de radão. O gás difunde-se através de um tubo para uma caixa de acrílico (câmara de teste). O tubo de difusão do gás é conectado a duas válvulas que permitem, ou não, a circulação do radão. O teste final foi realizado colocando a caixa metálica do detetor numa caixa de acrílico, que serve de câmara de acumulação do radão, proveniente da caixa com as rochas, por difusão. A medição do radão foi feita em simultâneo com um outro detetor baseado num fotodíodo S3590-09 da *Hamamatsu* para posteriormente serem analisados e comparados os seus resultados. O monitor foi conectado a um computador para aquisição de dados. O tempo de irradiação foi de cerca de 7 dias. Após esse período, as válvulas foram fechadas e a caixa de teste foi aberta. Por cima da caixa de radão foi colocado um sensor BME280 conectado ao Arduíno UNO para a medição da temperatura, pressão e humidade ambiente.

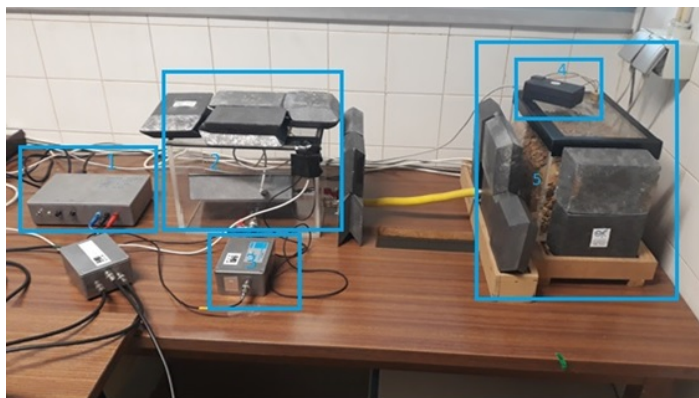


Figura 7.26: Medição do radão no ar. (1) fonte de alimentação, (2) caixa de acrílico, (3) detetor da Hamamatsu, (4) sensor BME280 e (5) caixa de pedras com potencial de exalação de radão.

7.8 Resultados e discussão

7.8.1 Aquisição de dados com o protótipo

A aquisição dos resultados decorreu durante 7 dias de forma ininterrupta. Os resultados da aquisição, feita pelo detetor de radão, foram enviados de 10 em 10 minutos, do Arduino para um ficheiro de texto, usando o programa de acesso livre *PuTTY*. Os resultados obtidos foram utilizados para a construção do gráfico da figura [7.27](#).

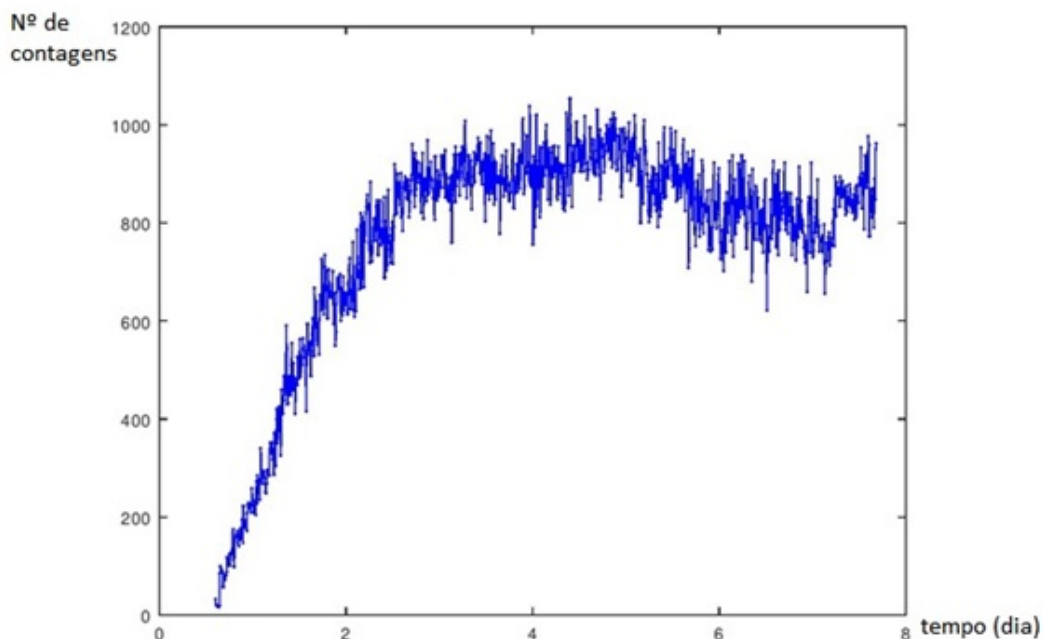


Figura 7.27: Resultado das contagens feitas pelo protótipo durante 7 dias de aquisição.

7.8.1.1 Resultados das contagens com o detetor S3590-09 da Hamamatsu

As contagens do detetor padrão (detetor da Hamamatsu) de partículas alfa, foram obtidas experimentalmente e, juntamente com a aquisição feita pelo Arduino, os resultados permitiram construir o gráfico da figura [7.28](#).

A partir da figura [7.29](#) pode observar-se que, na aquisição feita pelo detetor da Hamamatsu, estão discriminados os picos do ^{210}Po , devido à contaminação do detetor e os picos das energias do ^{218}Po e ^{214}Po , depositados no fotodíodo.

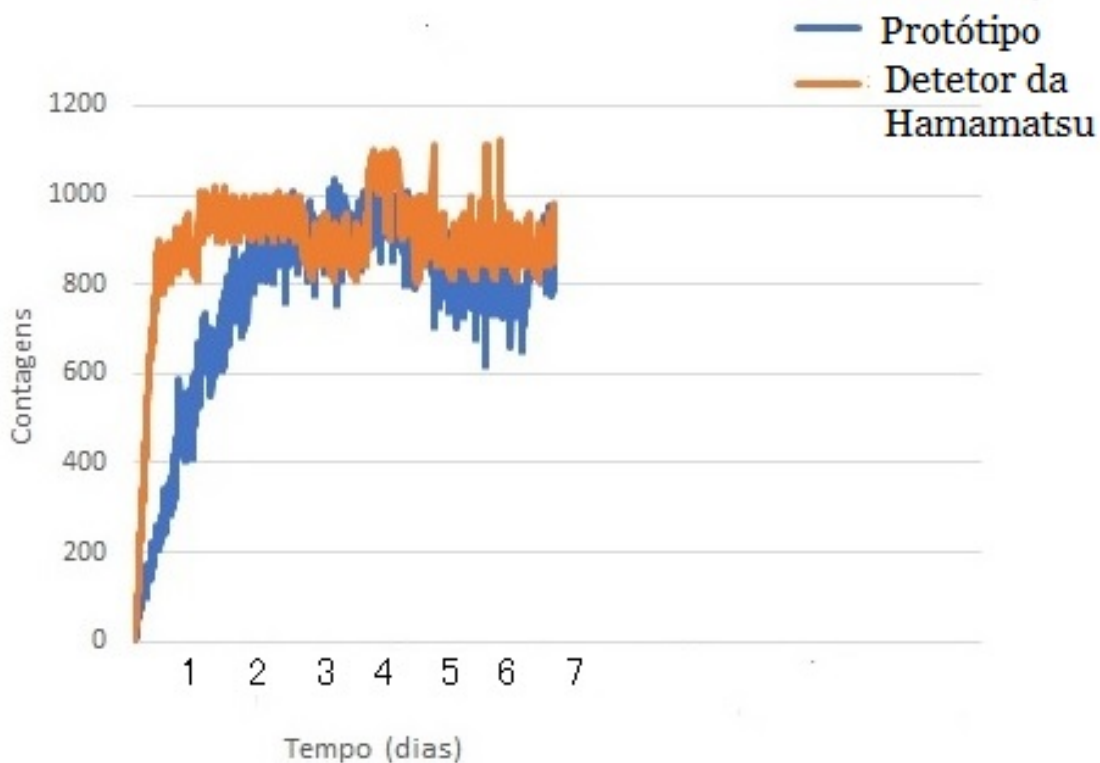


Figura 7.28: Número de contagens feitas pelo do detetor da Hamamatsu e número de contagens feitas pelo protótipo.

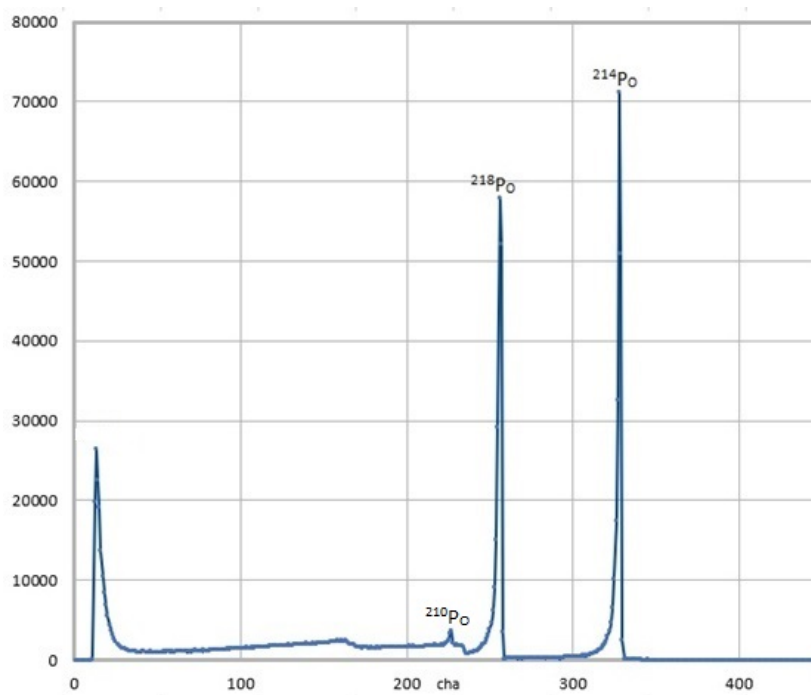


Figura 7.29: Espectro das energias das partículas alfa emitidas pelo ^{210}Po , ^{218}Po e ^{214}Po resultante da exposição do detetor da Hamamatsu uma atmosfera de radão.

7.8.2 Estimativa da concentração de radão com o detetor de iodeto de sódio

Os descendentes do radão ^{214}Bi , ^{214}Po e ^{218}Po atingem o equilíbrio secular ao fim de poucas horas [Chao8]. Deste modo, a concentração de radão na caixa do detetor pode ser estimada por meio das contagens do ^{214}Bi obtidas com um detetor cintilador de iodeto de sódio, NaI(Tl).

Na figura 7.30, é apresentada a configuração experimental implementada para se estimar a concentração de radão na caixa acrílica de acumulação (figura 7.26). Para se estimar a concentração de radão no ar, a técnica utilizada foi a espectroscopia gama (radiação gama emitida pelo ^{214}Bi), que constitui uma medição indireta do radão, por meio de um detetor de iodeto de sódio NaI(Tl). O sinal elétrico foi amplificado pelo amplificador *Ortec 575A* e o número de acontecimentos no detetor são apresentados por um analisador multicanal da *Amptek 8000 A*.

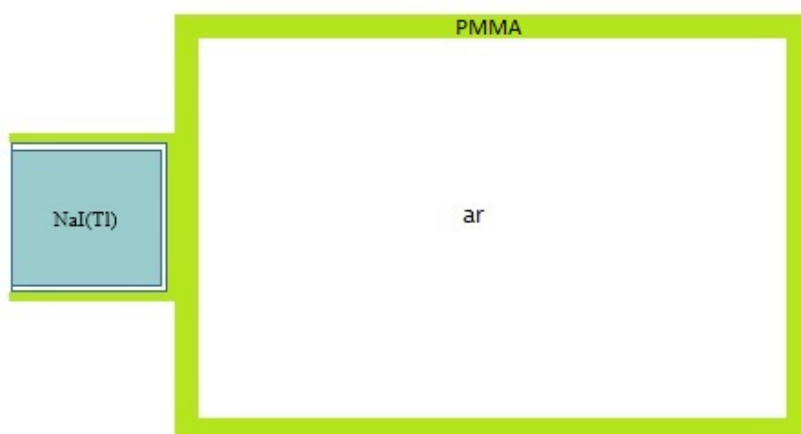


Figura 7.30: Configuração experimental para estimar a concentração de radão.

Na figura 7.31 está representado o espectro obtido com um analisador multicanal *Amptek*, onde é visível o pico devido ao fóton gama de 609 keV proveniente do ^{214}Bi .

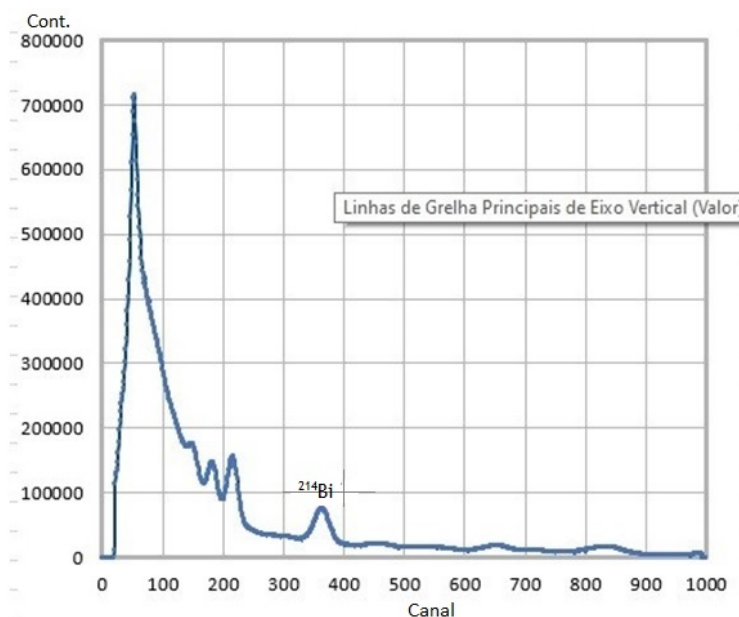


Figura 7.31: Espectro gama obtido com detetor NaI(Tl), onde é visível o pico de 609 keV devido a radiação gama do ^{214}Bi .

A atividade do radão, na caixa de radão de acrílico, pode ser estimada usando a intensidade do pico de 609 keV emitida pelo ^{214}Bi , através da equação:

$$A = \frac{N_{et} - N_{et}(bgd)}{\varepsilon Br t} \quad (7.18)$$

onde N_{et} é o número de acontecimentos no detector obtidos experimentalmente, $N_{et}(bgd)$ é o número de acontecimentos da radiação de fundo obtidos experimentalmente, ε é a eficiência do detector, calculada pela simulação Monte Carlo, t é o tempo de aquisição e Br é a fração de ramificação de decaimento. Para a energia do ^{214}Bi (609 KeV) a fração de ramificação de decaimento é 0.46.

Usando, então, a simulação Monte Carlo (código Penelope), obteve-se uma eficiência de $(7.2 \pm 0.2) \times 10^{-3}$, num total de 10^8 eventos [EP20]. A concentração de radão, estimada para a caixa acrílica, foi da ordem de 10 a 100 kBq m^{-3} ao fim de uma semana de acumulação.

7.9 Medição das variáveis ambientais no laboratório

Como já foi referido, a medição da concentração de radão foi realizada com a monitorização permanente da temperatura, da pressão atmosférica e da humidade relativa do ar no laboratório, e estes resultados são apresentados na figura 7.32. Uma vez que não foram verificadas variações diárias de temperatura, significativas, durante o período de aquisição dos dados, não foi possível correlacionar a variação da concentração de radão na caixa metálica com as variações da temperatura, pressão e humidade relativa.

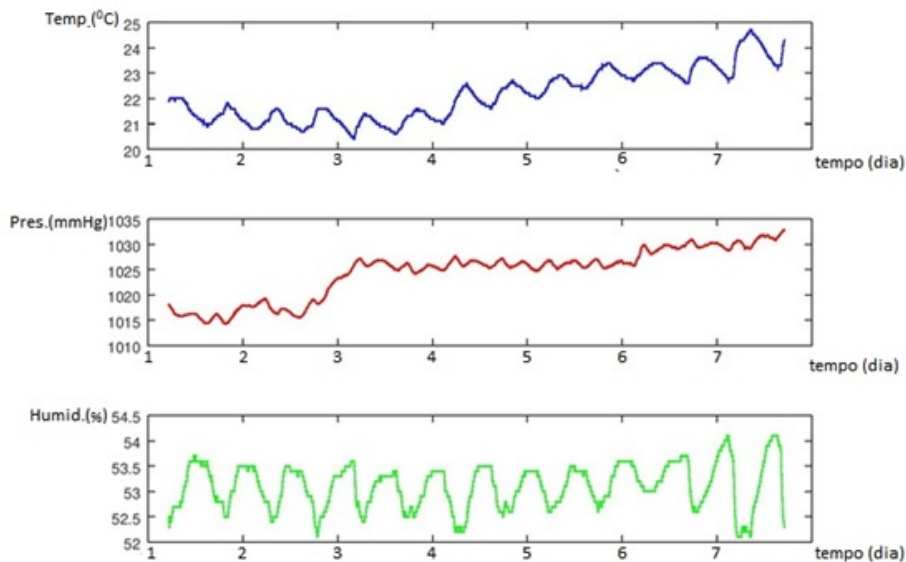


Figura 7.32: Variação da temperatura, pressão e humidade.

Conclusões

Na região sul de Angola, rica em rochas graníticas, têm sido encontrados minerais radioativos, muito dos quais suscitam preocupação ponto de vista radiológico. O município da Bibala, situado na província do Namibe, é caracterizado por uma estrutura geológica granítica contendo urânio, ^{238}U , que apresenta na sua cadeia de decaimento o radão, ^{222}Rn . Este gás radioativo incolor, insípido e inodoro, pode encontrar-se dissolvido na água subterrânea e constituir um risco para a saúde, quando essa água é utilizada para consumo humano. O radão libertado da água para o ar interior constitui um risco ainda maior do que o risco por ingestão.

Em Angola, tanto quanto se sabe, a maioria da população não tem informação sobre a existência do radão e não existem estudos acerca da avaliação da sua concentração na água consumida pela população. Por outro lado, também não existe legislação que estabeleça normas de base relativas à proteção contra perigos resultantes do radão. Todos estes motivos constituíram a principal motivação para a realização deste estudo, que pode ser considerado pioneiro no país.

A avaliação de radão foi realizada em 27 furos de água localizados na sede, no município da Bibala e arredores, de onde foram recolhidas 3 amostras em cada furo, perfazendo um total de 81 amostras analisadas. A recolha das amostras ocorreu no verão dos anos 2017 e 2018. As amostras foram transportadas, por meio aéreo e analisadas 4 dias depois de sua recolha, no laboratório de Estudo dos Efeitos da Exposição ao Radão, localizado no UBIMedical, na cidade da Covilhã, Portugal.

A medição da concentração de radão na água de consumo público do município da Bibala foi efetuada com o equipamento de fabrico americano, RAD7. Este aparelho possui um detetor de estado sólido capaz de medir, em tempo real, a concentração do radão na água, no ar e no solo através das partículas alfa libertadas no decaimento dos isótopos do polónio, ^{218}Po e ^{214}Po , cujas energias são 6.0 e 7.69 MeV, respetivamente. Uma vez que as amostras foram analisadas 4 dias após a recolha, os valores da concentração, obtidos com o RAD7, foram multiplicados pelo fator de correção 2.065, sugerido no manual deste detetor [Inc12].

Os valores das concentrações de radão medidos na água do município da Bibala estão na faixa de 5.3 ± 0.6 a $42 \pm 5 \text{ Bq L}^{-1}$. Os valores são extremamente baixos e tendo em consideração a legislação e recomendações internacionais não representam um risco imediato.

Devido ao facto de não existir legislação Angolana, relacionada com medidas preventivas, em relação à concentração de radão na água de consumo público, os valores obtidos foram comparados com os valores recomendados pela OMS e pela US-EPA. Na sua generalidade esses valores estão abaixo de 100 Bq L^{-1} , o valor recomendado pela OMS [O+09]. No entanto, 17 amostras, recolhidas dos 27 furos de água, apresentam valores acima de 11.1 Bq L^{-1} , o nível máximo de contaminação recomendado pela US-EPA [EPA03]. Com base nos valores obtidos da concentração de radão na água de consumo público, calculou-se a dose anual efetiva por ingestão.

A dose efetiva anual comprometida, devido à ingestão da água do município de Bibala, por faixas etárias, apresentam valores médios de 0.20 mSv a^{-1} , 0.26 mSv a^{-1} , 0.08 mSv a^{-1} , 0.10 mSv a^{-1} , 0.17 mSv a^{-1} e 0.10 mSv a^{-1} para as faixas etárias GI, GII, GIII, GIV, GV e GVI, respetivamente.

Estes cálculos da dose, devido à ingestão de água contendo radão e o valor da taxa anual de consumo de água, foram realizados de acordo com as recomendações da IAEA e do RPII, uma vez que é este o procedimento habitual que vem descrito na maioria dos artigos relacionados. Os fatores de conversão da dose considerados nos cálculos, para bebés, crianças e adultos são os recomendados pela UNSCEAR [O+09, Unso0, FIN, EPA03].

De acordo com estes resultados, verificou-se que, na área de estudo, a dose efetiva total devida ao radão na água é superior aos níveis de dose de referência estabelecidos para o público de 0.1 mSv a^{-1}

sugeridos pelo ICRP para as faixas etárias GI, GII e GV e, todas as amostras, estão acima do nível de referência estabelecido pela UNSCEAR, que sugere que a contribuição, da ingestão de radão na água, para a dose média anual total seja inferior a 0.002 mSv [Wrio8, Unsoc].

Tendo em conta que este se trata de um primeiro estudo, pode afirmar-se que nesta avaliação, os valores da concentração de radão medidos na água não revelam a necessidade para uma ação imediata de prevenção. Contudo, os resultados obtidos neste trabalho preliminar constituem um ponto de partida orientador para as posteriores medições de radão que estão a ser programadas para toda a extensão do município da Bibala e futuramente, em muitos outros pontos do país.

Para melhor identificação da área de estudo e dos locais onde foram recolhidas as amostras, foram construídos, através do sistema SIG [ONB+04], mapas de localização e de distribuição geográfica da concentração de radão nas amostras de água, recolhidas no município da Bibala. No futuro, pretende-se uma melhor divulgação, junto das autoridades angolanas e a elaboração de um projeto cujo principal objetivo seja a medição da concentração de radão no ar e na água consumida pela população em todo país, bem como a construção de um mapa nacional de risco. Para a concretização deste objetivo foi elaborado um projeto submetido à Fundação Aga Khan para se obter financiamento.

Como já foi referido, este é o primeiro estudo realizado em Angola que visou a avaliação da concentração de radão na água. Devido ao facto de ser um assunto ainda novo e, por isso, praticamente desconhecido, a sua investigação é de extremo interesse. No entanto, um dos principais problemas é a não existência de equipamentos para a medição do radão. Devido a este facto, e com o objetivo de se tentar colmatar este problema, um dos trabalhos desta tese, foi também, a realização de um estudo de viabilidade e a construção de um protótipo para a medição da concentração de radão no ar [El□19].

A construção do protótipo foi feita com base em componentes de baixo custo financeiro e, por isso, poderá ser facilmente reproduzido em Angola. O protótipo é constituído essencialmente por um fotodíodo SLCD-61N5, que possui uma área sensível, a radiação alfa, de $9.67 \times 9.67 \text{ mm}^2$. O circuito e os seus componentes foram colocados numa caixa metálica de alumínio, construída de forma a permitir a entrada de radão por difusão e cujo interior foi pintado com tinta preta para evitar que a luz chegasse até ao fotodíodo. A atmosfera de radão foi produzida numa câmara com rochas contendo urânio e foi acumulada numa câmara de acrílico no interior da qual foi colocado o protótipo. A difusão de radão foi feita através de um tubo de borracha.

Antes de ser introduzido na atmosfera de radão, o detetor foi previamente testado com uma fonte radioativa de ^{241}Am . Uma vez que a energia das partículas alfa emitidas no decaimento do ^{241}Am é menor do que a energia das partículas alfa emitidas pelo decaimento dos descendentes sólidos do radão, pode-se concluir que o número de contagens obtidos é devido às energias de 6.0 e 7.69 MeV das partículas alfa libertadas pelo ^{218}Po e ^{214}Po , respetivamente.

Como o protótipo é sensível apenas a partículas alfa, sem discriminação das energias que interagem no fotodíodo, não foi calculada a resolução do detetor. O tempo morto do detetor foi definido pela função *delay* no Arduíno Uno, sendo que foi fixado um intervalo de tempo de 100 ms para a contagem de dois eventos consecutivos. Num total de 10^8 eventos simulados, a eficiência do detetor de iodeto de sódio $(7.2 \pm 0.2) \times 10^{-3}$ foi calculada através da simulação Monte Carlo (código Penelope), o que permitiu estimar a concentração de radão da ordem de 10 a 100 kBq m^{-3} ao fim de uma semana de acumulação.

Tendo-se constatado que, usando pilhas alcalinas, o circuito não funcionava por um período superior a 24 horas, contrariamente ao que estava inicialmente previsto, foi construída uma fonte de alimentação, permitindo o funcionamento ininterrupto do circuito quando este é ligado à eletricidade. Contudo, esta alternativa é desvantajosa, pois torna o sistema menos autónomo, em particular se se pretender realizar medições no campo.

Uma vez que o protótipo desenvolvido neste trabalho permite a aquisição do número de contagens,

produzidas pelos descendentes do radão, por unidade de tempo, poderá ser útil em Angola para a identificação primária de zonas onde os teores de radão apresentam valores elevados. Além disso, sendo o autor desta tese professor numa Universidade vocacionada à formação de professores de Física, este protótipo poderá ser utilizado para fins pedagógicos e didáticos, no curso de licenciatura em Ensino da Física, ministrado no ISCED - Huíla.

Como trabalho futuro, pretende construir-se um protótipo baseado num fotodíodo com melhor sensibilidade para a medição do radão libertado diretamente da água. Tal protótipo deverá ser constituído por um mecanismo de aeração para libertar o radão dissolvido na água e um dissecante feito de sulfato de cálcio, para a diminuição do vapor de água contido no ar, antes do radão atingir o detetor através de tubos específicos.

Bibliografia

- [AAB15] Gösta Axelsson, Eva M Andersson, and Lars Barregard. Lung cancer risk from radon exposure in dwellings in sweden: how many cases can be prevented if radon levels are lowered? *Cancer Causes & Control*, 26(4):541–547, 2015. [26](#)
- [AAMo4] A Abbady, Adel GE Abbady, and Rolf Michel. Indoor radon measurement with the lucas cell technique. *Applied Radiation and Isotopes*, 61(6):1469–1475, 2004. [40](#)
- [Abb17] Akbar Abbasi. Levels of radon and granite building materials. In *Radon*. IntechOpen, 2017. [31](#)
- [ABdMzM15] António Armando, Mary Clarisse Bozzetti, Alice de Medeiros Zelmanowicz, and Fernando Miguel. The epidemiology of cancer in Angola—results from the cancer registry of the national oncology centre of Luanda, Angola. *ecancermedicalscience*, 9, 2015. [1](#)
- [AGA14] I Akkurt, K Gunoglu, and SS Arda. Detection efficiency of Na(Tl) detector in 511–1332 keV energy range. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2014, 2014. [73](#), [74](#), [75](#)
- [AGDR20] Alberto Alvarellos, Marcos Gestal, Julián Dorado, and Juan Ramón Rabuñal. Developing a secure low-cost radon monitoring system. *Sensors*, 20(3):752, 2020. [76](#)
- [AGDYo6] Meetu Agarwal, SK Gupta, RD Deshpande, and MG Yadava. Helium, radon and radiocarbon studies on a regional aquifer system of the north Gujarat–Cambay region, india. *Chemical Geology*, 228(4):209–232, 2006. [28](#)
- [Age12] US Environmental Protection Agency. A citizen’s guide to radon. the guide to protecting yourself and your family from radon, 2012. [26](#), [33](#)
- [AGNM17] Anthony Kwesi Selorm Amable, Banini Kwaku Godsway, Rudolf Anyoka Nyaaba, and Eric Naab Manson. A theoretical study of stopping power and range for low energy (< 3.0 MeV) protons in aluminium, germanium, lead, gold and copper solid materials. *Open Science Journal*, 2(2), 2017. [15](#)
- [AHGo9] Nalini P Anand, Karen J Hofman, and Roger I Glass. The globalization of health research: harnessing the scientific diaspora. *Academic Medicine*, 84(4):525–534, 2009. [1](#)
- [APN17] Pascal Acree, Mary Puckett, and Antonio Neri. Evaluating progress in radon control activities for lung cancer prevention in National Comprehensive Cancer Control Program Plans, 2011–2015. *Journal of community health*, 42(5):962–967, 2017. [24](#)
- [App13] J Donald Appleton. Radon in air and water. In *Essentials of medical geology*, pages 239–277. Springer, 2013. [33](#)
- [ASA11] A. Khalid A. Shaheen, W. Zia and M. S. Anwar. Band structure and electrical conductivity in semiconductors. *Mater. Eng.*, pp. 1–26, 2011. [68](#), [70](#), [71](#)
- [Atto8] Frank Herbert Attix. *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. John Wiley & Sons, 2008. [9](#), [18](#)
- [B+12] Juerg Beringer et al. Particle data group. *Phys. Rev. D*, 86(010001), 2012. [21](#), [22](#)

- [Bac93] BB Back. The general radioactive decay law. *Bulletin of the American Physical Society*, 38(2):962–963, 1993. [6](#)
- [Bas16] Mark Baskaran. *Radon: A tracer for geological, geophysical and geochemical studies*. Springer, 2016. [xvii](#), [24](#), [25](#), [27](#), [29](#), [43](#)
- [BC12] B Burghele and C Cosma. Intercomparison between radon passive and active measurements and problems related to thoron measurements. In *Paper presented at the First East European Radon Symposium–FERAS*, 2012. [38](#), [39](#)
- [BCC⁺01] A Barra, S Cimbalo, A Cuiuli, L Franceschi, P Zonta, DE Sytnikov, et al. The concentration of radon in buildings in central-southern Italy: Experimental campaigns and correlation modelling. *WIT Transactions on Biomedicine and Health*, 5, 2001. [30](#)
- [Bei65] Arthur Beiser. Concepts of modern physics. *American Journal of Physics*, 33(8):667–667, 1965. [6](#)
- [Bei94] Arthur Beiser. *Concepts of modern physics*. Tata McGraw-Hill Education, 1994. [8](#)
- [Bic93] H Bichsel. Atomic interactions of charged particles with matter. *Journal de chimie physique*, 90:617–637, 1993. [13](#), [15](#)
- [BLBDRR17] Raquel Barbosa-Lorenzo, Juan M Barros-Dios, and Alberto Ruano-Ravina. Radon and stomach cancer. *International journal of epidemiology*, 46(2):767–768, 2017. [26](#)
- [BMMP17] A Binesh, S Mohammadi, AA Mowlavi, and P Parvaresh. Evaluation of the radiation dose from radon ingestion and inhalation in drinking water. *African Journal of Water Conservation and Sustainability ISSN*, 5(4):201–205, 2017. [52](#)
- [Boc14] F Bochicchio. Protection from radon exposure at home and at work in the directive 2013/59/euratom. *Radiation protection dosimetry*, 160(1-3):8–13, 2014. [44](#)
- [Böe92] Karl W Böer. *Survey of semiconductor physics*. Springer, 1992. [69](#), [70](#)
- [BP71] Roger Blaise and Gerard Peres. High sensitivity radiation detector, February 2 1971. US Patent 3,560,755. [73](#)
- [BPS⁺14] Henryk Bem, Urszula Plota, Marta Staniszewska, Ewa Maria Bem, and Daria Mazurek. Radon (²²²Rn) in underground drinking water supplies of the Southern Greater Poland Region. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 299(3):1307–1312, 2014. [35](#)
- [Bre08] DJ Brenner. Effective dose: a flawed concept that could and should be replaced. *The British journal of radiology*, 81(967):521–523, 2008. [10](#)
- [Bry13] Jeff C Bryan. *Introduction to nuclear science*. CRC Press, 2013. [6](#)
- [C⁺99] National Research Council et al. *Health effects of exposure to radon: BEIR VI*, volume 6. National Academies Press, 1999. [33](#)
- [CAKLo4] JS Cho, Jung Keun Ahn, H-Ch Kim, and DW Lee. Radon concentrations in groundwater in Busan measured with a liquid scintillation counter method. *Journal of environmental radioactivity*, 75(1):105–112, 2004. [35](#)

- [Car81] Heitor Carvalho. Breves considerações de natureza geológica e de cronologia absoluta sobre as rochas do soco antigo (Arcaico) de Angola. *Bol. Soc. Geol. Portugal*, 22:307–314, 1981. [48](#)
- [Car17] Lúcia Maria Alves de Carvalho. Avaliação da concentração do gás radão em moradias graníticas no concelho de Barcelos. Master's thesis, 2017. [34](#)
- [CCM96] Gilberto Camara, Marco A Casanova, and Geovane C Magalhaes. Anatomia de sistemas de informação geográfica. 1996. [66](#)
- [CEF99] SYF Chu, LP Ekström, and RB Firestone. The lund/lbnl nuclear data search, version 2.0, february 1999, 1999. [xvii](#), [13](#), [14](#), [25](#)
- [Chao8] MW Charles. Skin dose from ^{226}Ra contamination: Dose estimation & comments, 2008. [91](#)
- [CKA09] VM Choubey, Naresh Kumar, and BR Arora. Precursory signatures in the radon and geohydrological borehole data for M4. 9 Kharsali earthquake of Garhwal Himalaya. *Science of the total environment*, 407(22):5877–5883, 2009. [28](#)
- [CKM10] Jodie A Christner, James M Kofler, and Cynthia H McCollough. Estimating effective dose for ct using dose–length product compared with using organ doses: consequences of adopting international commission on radiological protection publication 103 or dual-energy scanning. *American Journal of Roentgenology*, 194(4):881–889, 2010. [10](#)
- [CLKP88] Irina Cech, Mengistu Lemma, Charles W Kreitler, and Howard M Prichard. Radium and radon in water supplies from the Texas Gulf Coastal aquifer. *Water Research*, 22(1):109–121, 1988. [35](#)
- [CMDKo8] C Cosma, M Moldovan, T Dicu, and T Kovacs. Radon in water from Transylvania (Romênia). *Radiation Measurements*, 43(8):1423–1428, 2008. [35](#)
- [Dal12] Richard Dalven. *Introduction to applied solid state physics: topics in the applications of semiconductors, superconductors, ferromagnetism, and the nonlinear optical properties of solids*. Springer Science & Business Media, 2012. [68](#), [69](#), [70](#), [71](#)
- [dCdM] Presidência de Conselho de Ministros. Decreto-Lei no 108/2018 de 3 de dezembro da Presidência de Conselho de Ministros. Diário da República: 1.ª série, N.º 232. Lisboa, Portugal. [34](#)
- [dCMo7] Marcia Pires de Campos and Elaine Wirney Martins. Calibration of the solid state nuclear track detector CR-39 for radon measurements. *Associacao Brasileira De Energia Nuclear–ABEN*, 2007. [38](#), [39](#)
- [DCT17] Heitor De Carvalho and Colombo CG Tassinari. Idades do magmatismo granítico da região de Caraculo-Bibala (SW de Angola) e suas implicações na correlação geológica com o cinturão Ribeira no sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 22(1):73–81, 2017. [48](#)
- [DDHE96] EJ Daly, G Drolshagen, A Hilgers, and HDR Evans. Space environment analysis: Experience and trends. In *Environment Modeling for Space-Based Applications*, volume 392, page 15, 1996. [17](#)

- [DFFS04] Joseph S Duval, Lauren E Fukumoto, Joseph M Fukumoto, and Stephen L Snyder. Geology and Indoor Radon in Schools of the Palos Verdes Peninsula Unified School District, Palos Verdes Peninsula, California. *US Geological Survey*, 2004. [24](#)
- [DHD01] S Darby, D Hill, and R Doll. Radon: a likely carcinogen at all exposures. *Annals of Oncology*, 12(10):1341–1351, 2001. [26](#)
- [Dir13] Council Directive. Council Directive 2013/51/EURATOM of 22 October 2013. Laying down requirements for the protection of the health of the general public with regard to radioactive substances in water intended for human consumption. *Official Journal of the European Union*, 7(2013):56, 2013. [33](#)
- [DK06] Tudor Ducasse, S.Girba and A. Kuhn. Distribution map. In *2006 22nd IEEE International Conference on Software Maintenance*, pages 203–212. IEEE, 2006. [66](#)
- [dSM10] Luís Filipe Fernandes da Silva Mendes. Radioatividade de águas subterrâneas em na região de Ponte de Lima- Mestrado em Ordenamento e Valorização de Recursos Geológicos. *UNIVERSIDADE DO MINHO, Escola de Ciências*, 2010. [34](#)
- [EJJ01] B Erlandsson, B Jakobsson, and G Jönsson. Studies of the radon concentration in drinking water from the horst Söderåsen in Southern Sweden. *Journal of environmental radioactivity*, 53(2):145–154, 2001. [35](#)
- [EKC16] N Ekinçi, E Kavaz, and E Cinan. Measurements of indoor 222rn in igdir, turkey with cr-39 detectors. *Asian J Chem*, 28(4):921–926, 2016. [38](#)
- [El□19] Soraia Sofia Clareu Elisio. *Development of an active detector for radon detection in air*. PhD thesis, 2019. [67](#), [79](#), [94](#)
- [EP20] Soraia Elisio and Luis Peralta. Development of a low-cost monitor for radon detection in air. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, page 164033, 2020. [92](#)
- [EPA99] US EPA. Radon in drinking water health risk reduction and cost analysis. *Fed Reg*, 64(38):9560–9599, 1999. [33](#)
- [EPA03] US EPA. Epa assessment of risks from radon in homes. *Office of Radiation and Indoor Air, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC*, 2003. [93](#)
- [FB94] IM Filanovsky and H Baltès. Cmos schmitt trigger design. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 41(1):46–49, 1994. [81](#)
- [FFA+16] Daniel Palacios Fernández, Emidio Fusella, Yininber Avila, Jhonny Salas, Diana Teixeira, Guillermo Fernández, Laszlo Sajo-Bohus, Eduardo Greaves, Haydn Barros, Manuel Bolívar, et al. Soil gas radon and thoron measurements in some venezuelan oil-fields. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 307(1):801–810, 2016. [27](#)
- [FFSS14] Albano VL Ferreira, Mário Fresta, Cristóvão FC Simões, and Maria do Rosário B Sambo. Desafios da educação médica e da investigação em saúde no contexto de angola. *Revista Brasileira de Educação Médica*, 38(1):133–141, 2014. [1](#)
- [Fico8] Carter B Ficklen. *Atoms, radiation and radiation protection*, 2008. [19](#)

- [FIN] IAEA FAO, OECD ILO, and PAHO NEA. Who, 1996. international basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. iaea safety series 115. *International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria*. [xvii](#), [58](#), [93](#)
- [FMC82] RobertL Fleischer and Antonio Mogro-Campero. Radon transport in the earth: a tool for uranium exploration and earthquake prediction. In *Solid State Nuclear Track Detectors*, pages 501–512. Elsevier, 1982. [27](#)
- [Fra13] Aldino Miguel Francisco. *Desafios do Desenvolvimento e do Ordenamento do Território na Província do Namibe (Angola)*. PhD thesis, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, 2013. [48](#)
- [Fri12] H Friedmann. Radon in earthquake prediction research. *Radiation protection dosimetry*, 149(2):177–184, 2012. [28](#)
- [FTB92] MC Faisca, MMGR Teixeira, and AO Bettencourt. Indoor radon concentrations in Portugal-A national survey. *Radiation protection dosimetry*, 45(1-4):465–467, 1992. [34](#)
- [GCKM+20] Anna Grzywa-Celińska, Adam Krusiński, Jadwiga Mazur, Katarzyna Szewczyk, and Krzysztof Kozak. Radon—the element of risk. the impact of radon exposure on human health. *Toxics*, 8(4):120, 2020. [25](#)
- [GWP17] David Robert Grimes, Daniel R Warren, and Mike Partridge. An approximate analytical solution of the bethe equation for charged particles in the radiotherapeutic energy range. *Scientific reports*, 7(1):1–12, 2017. [16](#)
- [Har07] Samir Mohamed Ali Ibrahim Hararah. Investigation of radon pollution in groundwater in the southern part of Gaza Strip-Palestine. *Investigation of Radon Pollution in Groundwater in the Southern Part of Gaza Strip-Palestine*, 2007. [32](#)
- [Has14] Nabil M Hassan. Radon emanation coefficient and its exhalation rate of wasted petroleum samples associated with petroleum industry in egypt. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 299(1):111–117, 2014. [29](#)
- [HBD+00] PK Hopke, TB Borak, J Doull, JE Cleaver, KF Eckerman, LCS Gundersen, NH Harley, CT Hess, NE Kinner, KJ Kopecky, et al. Health risks due to radon in drinking water, 2000. [45](#)
- [HBU+00] A Horvath, LO Bohus, F Urbani, G Marx, A Piroth, and ED Greaves. Radon concentrations in hot spring waters in northern Venezuela. *Journal of environmental radioactivity*, 47(2):127–133, 2000. [35](#)
- [HdB09] Otto Huisman and Rolf A de By. Principles of geographic information systems: an introductory textbook. *ITC Educational Textbook Series*, 1, 2009. [64](#), [65](#)
- [Hea16] Amy Heath. Radiation protection and safety. In *Radiation Therapy Study Guide*, pages 11–16. Springer, 2016. [12](#)
- [Hen94] DB Henschel. Analysis of radon mitigation techniques used in existing us houses. *Radiation Protection Dosimetry*, 56(1-4):21–27, 1994. [43](#)

- [Heq11] João Hequer. *Projecto de implementação do modelo SIG na Administração Municipal de Matala*. PhD thesis, 2011. [64](#)
- [HH89] Paul Horowitz and Winfield Hill. *The art of electronics*. Cambridge Univ. Press, 1989. [79](#)
- [Hig75] Virgil L Highland. Some practical remarks on multiple scattering. *Nuclear Instruments and Methods*, 129(2):497–499, 1975. [17](#)
- [Hub99] JH Hubbell. Review of photon interaction cross section data in the medical and biological context. *Physics in Medicine & Biology*, 44(1):R1, 1999. [15](#)
- [ICR91] ICRP. *ICRP publication 60: 1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Number 60. Elsevier Health Sciences, 1991. [26](#)
- [Inc12] Durrige Company Inc. RAD7-RADH2O Radon in Water Accessory. Owner’s Manual. 2012. [51](#), [52](#), [53](#), [54](#), [93](#)
- [ISA17] M Inácio, S Soares, and P Almeida. Radon concentration assessment in water sources of public drinking of Covilhã’s county, Portugal. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 10(2):135–139, 2017. [35](#)
- [ITMK05] Takeshi Iimoto, Shinji Tokonami, Yasuaki Morishita, and Toshiso Kosako. Application of activated charcoal radon collectors in high humidity environments. *Journal of environmental radioactivity*, 78(1):69–76, 2005. [41](#)
- [Jac96] PC Jackson. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: part 5 compilation of ingestion and inhalation dose coefficients (icrp publication 72), 1996. [58](#)
- [JAM⁺17] Viktor Jobbágy, Timotheos Altzitzoglou, Petya Malo, Vesa Tanner, and Mikael Hult. A brief overview on radon measurements in drinking water. *Journal of environmental radioactivity*, 173:18–24, 2017. [32](#)
- [KDS93] P Kotrappa, JC Dempsey, and LR Steiff. Recent advances in electret ion chamber technology for radiation measurements. *Radiation Protection Dosimetry*, 47(1-4):461–464, 1993. [42](#)
- [KJ93] P Kotrappa and WA Jester. Electret ion chamber radon monitors measure dissolved ²²²Rn in water. *Health physics*, 64(4):397–405, 1993. [42](#)
- [Kno10] Glenn F Knoll. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010. [14](#), [18](#), [39](#), [40](#), [43](#), [74](#), [75](#), [78](#)
- [Koz17] Ján Kozempel. Radon nuclides and radon generators. *Radon*, page 7, 2017. [23](#)
- [KRSS⁺20] Kaitlin Kelly-Reif, Dale P Sandler, David Shore, Mary K Schubauer-Berigan, Melissa A Troester, Leena Nylander-French, and David B Richardson. Radon and cancer mortality among underground uranium miners in the příbram region of the czech republic. *American Journal of Industrial Medicine*, 63(10):859–867, 2020. [26](#)
- [KS10] P Kotrappa and D Steck. Electret ion chamber-based passive radon–thoron discriminative monitors. *Radiation protection dosimetry*, 141(4):386–389, 2010. [42](#)

- [KSBFOO] Zsolt Kasztovszky, László Sajó-Bohus, and Béla Fazekas. Parametric changes of radon ^{222}Rn concentration in ground water in Northeastern Hungary. *Journal of environmental radioactivity*, 49(2):171–180, 2000. [35](#)
- [Kum] Parul Kumar. Detection and measurement of detection and measurement of radioactivity: 3 methods. [43](#)
- [Lan03] Walter Langel. Peter y. yu, manuel cardona, fundamentals of semiconductors; physics and materials properties, 3rd rev. and enlarged edn.(advanced texts in physics)., 2003. [67](#)
- [Law99] RS Lawson. An introduction to radioactivity. *Nuclear Medicine Department, Manchester Royal Infirmary, Manchester*, 1999. [8](#)
- [Lec18] Anton Lechner. Cern: Particle interactions with matter. *CERN Yellow Rep. School Proc.*, 5:47, 2018. [13](#)
- [Leo12] William R Leo. *Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach*. Springer Science & Business Media, 2012. [16](#)
- [LH06] Fred W Leaney and Andrew L Herczeg. A rapid field extraction method for determination of radon-222 in natural waters by liquid scintillation counting. *Limnology and Oceanography: Methods*, 4(7):254–259, 2006. [45](#)
- [LLL⁺44] Lev Davidovich Landau, LD Landau, LDJ Landau, L LanDau, and L Landau. On the energy loss of fast particles by ionization. 1944. [20](#), [21](#)
- [LMP⁺17] Rita Lamas, Mafalda M Miranda, AJSC Pereira, LJPF Neves, N Ferreira, and NV Rodrigues. 3-d distribution of the radioelements in the granitic rocks of northern and central Portugal and geothermal implications. *Journal of Iberian Geology*, 43(1):3–12, 2017. [29](#)
- [Lou13] Alina Rosa Coelho Louro. Da temática do radão na região da Guarda à construção de um modelo microdosimétrico: caso particular do acino pulmonar humano. 2013. [11](#), [10](#)
- [LR85] A Lindmark and B Rosen. Radon in soil gas—exhalation tests and in situ measurements. *Science of the total Environment*, 45:397–404, 1985. [29](#)
- [LR11] Claude Leroy and Pier-Giorgio Rancoita. *Principles of radiation interaction in matter and detection*. World Scientific, 2011. [17](#)
- [MAAB16] M Mohery, AM Abdallah, A Ali, and SS Baz. Daily variation of radon gas and its short-lived progeny concentration near ground level and estimation of aerosol residence time. *Chinese Physics B*, 25(5):050701, 2016. [27](#)
- [Mal13] Arbind Kumar Mallik. Photodiode. *Himalayan Physics*, 4:95–98, 2013. [71](#), [72](#)
- [Man10] Reactor Concepts Manual. Biological effects of radiation. *United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC) Technical Training Center (encontrado em: www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/09.pdf. Acesso: 10/01/13)*, 2010. [5](#)
- [Mar17] F Martins. Estudo de mercado sobre o sector do granito e das rochas ornamentais da República de Angola e seu potencial exportador. *Projecto: AO FED 022/-990 EuropeAid 136709 /IH/SER/AO*, 2017. [48](#)

- [Mato7] João Matos. Geodesia e Sistemas de Referencia. *Notas de aula de*, 2007. [65](#)
- [MCK10] Cynthia H McCollough, Jodie A Christner, and James M Kofler. How effective is effective dose as a predictor of radiation risk? *American Journal of Roentgenology*, 194(4):890–896, 2010. [10](#)
- [MdCeTo7] Governo de Angola Ministério da Ciência e Tecnologias. Lei da energia atômica e nuclear, lei n.º 04/07 de 5 de setembro. *Diário da República*, 2007. [35](#)
- [MdSGo4] Adilson Lima Marques, Wlademir dos Santos, and Luiz Paulo Geraldo. Direct measurements of radon activity in water from various natural sources using nuclear track detectors. *Applied radiation and isotopes*, 60(6):801–804, 2004. [35](#)
- [MGNP10] L Martins, MEP Gomes, L Neves, and A Pereira. Radão e saúde na região de amarante (norte de portugal). 2010. [34](#)
- [MGS04] A Mamoon, MA Gomma, and M Sohsah. Laboratory scale studies on mitigation of high ^{222}Rn concentrations in air and water. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 213:766–769, 2004. [45](#)
- [Milo4] J Miles. Methods of radon measurement and devices. In *Proceedings of the 4th European conference on protection against radon at home and at work. Conference programme and session presentations*, 2004. [37](#)
- [MM88] George W Mushrush and Douglas G Mose. The effect of home construction on indoor radon in Virginia and Maryland. *Environment international*, 14(5):395–402, 1988. [32](#)
- [MMC17] L Masevhe, LM Mavunda, and SH Connell. A general survey of radon concentration in water from rivers in Gauteng, South Africa using a solid-state -detector. 2017. [35](#)
- [MN17] M Malakootian and Y Soltani Nejhad. Determination of radon concentration in drinking water of Bam villages and evaluation of the annual effective dose. *International Journal of Radiation Research*, 15(1):81, 2017. [53](#)
- [MS17] Kyle P Messier and Marc L Serre. Lung and stomach cancer associations with groundwater radon in north carolina, usa. *International Journal of epidemiology*, 46(2):676–685, 2017. [26](#)
- [NI99] VA Nikolaev and Radomir Ilić. Etched track radiometers in radon measurements: a review. *Radiation measurements*, 30(1):1–13, 1999. [38](#)
- [NN] A. M. Jose N. Nikolaiev, F. Prado. Carta geológica de Angola. [49](#)
- [NYo2] D Nikezic and KN Yu. Distributions of specific energy in sensitive layers of the human respiratory tract. *Radiation research*, 157(1):92–98, 2002. [24](#)
- [O⁺09] World Health Organization et al. *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*. World Health Organization, 2009. [26](#), [33](#), [44](#), [60](#), [93](#)
- [ONB⁺04] Tim Ormsby, Eileen Napoleon, Robert Burke, Carolyn Groessl, and Laura Feaster. *Getting to know ArcGIS desktop: basics of ArcView, ArcEditor, and ArcInfo*. ESRI, Inc., 2004. [64](#), [65](#), [66](#), [94](#)

- [oREcmo15] European Society of Radiology (ESR) communications@ myESR. org. Summary of the european directive 2013/59/euratom: essentials for health professionals in radiology. *Insights into imaging*, 6:411–417, 2015. [33](#)
- [Org93] World Health Organization. *Guidelines for drinking-water quality*. World Health Organization, 1993. [60](#)
- [otEoARoo] United Nations. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and effects of ionizing radiation: sources*, volume 1. United Nations Publications, 2000. [59](#)
- [Ott92] James K Otton. *The geology of radon*. Washington: Government Printing Office, 1992. [30](#), [31](#)
- [Phy99] Maria Physicist. Simulation of energy loss straggling. In *Advanced Technology Group Software Technology Park*, 1999. [20](#)
- [PL14] Luis Peralta and Alina Louro. Alfamc: A fast alpha particle transport monte carlo code. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 737:163–169, 2014. [18](#), [21](#)
- [PLM⁺17] A Pereira, R Lamas, M Miranda, F Domingos, L Neves, N Ferreira, and L Costa. Estimation of the radon production rate in granite rocks and evaluation of the implications for geogenic radon potential maps: A case study in Central Portugal. *Journal of environmental radioactivity*, 166:270–277, 2017. [34](#)
- [Pod14] Ervin B Podgoršak. Interaction of charged particles with matter. In *Compendium to Radiation Physics for Medical Physicists*, pages 299–386. Springer, 2014. [16](#)
- [PSŽ⁺14] G Pantelić, M Eremić Savković, M Živanović, J Nikolić, Milica Rajačić, and Dragana Todorović. Uncertainty evaluation in radon concentration measurement using charcoal canister. *Applied Radiation and Isotopes*, 87:452–455, 2014. [41](#)
- [RAB⁺04] R Rusconi, Arianna Azzellino, S Bellinzona, M Forte, R Gallini, and G Sgorbati. Assessment of drinking water radioactivity content by liquid scintillation counting: set up of high sensitivity and emergency procedures. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 379(2):247–253, 2004. [44](#), [45](#)
- [Rad88] Veljko Radeka. Low-noise techniques in detectors. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 38(1):217–277, 1988. [75](#), [76](#)
- [Rado9] UNSCEAR Radiation. Effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, with scientific annexes, 2009. [23](#)
- [RL15] Bernard Ricardo and Paul Lee. Maximizing kinetic energy transfer in one-dimensional many-body collisions. *European Journal of Physics*, 36(2):025013, 2015. [15](#)
- [RM90] Alberto Rotondi and Paolo Montagna. Fast calculation of vavilov distribution. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 47(3):215–223, 1990. [21](#)

- [Ron98] Elaine Ron. Ionizing radiation and cancer risk: evidence from epidemiology. *Radiation research*, 150(5s):S30–S41, 1998. [10](#)
- [RSMCo3] TP Ryan, S Sequeira, L McKittrick, and PA Colgan. Radon in drinking water in Co. Wicklow. A pilot study. Technical report, Radiological Protection Institute of Ireland (Ireland), 2003. [57](#)
- [RVB⁺08] Luigi Rovati, Giovanni Verzellesi, Matteo Bonaiuti, G Batignani, L Bosisio, G-F Dalla Betta, Gabriele Giacomini, Claudio Piemonte, and Nicola Zorzi. Radon alpha-ray detector based on a high-resistivity-silicon bjt and a low-cost readout electronics. In *2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pages 1403–1406. IEEE, 2008. [76](#)
- [SAHJ⁺12] FA Stewart, AV Akleyev, M Hauer-Jensen, JH Hendry, NJ Kleiman, TJ Macvittie, BM Aleman, AB Edgar, K Mabuchi, CR Muirhead, et al. Icrp publication 118: Icrp statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs—threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. *Annals of the ICRP*, 41(1-2):1–322, 2012. [xvii](#), [10](#), [11](#), [12](#)
- [SBo4] Christina E Stringer and William C Burnett. Sample bottle design improvements for radon emanation analysis of natural waters. *Health physics*, 87(6):642–646, 2004. [51](#)
- [SCP14] Joao Seco, Ben Clasio, and Mike Partridge. Review on the characteristics of radiation detectors for dosimetry and imaging. *Physics in Medicine & Biology*, 59(20):R303, 2014. [73](#), [75](#)
- [SCV⁺04] L Colmenero Sujo, ME Montero Cabrera, L Villalba, M Renteria Villalobos, E Torres Moye, M Garcia Leon, R García-Tenorio, F Mireles García, EF Herrera Peraza, and D Sánchez Aroche. Uranium-238 and thorium-232 series concentrations in soil, radon-222 indoor and drinking water concentrations and dose assessment in the city of Aldama, Chihuahua, Mexico. *Journal of environmental radioactivity*, 77(2):205–219, 2004. [35](#)
- [SD16] Ana Sofia Silva and Maria De Lurdes Dinis. Exposição ocupacional ao radão em estabelecimentos termais. 2016. [34](#)
- [SFVA14] C Silva, T Ferreira, F Viveiros, and P Allard. Monitorização dos teores de radão (²²²Rn) no ar interior de edifícios das freguesias das Furnas e Ribeira Quente (Vulcão das Furnas, Açores): avaliação do risco para a saúde pública. *Comunicações Geológicas*, 101, *Especial II*, pages 927–931, 2014. [34](#)
- [SGo7] R. Schumann and Geological. The radon emanation coefficient: An important tool for geologic radon potential. 2007. [29](#)
- [SGOo4] Tomozo Sasaki, Yasuyoshi Gunji, and Takeshi Okuda. Mathematical modeling of radon emanation. *Journal of nuclear science and technology*, 41(2):142–151, 2004. [29](#)
- [Sha00] Gad Shani. *Radiation dosimetry instrumentation and methods*. CRC press, 2000. [8](#)
- [SHTo7] Samichi Srivastava, Rabinber Henry, and Anita Topka. Characterization of pin diode silicon radiation detector. *Journal on Intelligent Electronic Systems*, 1(1):48, 2007. [73](#)

- [Sil05] Antero Ferreira da Silva. A geologia da República de Angola desde o Paleoarcaico ao Paleozóico Inferior. 2005. [48](#)
- [SIY11] Akihiro Sakoda, Yuu Ishimori, and Kiyonori Yamaoka. A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(10):1422–1435, 2011. [29](#)
- [SJRT14] NK Sethy, VN Jha, PM Ravi, and RM Tripathi. A simple method for calibration of lucas scintillation cell counting system for measurement of ^{226}Ra and ^{222}Rn . *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7(4):475–477, 2014. [40](#)
- [SMMV17] Davide Santostasi, Massimiliano Malgieri, Paolo Montagna, and Paolo Vitulo. An experiment on radioactive equilibrium and its modelling using the ‘radioactive dice’ approach. *Physics Education*, 52(4):045023, 2017. [7](#)
- [SMP03] St Stoulos, M Manolopoulou, and C Papastefanou. Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation from building materials in Greece. *Journal of Environmental Radioactivity*, 69(3):225–240, 2003. [31](#)
- [Spro3] Alistair Sproul. Understanding the pn junction. *Solar Cells: Resource for the Secondary Science Teacher*, 2003. [73](#)
- [SRS14] MC Srilatha, DR Rangaswamy, and J Sannappa. Studies on concentration of radon and physicochemical parameters in ground water around Ramanagara and Tumkur districts, Karnataka, India. *Int J Adv Sci Tech Res*, 2(4):641–660, 2014. [35](#)
- [SS97] Daniel D Snow and Roy F Spalding. Short-term aquifer residence times estimated from ^{222}Rn disequilibrium in artificially-recharged ground water. *Journal of environmental radioactivity*, 37(3):307–325, 1997. [28](#)
- [SŠŠ19] Filip Studnička, Jan Štěpán, and Jan Šlégr. Low-cost radon detector with low-voltage air-ionization chamber. *Sensors*, 19(17):3721, 2019. [76](#)
- [STQ⁺95] A Martín Sánchez, F Vera Tomé, RM Orantos Quintana, V Gómez Escobar, and M Jurado Vargas. Gamma and alpha spectrometry for natural radioactive nuclides in the spa waters of Extremadura (Spain). *Journal of environmental radioactivity*, 28(2):209–220, 1995. [44](#)
- [Sub19] Submarino. Papel de parede desenho de pedra marrom autocolante. cód.1498786425. 2019. [30](#)
- [Tch16] A Tchindongo. Estudo de Linha de Base do Sector Económico e Produtivo do Município da Bibala. *Governo de Angola*, 2016. [2](#), [47](#), [48](#)
- [TDR00] D Talbot, J Davis, and M Rainey. Natural radioactivity in private water supplies in Devon. Technical report, Department of the Environment, 2000. [58](#)
- [TDRRPL⁺14] Maria Torres-Durán, Alberto Ruano-Ravina, Isaura Parente-Lamelas, Virginia Leiro-Fernández, José Abal-Arca, Carmen Montero-Martínez, Carolina Pena Álvarez, Francisco Javier González-Barcala, Olalla Castro-Añón, Antonio Golpe-Gómez, et al. Lung cancer in never-smokers: a case-control study in a radon-prone area (galicia, spain). *European Respiratory Journal*, 44(4):994–1001, 2014. [26](#)

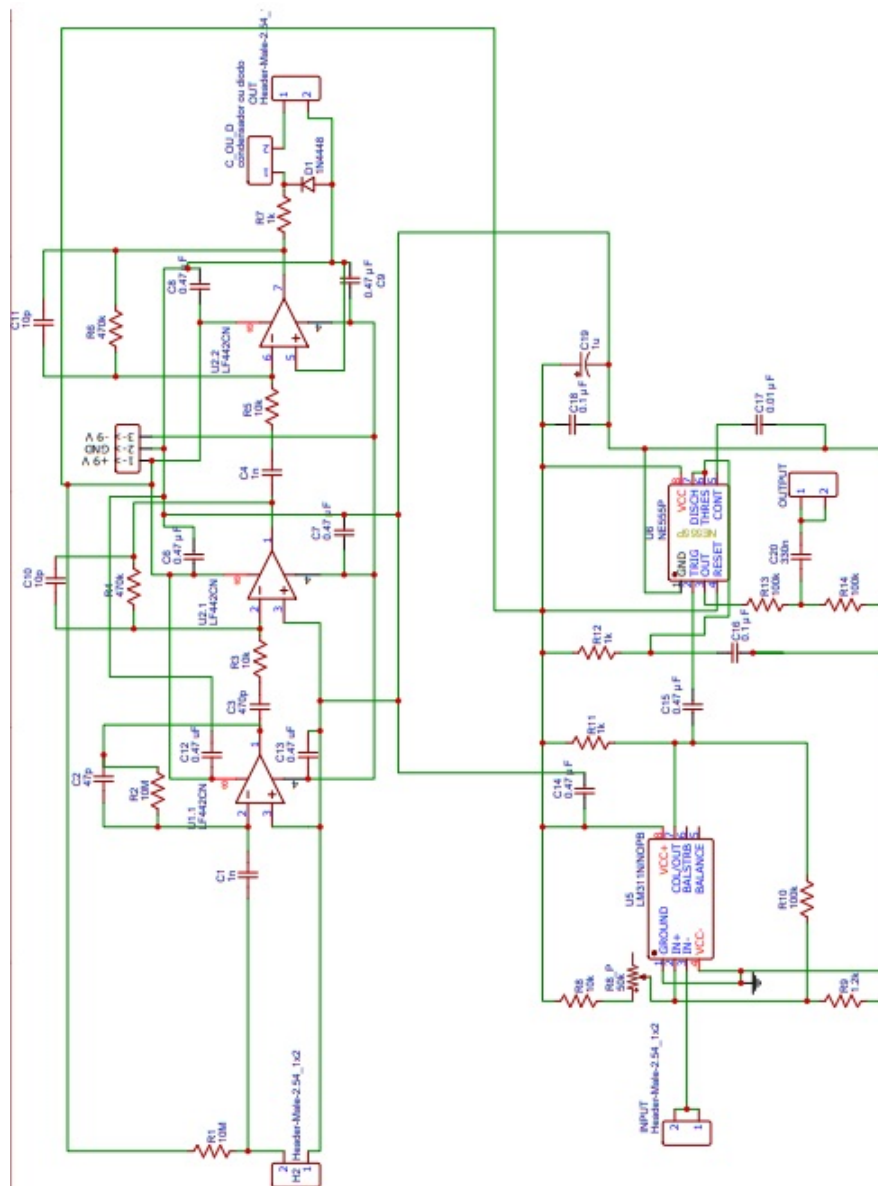
- [TI16] Texas-Instruments. Data-sheet:LF442,Dual Low Power JFET Input Operational Amplifier. 2016. [79](#)
- [TI18] Texas-Instruments. Data-sheet: Solderable Planar Photodiode SLCD-61N2. 2018. [78](#)
- [TI11] Texas-Instruments. . Data-sheet: LM111, LM211, LM311 Differential Comparators. 2017LM311. [80](#)
- [TI17] Texas-Instruments. Data-sheet:LM317 and 337 voltage regulator. 2017LM317. [84](#)
- [TI55] Texas-Instruments. Data-sheet:LM555 timer, revised at 2017. 2017LM555. [82](#)
- [Tom02] L Tomasek. Czech miner studies of lung cancer risk from radon. *Journal of Radiological Protection*, 22(3A):A107, 2002. [xvii](#), [2](#)
- [Tor80] Thomas Torgersen. Controls on pore-fluid concentration of ^4He and ^{222}Rn and the calculation of $^4\text{He}/^{222}\text{Rn}$ ages. *Journal of Geochemical Exploration*, 13(1):57–75, 1980. [28](#)
- [TR09] L Trnkova and P Rulik. Low background shielding of hpge detector. *Applied Radiation and Isotopes*, 67(5):723–725, 2009. [38](#)
- [Turo8] James E Turner. *Atoms, radiation, and radiation protection*. John Wiley & Sons, 2008. [17](#)
- [Tut] Electronics Tutorials. Home / diodes / pn junction diode junction diode symbol and static i-v characteristics. [72](#)
- [UN02] Shuzo Uehara and Hooshang Nikjoo. Monte carlo track structure code for low-energy alpha-particles in water. *The Journal of Physical Chemistry B*, 106(42):11051–11063, 2002. [15](#)
- [UN06] Shuzo Uehara and Hooshang Nikjoo. Monte carlo simulation of water radiolysis for low-energy charged particles. *Journal of radiation research*, 47(1):69–81, 2006. [15](#)
- [uni96] Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 1996 report to the General Assembly, with scientific annex, author=United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation and others. 1996. [58](#)
- [Unso0] Sources Unsear. effects of ionizing radiation. *United Nations, New York*, pages 453–487, 2000. [60](#), [93](#), [94](#)
- [UP18] Shoaib Usman and Amol Patil. Radiation detector deadtime and pile up: A review of the status of science. *Nuclear Engineering and Technology*, 50(7):1006–1016, 2018. [75](#)
- [Vav57] PV Vavilov. Ionization losses of high-energy heavy particles. *Soviet Phys. JETP*, 5, 1957. [10](#), [20](#)
- [Vel11] Patrícia Carvalho Veludo. Efeitos da radiação x e níveis de exposição em exames imagiológicos. *Universidade de Coimbra. Mestrado em saúde pública*, 2011. [10](#)
- [Ves05] Pia Vesterbacka. ^{238}U series radionuclides in finnish groundwater-based drinking water and effective doses. 2005. [45](#)

- [VS13] M Voltaggio and M Spadoni. Determination of ^{222}Rn in water by absorption in polydimethylsiloxane mixed with activated carbon and gamma-ray spectrometry: An example application in the radon budget of Paterno submerged sinkhole (Central Italy). *Applied geochemistry*, 34:65–74, 2013. [44](#)
- [VTH⁺07] P Vesterbacka, T Turtiainen, K Hämäläinen, L Salonen, and H Arvela. Removal of radionuclides from household water. Technical report, Radiation and Nuclear Safety Authority STUK, 2007. [45](#)
- [Wil90] Marvin Wilkening. *Radon in the Environment*. Elsevier, 1990. [23](#), [25](#), [29](#)
- [WMC⁺14] Yun-Yun Wu, Yong-Zhong Ma, Hong-Xing Cui, Jian-Xiang Liu, Ya-Ru Sun, Bing Shang, and Xu Su. Radon concentrations in drinking water in Beijing City, China and contribution to radiation dose. *International journal of environmental research and public health*, 11(11):11121–11131, 2014. [35](#)
- [Wrio8] Anthony D Wrixon. New ICRP recommendations. *Journal of radiological protection*, 28(2):161, 2008. [94](#)
- [WSP⁺90] Mervyn Wong, Walter Schimmerling, Mark H Phillips, Bernhard A Ludewigt, Donald A Landis, John T Walton, and Stanley B Curtis. The multiple coulomb scattering of very heavy charged particles. *Medical physics*, 17(2):163–171, 1990. [22](#)
- [WZMP05] André Wambersie, J Zoetelief, HG Menzel, and H Paretzke. The icru (international commission on radiation units and measurements): its contribution to dosimetry in diagnostic and interventional radiology. *Radiation protection dosimetry*, 117(1-3):7–12, 2005. [9](#)
- [YHMY15] K Yajima, S Hirao, J Moriizumi, and H Yamazawa. Quantitative evaluation of ^{218}Po behaviour in air in an artificial environment. *Radiation protection dosimetry*, 167(1-3):130–134, 2015. [27](#)
- [YIT⁺05] Y Yasuoka, T Ishii, S Tokonami, T Ishikawa, Y Narazaki, and M Shinogi. Radon anomaly related to the 1995 kobe earthquake in japan. In *International Congress Series*, volume 1276, pages 426–427. Elsevier, 2005. [28](#)
- [Zhu98] Ren-yuan Zhu. Radiation damage in scintillating crystals. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 413(2-3):297–311, 1998. [41](#)
- [ZLL⁺11] Xiaodong Zhang, Wei Liu, Yupeng Li, Xiaoqiang Li, Michelle Quan, Radhe Mohan, Aman Anand, Narayan Sahoo, Michael Gillin, and Xiaorong R Zhu. Parameterization of multiple bragg curves for scanning proton beams using simultaneous fitting of multiple curves. *Physics in Medicine & Biology*, 56(24):7725, 2011. [15](#), [16](#)
- [ZNAA15] YI Zakari, R Nasiru, YA Ahmed, and MA Abdullahi. Measurement of radon concentration in water sources around Ririwai Artisanal Tin Mine Kano State, Nigeria. *Measurement*, 5(24), 2015. [35](#)
- [ZSo6] Zygmunt Zdrojewicz and Jadwiga Strzelczyk. Radon treatment controversy. *Dose-Response*, 4(2):dose–response, 2006. [24](#)

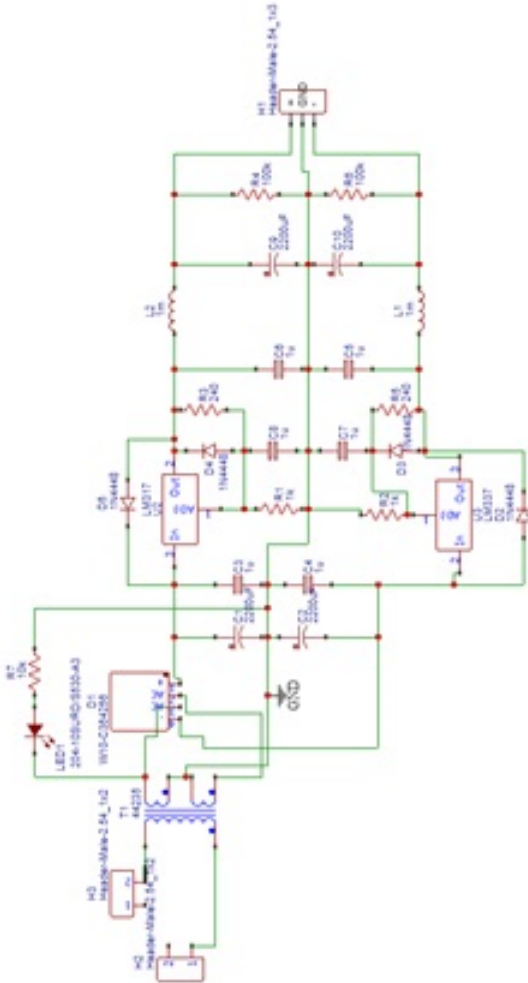
O potencial da Concentração de Radão na água do Município da Bibala

Apêndice A

A.1 Esquema do circuito eletrônico do protótipo para a medição de radão



A.2 Esquema do circuito eletrónico da fonte de alimentação



A.3 Código para aquisição de dados com o Arduíno

Apêndice 1 Código para aquisição de dados com o Arduino

```
/******  
*          RADON COUNTER  
*****/  
  
1. #include <TimeLib.h>  
2. #define TIME_HEADER "T" // Header tag for serial time sync message  
3. #define TIME_REQUEST 7 // ASCII bell character requests a time sync message  
4.  
5. // tempo de aquisição em segundo  
6. float timer = 600.; // counting time in seconds  
7.  
8. // -----  
9. const byte interruptPin = 3;  
10. volatile byte state = LOW;  
11. unsigned long counter = 0;  
12. unsigned long time0 = 0.;  
13. unsigned long totaltime;  
14. float dt = 0;  
15.  
16.  
17. void setup () {  
18.   pinMode (interruptPin, INPUT);  
19.   AttachInterrupt (digitalPinToInterrupt(interruptPin), interr, RISING);  
20.   Serial.begin (9600);  
21.   time0 = millis ();  
22.   Serial.println ("START");  
23.  
24.  
25.  
26. }  
27.  
28. void loop () {  
29.   if (state == HIGH) {  
30.     state = LOW;  
31.     counter++;  
32.     // Serial.println (counter);
```



```
42.
43. Serial.print (" time(s) : "); Serial.print (millis()/1000.), Serial.print (" counts:");
    Serial.println (counter);
44. time0 = millis ();
45. counter = 0; // reset counter
46. }
47.
48. }
49.
50. // interrupt function
51. void interr () {
52.   state = HIGH;
53. }
```

O potencial da Concentração de Radão na água do Município da Bibala