



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Ciências

Avaliação do Potencial de Exposição ao Radão em Edifícios no Município do Lubango

Yoenls Prata Alicerces Bahu

Tese para obtenção do Grau de Doutor em
Física
(3º ciclo de estudos)

Orientadora: Prof^a. Doutora Sandra da Costa Henriques Soares

Covilhã, dezembro de 2021

Realizaram-se no dia 12 de novembro de 2021, às 9h30, via videoconferência na plataforma Zoom, as Provas de Doutoramento em Física com o título “Avaliação do Potencial de Exposição ao Radão em Edifícios no Município do Lubango.”

Constituíram o Júri das Provas os seguintes elementos:

Presidente:

- Doutor Joaquim Mateus Paulo Serra, Vice-Reitor da Universidade da Beira Interior.

Vogais:

- Doutor Alcides José Sousa Castilho Pereira, professor catedrático da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra;
- Doutor Luís Filipe dos Santos Garcia Peralta, professor associado da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa;
- 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;
- Doutora Susana Alexandra Barbosa, investigadora principal do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESCTEC).

Arguentes:

- Doutor Luís Filipe dos Santos Garcia Peralta, professor associado da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa;
- Doutor Alcides José Sousa Castilho Pereira, professor catedrático da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra .

Dedicatória

À memória do meu pai
À minha querida esposa Brígida Sousa
Às minhas filhas Yasmine Bahu e Yohanna Bahu

Agradecimentos

Esta tese foi desenvolvida no âmbito do programa de Doutoramento em Física da Faculdade de Ciências da Universidade da Beira Interior. A concretização deste trabalho só foi possível porque contei com a colaboração e o apoio de muitas pessoas.

Em primeiro lugar agradeço a Deus pelo dom da vida e das bênçãos que me tem proporcionado.

À Professora Doutora Sandra Soares por ter aceite orientar esta tese. “O segredo de um grande sucesso está no trabalho de uma grande equipe”, com estas palavras de Murillo Cintra de Oliveira Margarida, pude assim descrever a Professora, pela sua ampla experiência, capacidade de trabalho em equipa e disponibilidade. Permitiu-me crescer a nível científico, laboral e profissional.

Ao Professor Doutor Luís Garcia Peralta por todo apoio disponibilizado, pela amizade e pela dedicação na construção do protótipo.

Aos Professores Doutores Pedro Almeida, António Valter Chissingui e Francisco Salas Rosette pelo apoio no Sistema de Informação Geográfica.

Ao Professor Alcides Pereira, pela contínua colaboração da leitura dos detetores e pelas discussões sobre o tema que muito me ajudaram a crescer cientificamente nesta área.

Ao meu colega Joaquim Pedro Kessongo, pelo grandioso trabalho em equipa.

À colega Margarida Inácio, pelas bases iniciais de manejo dos equipamentos laboratoriais.

Ao Dr. Américo Chicote, ex-Diretor Provincial da Educação da Huíla.

Ao Dr. Estanislau Paulo, ex-chefe de Secretária da Administração Municipal do Lubango.

Aos diretores das Instituições de Ensino, Escola 27 de Março, IMEL, Escola Portuguesa do Lubango, 14 de Abril, Escola Secundária da Arimba, Escola Secundária da Húila e Escola Secundária do Lubango.

Às Administrações Municipal do Lubango, Comunal da Huíla e Comunal do Hoque.

À Direção Provincial de Saúde da Huíla.

A MAPEL.

Ao Grupo Ademar Damião.

À Direção Provincial do Comércio e Recursos Minerais da Huíla.

Ao Instituto Superior Politécnico da Huíla da Universidade Mandume Ya Ndemufayo.

Ao Instituto Superior de Ciências da Educação da Huíla.

Ao Sr. José Domingos de Assunção, pelos livros sobre a Geologia do Lubango.

Aos meus pais, Lucas Bahu e Isabel Paulo Alicerces pelo apoio moral e material proporcionado. Aos meus irmãos Helder Bahu, Paulo Bahu, Adolosi Bahu e Agnes Bahu.

Ao INAGBE (Instituto Nacional de Bolsas de Estudos) pela bolsa concedida.

Resumo

A cidade de Lubango, situada no planalto da Huíla, em Angola, é, em termos geológicos, caracterizada por apresentar rochas maioritariamente graníticas algumas das quais com alguns vestígios de urânio. Foi, tendo em conta esta realidade e o facto de, tanto quanto se sabe, não haver estudos desenvolvidos nesta temática, que o grande objetivo deste trabalho consistiu, principalmente, em se avaliar, a potencial exposição das habitações do Município do Lubango, no que se refere ao radão, ^{222}Rn , um gás nobre, radioativo, que descende do rádio, ^{226}Ra , que resulta da desintegração do urânio, ^{238}U , presente em algumas dessas rochas graníticas.

O gás radão, não é uma ameaça evidente para a saúde, uma vez que a maior parte do radão inalado, volta a ser expulso após algumas expirações. O perigo iminente associado ao radão aquando da inalação, reside no facto de este poder sofrer decaimentos radioativos no interior dos pulmões, dando, desta forma, origem aos seus descendentes por emissão de radiação alfa. Esses descendentes diretos também podem encontrar-se agregados aos aerossóis que circulam no ar envolvente e nos epitélios pulmonares e que são os principais contribuintes pela deposição de energia.

Em geral, os níveis de fundo de radão em espaços abertos, *outdoor*, são bastante baixos, cerca de $0,1$ a 10 Bq m^{-3} . No entanto, em ambientes fechados, *indoor*, como é o caso de hospitais, escolas, residências ou escritórios de instituições públicas, os níveis de radão e dos seus descendentes podem ser mais elevados, podendo constituir um risco para a saúde humana.

A entrada do radão e a sua acumulação nos espaços habitacionais, pode ocorrer não apenas devido a fissuras existentes nas fundações, nas paredes e juntas de canalização mal vedadas, mas, também, a partir de alguns materiais de construção utilizados, que constituem um fator adicional para o aumento da concentração de radão no interior dos edifícios. As populações podem ainda ser expostas ao radão e seus descendentes, através da ingestão de água potável obtida a partir de poços ou outras fontes de abastecimento da população. A maioria do radão dissolvido na água é rapidamente libertado e dissipado no ar ambiente, no entanto, se existir em quantidades elevadas, pode contribuir para o aumento da concentração no interior da habitação e deve ser tomado em consideração.

Neste trabalho, para se avaliar a exposição populacional ao radão, foram selecionadas 58 moradias unifamiliares e 16 edifícios públicos da cidade do Lubango. Para se determinar a concentração de radão no ar, foram utilizados detetores passivos CR-39. Os detetores foram colocados no rés-do-chão dos edifícios selecionados durante um período de 90 dias. Os resultados obtidos mostram que em 26% das habitações, a concentração de radão excede 100 Bq m^{-3} , o nível de referência recomendado pela Organização Mundial de Saúde e que sugere que, se este nível não puder ser alcançado nas condições específicas de cada país, o nível de referência não deverá exceder os 300 Bq m^{-3} . Com base no valor medido para a concentração de radão habitacional e tendo em conta a taxa de ocupação dos edifícios, foi calculada a dose anual efetiva correspondente, à qual a população está sujeita. Os valores da dose anual efetiva variam de $(0,34 \pm 0,01)$ a $(7,48 \pm 0,11) \text{ mSv}$ abaixo do nível de referência

máximo recomendado de 10 mSv .

Um dos objetivos subjacentes à realização desta tese seria a realização de um estudo dosimétrico populacional em Angola. Contudo, num país com uma extensão territorial de 1246700 km² de área total, a monitorização do gás radão no ar interior seria um processo muito dispendioso. Por outro lado, os laboratórios nacionais angolanos ainda não possuem equipamentos que permitam a medição da concentração de radão. Para ultrapassar este problema e minimizar os possíveis custos associados a este estudo, equacionou-se a possibilidade de se desenvolver um detetor de baixo custo que pudesse ser facilmente reproduzido e utilizado em Angola. Assim, com o objetivo de auxiliar futuros projetos a desenvolver por estudantes angolanos, foi reproduzido e melhorado um protótipo, inicialmente desenvolvido no grupo de trabalho, para a deteção de radão no ar. Este detetor é constituído por um fotodíodo de silício SLCD-61N5 sensível a radiação alfa e permite a monitorização e medição do gás radão em tempo real sem necessidade de um sistema de bombeamento de gás.

Finalmente, ainda no âmbito de projetos futuros em Angola relacionados com a construção civil, mediu-se a taxa de exalação mássica de amostras de granito revestidas e não revestidas utilizando métodos de deteção passiva e ativa, sendo que o valor mais elevado em deteção passiva foi de 44,5 mBq kg⁻¹h⁻¹ enquanto que para a deteção ativa o maior valor medido foi de 26,2 mBq kg⁻¹h⁻¹.

Palavras-chave

Concentração de radão, dose anual efetiva, Lubango.

Abstract

The city of Lubango, located on the plateau of Huila in Angola, is geologically characterized by the presence of granitic rocks, some of which have traces of uranium. It was, in view of this reality and the fact that, as far as we know, there have been no studies developed on this subject, that the main objective of this work has been to evaluate the potential exposure of the dwellings of the Municipality of Lubango, with regard to radon. Radon is a noble gas, and its isotope ^{222}Rn descends from the radio isotope, ^{226}Ra , which results from the disintegration of uranium, ^{238}U , present in some of these granite rocks.

Radon gas is not a clear threat to health, since most radon that is inhaled is expelled again after a few exhalations. The imminent danger associated with radon when inhaled lies in the fact that it can undergo radioactive decay inside the lungs, thus giving rise to its descendants by emitting alpha radiation. These direct descendants can also be found aggregated to aerosols circulating in the surrounding air and in the lung epithelia, which are the main contributors to energy deposition.

In general, background levels of radon in open spaces, outdoor, are quite low, around 0.1 to 10 Bq m^{-3} . However, in indoor spaces, such as hospitals, schools, homes or offices of public institutions, levels of radon and its progeny can be higher, and may pose a risk to human health.

Radon entry and accumulation in living spaces can occur not only due to cracks in foundations, cracks in walls, poorly sealed pipe joints, but also from some of the construction materials used, which are an additional factor in increasing the concentration of radon inside buildings. Populations can also be exposed to radon and its descendants by drinking water from wells or other sources of water supply. Most radon dissolved in water is readily released and dissolved in ambient air, however, if present in high quantities, it can contribute to increased indoor concentrations and should be taken into consideration.

In this work, 58 single-family houses and 16 public buildings in the city of Lubango were selected to assess exposure to radon. Passive CR-39 detectors were used to determine radon air concentration. The detectors were placed on the ground floor of the selected buildings for a period of 90 days. The results show that in 26% of dwellings the radon concentration exceeds 100 Bq m^{-3} , the reference level recommended by the World Health Organization that suggests that if this level cannot be achieved under country-specific conditions, the reference level should not exceed 300 Bq m^{-3} . Based on the measured value for housing radon concentration and taking into account the occupancy rate of buildings, the corresponding effective annual dose, to which the population is subject, was calculated. Annual effective dose values range from (0.34 ± 0.01) to $(7.48 \pm 0.11) \text{ mSv}$ below the maximum recommended reference level of 10 mSv .

One of the goals of this work would be to conduct a population dosimetric study in Angola. However, in a country with 1246700 km^2 of total area, monitoring of radon gas in indoor air would be a very expensive process. On the other hand, Angola national laboratories do not yet have equipment to measure radon concentration. To overcome this problem and minimise the possible costs associated with this study, the possibility of developing a low-cost radon

detector that could be easily reproduced and used in Angola was considered. Thus, in order to assist future projects to be developed by Angolan students, a prototype, initially developed in the working group, for the detection of radon in the air was reproduced and improved. This detector consists of a SLCD-61N5 silicon photodiode sensitive to alpha radiation and allows monitoring and measurement of radon gas in real time without the need for a gas pumping system.

Finally, still within the framework of future projects in Angola related to construction, the exhalation rate per unit mass of granite samples coated and not coated was measured using passive and active detection methods. The highest value in passive detection was $44.5 \text{ mBq kg}^{-1}\text{h}^{-1}$ while for active detection the highest value measured was $26.2 \text{ mBq kg}^{-1}\text{h}^{-1}$.

Keywords

Radon concentration, annual effective dose, Lubango.

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Introdução às radiações ionizantes	4
2.1	Tipo de radiações ionizantes	5
2.2	Lei do decaimento radioativo	6
2.3	Tipos de decaimentos radioativos	7
2.3.1	Decaimento alfa	7
2.3.2	Decaimento β^-	8
2.3.3	Decaimento β^+ e a captura do eletrão	9
2.3.4	Decaimento gama	9
2.4	Atividade	10
2.5	Grandezas dosimétricas	10
2.5.1	Fluência	11
2.5.2	Fluência energética	12
2.5.3	Kerma	12
2.5.4	Dose	12
2.5.5	Dose equivalente	13
2.5.6	Dose efetiva	13
2.5.7	Equivalente de dose	14
3	Interação da radiação ionizante com a matéria	15
3.1	Definição de secção eficaz	16
3.2	Tipos de interações da radiação ionizante com a matéria	17
3.2.1	Reações nucleares	17
3.2.2	Interação da radiação eletromagnética com a matéria	18
3.3	Interação de partículas carregadas com a matéria	22
3.4	Interação de partículas carregadas pesadas com a matéria	23
3.4.1	Poder de Paragem	23
3.4.2	Alcance das partículas alfa	24
3.4.3	Alcance CSDA e Alcance projetado	25
3.5	Distribuição da perda de energia	26
3.6	Dispersão múltipla	27
4	O gás radão, suas características e implicações	28
4.1	Origem e propriedades do radão	29

4.2	Efeitos e riscos para a saúde	31
4.3	Radão habitacional	34
4.4	Distribuição do radão habitacional no Mundo	34
4.5	A importância de um estudo dosimétrico habitacional em Angola	36
4.6	Normas internacionais relativas à deteção e aos níveis de referência/ recomendações para a concentração de radão no ar interior.	36
5	Métodos de deteção de radão	41
5.1	Detetores ativos	44
5.1.1	Câmaras de ionização	44
5.1.2	Detetores de cintilação	45
5.1.3	Métodos de dois filtros	46
5.2	Detetores passivos	47
5.2.1	Detetores de carvão ativado	48
5.2.2	Detetores de traços (CR-39)	48
5.3	Detetores de semicondutor	51
5.3.1	Princípio de funcionamento	52
5.3.2	Tipos de detetores semicondutores para deteção de radão	57
5.4	Fotodíodos	58
5.4.1	Métodos de deteção de radão utilizando fotodíodos de silício PIN	58
6	Avaliação dosimétrica populacional da concentração do radão habitacional no município do Lubango	60
6.1	Caraterização geográfica e geológica do Lubango	60
6.2	Medição da concentração do radão habitacional	64
6.2.1	Procedimento de medição da RAC	65
6.2.2	Técnica de interpolação usada para fazer o mapa de radão	66
6.2.3	Dose anual efetiva	67
6.3	Resultados e discussão dos valores obtidos na região em estudo	68
6.3.1	Concentração de radão no interior dos edifícios	68
6.3.2	Estimativa da dose anual efetiva	70
6.4	Mapeamento da concentração de radão habitacional	72
6.4.1	Sistema de Informação Geográfico	72
6.4.2	Componentes e estrutura	73
6.4.3	Funcionalidades do SIG	74
7	Construção de um protótipo para a deteção do radão no ar	76
7.1	Descrição geral do protótipo	76
7.1.1	Circuito amplificador	76
7.2	Montagem e teste do circuito	79
7.3	Fonte de alimentação do protótipo	81
7.4	Testes do protótipo	81
7.5	Simulação Monte Carlo da deposição direta de partículas alfa no detetor	87

8	Estudo da exalação de radão por materiais de construção	90
8.1	Métodos de medição das taxas de exalação mássica de radão	90
8.1.1	Detetores de integração	91
8.1.2	Avaliação de fugas na câmara	93
8.1.3	Detetores diferenciais	94
8.1.4	Método de deteção passiva	94
8.1.5	Método de deteção ativa	95
8.2	Resultados obtidos	95
	Conclusão	98
	Bibliografia	101
A	Anexos	117
A.1	Características da tipologia dos edifícios	117
A.2	Tratamento dos dados dos 75 edifícios	121
A.3	Tabela de base de aplicação em SIG	125

Lista de Figuras

2.1	Radiações ionizantes e não ionizantes	6
2.2	Radiação incidente numa esfera de secção reta <i>da</i> [Shao1].	11
3.1	Interação de um feixe de partículas de secção reta <i>A</i> com um alvo.	17
3.2	Absorção fotoelétrica.	18
3.3	Emissão de radiação devido ao efeito fotoelétrico, à esquerda emissão de radiação por fluorescência e à direita emissão de eletrões de Auger.	19
3.4	Efeito de Compton.	20
3.5	Produção de pares.	21
3.6	Parâmetros importantes das partículas carregadas quando colidem com os átomos: <i>a</i> é o raio atómico clássico; <i>b</i> é o parâmetro de impacto clássico [Atto4].	22
3.7	Alcance de partículas alfa em vários materiais (densidades em g/cm ³): (1) Ar = 0,0013; (2) Tecido = 1,0; (3) Alumínio = 2,70; (4) Cobre = 8,96 [Tau13].	25
4.1	Percentagem da dose anual de radiação recebida pela população mundial [Uni10, APA20].	29
4.2	Série de decaimento do Urânio e do Tório. As informações relativas aos tempos de meia vida e os decaimentos foram obtidos na base de dados NuDat 2 (NNDC 2013). Abreviaturas: d, dias; h, horas; min, minutos; s, segundos; a, anos [ARS15].	30

4.3	Emanação e exalação de radão das rochas [Res14].	30
4.4	Esquema ilustrativo da inalação do radão [APA20].	33
4.5	Risco acumulado de morte por cancro de pulmão aos 75 anos de idade, de acordo com a concentração média de radão em residências a longo prazo para fumadores ativos e ex-fumadores, no Reino Unido, com base nas taxas de mortalidade de 2006 [GMD08].	33
4.6	Vias de penetração do radão em edifícios [Fri10].	34
4.7	Mapa baseado no Sistema de Informação Geográfico, mostrando a estrutura tectónica pré-cambriana da África Austral, Hanson (2003) [McC13].	37
5.1	Traço após o ataque químico [Niko4].	49
5.2	Fórmula estrutural do CR-39) [Cas78].	50
5.3	Detetor CR-39 e a câmara de difusão.	52
5.4	Elétrões da banda de valência de cada átomo representados num cristal de Silício.	52
5.5	Cristal de silício dopado com material trivalente (semicondutor tipo P).	54
5.6	Cristal de silício dopado com material pentavalente (semicondutor do tipo N).	54
5.7	Junção P-N [PRE15].	55
5.8	Junção P-N diretamente polarizada [PRE15].	56
5.9	Junção P-N inversamente polarizada [PRE15].	56
5.10	RAD7 [Dur20]	58
5.11	Funções básicas de um detetor [Spi05]	59
6.1	Mapa de Angola e da cidade do Lubango, feito no ArcMap 10.3 [ESR18, ESR20a] e as shapefiles foram adaptadas do MapCruzin.com.	61
6.2	Registos anuais de temperatura do Lubango a partir de Setembro de 2020 (adaptado de [Wik20a]).	61
6.3	Geologia do SW Angola e várias cidades (Carvalho e Alves 1993) [McC13, Per11].	63
6.4	Microscópio da marca Radosys existente no LabExpoRad, na Covilhã.	65
6.5	Dose anual efetiva em edifícios públicos	71
6.6	Dose anual efetiva em edifícios moradias unifamiliares	71
6.7	Mapa relativo a concentração de radão no município do Lubango, usando ArcMap10.3 [ESR18, ESR20a] e o mapa base adaptado da ESRI [ESR20b].	72
6.8	Modelos Vetoriais [Boo01].	74
6.9	Localização geográfica de um raster no espaço [Boo01].	75
7.1	Diagrama esquemático do sistema eletrónico do protótipo para a deteção de radão.	77
7.2	Esquema do circuito.	77
7.3	Esquema com dimensões do Silonex SLCD-61N5 [Opt16] e fotografia de uma vista superior, exemplificando a face sensível do detetor.	78
7.4	Esquema do acoplador ótico EL817C [Eve10] usado no acoplamento entre o sinal à saída do andar de amplificação e o andar de discriminação.	79

7.5	Placa do circuito impresso do protótipo com as bases dos integrados já soldadas.	80
7.6	Montagem experimental de testes de circuito do protótipo: (1) fontes alimentação, (2) osciloscópio, (3) caixa de testes opaca, (4) fonte radioativa de ^{241}Am , (5) circuito impresso, (6) acoplamento ótico.	80
7.7	Esquema do circuito da fonte de alimentação do protótipo.	81
7.8	Fotografia da fonte de alimentação após ter sido montada numa caixa de alumínio.	82
7.9	Caixa metálica contendo o circuito eletrônico (1) e o Arduíno (2).	82
7.10	Dispositivo experimental para testes do protótipo num ambiente rico em radão. (1) fonte de radão - caixa com rochas, (2) Arduino ligado ao sensor BME280, (3) caixa de acrílico contendo (4) protótipo, (5) detetor S3590-09, (6,8,9) fontes de alimentação, (9) Pré-amplificador.	83
7.11	Espetro de energia de partículas alfa, obtido com o detetor S3590-09 da Hamamatsu. São observáveis 3 picos: (1) ^{210}Po – contaminação do detetor, (2) ^{218}Po , (3) ^{214}Po	84
7.12	Contagens do protótipo e do detetor S3590-09 da Hamamatsu, integradas durante uma hora em função da hora em que foi feita a aquisição.	85
7.13	Contagens do protótipo versus contagens do detetor S3590-09 da Hamamatsu. Foi obtido um coeficiente $R^2 = 0,996$ para a correlação linear entre as duas variáveis.	86
7.14	Monitorização da temperatura, pressão e Humidade relativa	86
7.15	Espetro simulado da sobreposição da energia depositada num detetor Si-PIN, por partículas alfa de 5,59 MeV, emitidas por ^{222}Rn em ar, com os dados experimentais adquiridos com o detetor S3590-09.	88
7.16	Distribuição da distância percorrida por partículas alfa de 5,59 MeV emitidas por ^{222}Rn em ar.	89
8.1	Exemplo das amostras de granito utilizadas no estudo.	91
8.2	Acumulação de radão dentro da câmara durante dez dias para duas fontes de radão diferentes (uma rocha e três amostras). É obtida uma constante de fuga mais elevada para a fonte de maior taxa de exalação (rocha). As linhas tracejadas são ajustes aos dados. É apresentado no gráfico o valor da constante de decaimento ajustado.	94
8.3	Técnica de <i>sealed-can</i> para medir o radão exalado de amostras de granito com um detetor CR-39.	95
8.4	Detetor RAD7 usado para medir a concentração de radão das amostras de granito.	96
8.5	Comparação entre a taxa de exalação mássica de radão determinada pelos métodos passivo e ativo, para as 12 amostras de granito estudadas.	97

Lista de Tabelas

2.1	Valores de fatores de ponderação da radiação[ICRO7a].	13
2.2	Fatores de ponderação de tecidos ou órgãos[ICRO7a, ICR90, ICR93]	14
2.3	Tabela de fatores de qualidade para diversos tipos de radiações e partículas [ICRO7b].	14
4.1	Propriedades físicas, químicas e radiológicas do radão[SHRD12].	32
4.2	Valores de concentração de radão no interior nos países da OECD[Org09]. . .	35
4.3	Dose anual efetiva de todas fontes radioativas naturais[UNS88]	39
5.1	Efeitos de radiação utilizados na deteção e medição da radiação [Kad20] . . .	41
5.2	Energia Potencial das partículas alfa para os descendentes do radão [ICR94] .	43
6.1	Tempo de ocupação interior em edifícios públicos em Angola	68
6.2	Concentração média de radão em edifícios públicos	69
6.3	Concentração média de radão em moradias unifamiliares	70
8.1	Constante de decaimento total e para a constante de decaimento devido à fuga	93
8.2	Concentração de radão medida para as amostras analisadas	96
A.2	Tratamento dos dados dos 75 edifícios	121
A.2	Tratamento dos dados dos 75 edifícios	122
A.2	Tratamento dos dados dos 75 edifícios	123
A.2	Tratamento dos dados dos 75 edifícios	124

Lista de Acrónimos

ACA	Administração Comunal da Arimba
ACHO	Administração Comunal do Hoque
ACHLA	Administração Comunal da Huíla
ADN	Ácido desoxirribonucleico
AML	Administração Municipal do Lubango
ARCGIS	<i>Aeronautical Reconnaissance Coverage Geographic Information System</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CSDA	<i>Continuos Slowing Down Aproximation</i>
EDP	Edifício Público
EEC	<i>Equilibrium equivalent concentration</i>
EED	<i>Equilibrium-Equivalent Decay</i>
EPL	Escola Portuguesa do Lubango
ESA	Escola Secundária da Arimba
ESEC	Escola Secundária do Lubango
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
EURATOM ou CEEA	Comunidade Europeia da Energia Atómica
GRASS	<i>Geographical Resources Analysis Support System</i>
gpkg	<i>GeoPackage</i>
HCL	Hospital Central do Lubango
ICRU	<i>The International Commission on Radiation Units and Measurements</i>
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i>
IMEL	Instituto Médio de Economia do Lubango
ISCED	Instituto Superior de Ciências de Educação da Huíla
ISO	<i>International Organization for Standardisation</i>
Kerma	Kinectic energy released per unit of mass
LABEXPORAD	Laboratório de Estudos dos Efeitos da Exposição ao Radão
LET	<i>Linear Energy Transfer</i>
LLD	<i>Lower Limits of Detection</i>
MDT	Modelos Digitais de Terreno
MC	Monte Carlo
MU	Moradia Unifamiliar
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
OECD	<i>Organization for Economic Co-operation and Development</i>

Lista de Acrónimos (continuação)

PALOP	Países Africanos de Língua Oficial Portuguesa
PAEC	<i>Potential Alpha Energy Concentration</i>
PIN	<i>positive-intrinsic-negative</i>
QGIS	<i>Quantum Geographic Information System</i>
RAC	<i>Radon Activity Concentrations</i>
RBE	<i>Relative Biological Effectiveness</i>
REM	Radiação Eletromagnética
S.I	Sistema Internacional
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SSNTDs	<i>Solid State Nuclear Track Detectors</i>
TH	Tipologia da Habitação
TIN	<i>Triangulated Irregular Networks</i>
TAC	Tomografia Axial Computarizada
TLD	<i>Thermo-Luminescent Dosimeter</i>
UBI	Universidade da Beira Interior
UNSCEAR	<i>United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</i>

Capítulo 1

Introdução

O radão é um gás nobre radioativo presente no ambiente, incluindo ar, solos e água. A sua importância centra-se em dois diferentes aspetos: por um lado, representa um perigo ambiental com efeitos reconhecidos na saúde humana e por outro, é uma ferramenta geofísica útil para rastrear propriedades dinâmicas do meio ambiente [Huso8]. Em ambos os casos, a deteção de radão é extremamente relevante, mas também tecnicamente desafiadora pelo que este projeto visa desenvolver um sistema de deteção e monitorização de radão no ar, procurando melhorar a qualidade de vida das populações.

A exposição da população à radiação ionizante de origem natural ocorre, principalmente, através da inalação do radão. Quando esse gás sofre decaimentos radioativos no interior do organismo, partículas alfa de alta energia podem aderir ao tecido pulmonar podendo irradiar células sensíveis do pulmão e, em menor grau, de outros órgãos.

No entanto, no caso de se verificarem concentrações, de radão, muito elevadas na água potável, a principal fonte de exposição é por ingestão e, neste caso, poderão ser afetadas células sensíveis de outros órgãos que não o pulmão. Tendo isto em consideração, quando se presume que a água de consumo humano apresenta grandes concentrações de radão, é igualmente importante proceder-se à sua avaliação radiológica, particularmente no que se refere aos isótopos de meia vida longa que podem circular nos sistemas públicos de distribuição de água e chegar ao consumidor, permitindo, em algumas circunstâncias, que a exposição a radionuclídeos naturais possa exceder níveis normais. Uma vez que o risco proveniente do radão pode ocorrer por inalação ou por ingestão, torna-se pertinente correlacionar a exposição ao radão, por inalação ou ingestão, com os fatores de risco da população.

O radão no ar pode ser medido utilizando detetores passivos CR-39, um dos detetores de estado sólido SSNTDs, mais utilizados na determinação da concentração de radão, nas habitações [Mam10]. Este detetor regista a presença de partículas alfa durante um período de tempo que, na generalidade dos casos, não deve ser inferior a 30 dias. O CR-39 regista a passagem de partículas alfa e através da determinação da densidade de traços por unidade de área é possível estimar, usando fatores de conversão adequados, a concentração de radão num determinado espaço fechado. Pelo contrário, em espectrometria gama, a concentração de radão é medida de forma indireta a partir da atividade dos produtos de decaimento do radão, os isótopos ^{214}Bi e ^{214}Pb . Os detetores mais usados, neste caso, são os de cintilação de estado sólido ou de Germânio de Elevada Pureza (HPGe). Estes sistemas são caros e não estão preparados para monitorização de campo, o que justifica, também, o desenvolvimento de sistemas de monitorização de radão no ar, de baixo custo, de menores dimensões e portáteis.

Este projeto 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.

É do conhecimento geral que, apesar dos PALOP (Países Africanos de Língua Oficial Portuguesa) 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.

Um dos grandes desafios deste projeto, consiste 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. Para que estes objetivos sejam alcançados, em função das considerações apresentadas e tendo em conta as características geológicas do Lubango, pretende-se realizar um estudo dosimétrico populacional com vista à determinação das concentrações médias de radão habitacional, calcular a dose anual efetiva a que adultos e crianças estão expostos, bem como desenvolver detetores de radão de baixo custo, capazes de medir em tempo real.

A cidade do Lubango está situada no planalto da Huíla. Em termos geológicos, predominam rochas graníticas e grande quantidade de rochas magmáticas, apresentando uma mineralização com elevados valores cintilométricos, vinte vezes superiores à radiação de fundo, também presente nas nascentes provenientes de águas subterrâneas. As quantidades destes elementos bem como o nível de radioatividade natural são variáveis [Bap16].

Tanto quanto se sabe, existem estudos escassos sobre o radão em Angola [Bap16, Sal20a, Sal20b, Kes20], pelo que, de forma a contribuir nesta área de investigação, pretendeu-se desenvolver um estudo dosimétrico populacional com vista à determinação das concentrações médias de radão habitacional, calcular a dose anual efetiva a que as populações estão sujeitas e, se necessário, recomendar mecanismos de mitigação.

Uma vez que a área de estudo que se pretende cobrir é vasta e os laboratórios angolanos não dispõem ainda de equipamentos adequados, dever-se-ão utilizar métodos baseados em monitores e detetores de baixo custo. Pretende-se, por isso, desenvolver um sistema de monitorização de radão de baixo custo que implica o desenvolvimento de um protótipo utilizando fotodíodos de silício PIN para monitorização de radão no ar, em tempo real.

A presente tese encontra-se dividida em 8 capítulos estruturados da seguinte forma:

Capítulo 1: Refere-se à introdução onde são feitas as abordagens sobre o gás radão e os seus efeitos na saúde humana, o tipo de detetores utilizados no presente trabalho, as insuficiências de quadros nas áreas da Física das radiações nos PALOP, a região em estudo e o desenvolvimento de um protótipo de silício PIN.

Capítulo 2: Faz-se uma abordagem geral sobre o estado da arte relativo às radiações ionizantes, lei do decaimento radioativo, tipos de decaimentos e grandezas fundamentais utilizadas em dosimetria.

Capítulo 3: Descreve-se a interação da radiação ionizante com a matéria em particular a interação de partículas alfa.

Capítulo 4: Descreve-se o radão, desde a origem, os seus efeitos na saúde humana, radão habitacional, distribuição do radão habitacional em algumas regiões a nível mundial e a

importância do estudo dosimétrico do radão em Angola e normas internacionais relativas à deteção e aos níveis de referência/recomendações para a concentração de radão no ar interior.

Capítulo 5: Descrevem-se os métodos de deteção do gás radão, a destacar os detetores ativos, câmaras de ionização, detetores de cintilação, detetores de carvão ativado, detetores passivos, detetores semicondutores e fotodíodos.

Capítulo 6: Faz-se avaliação dosimétrica populacional da concentração do radão habitacional no município do Lubango, medindo as concentrações do radão habitacional, quer em edifícios públicos, quer em moradias unifamiliares. Apresenta-se a georreferenciação da área de estudo utilizando o Sistema de Informação Geográfica e efetuou-se o cálculo da dose anual efetiva.

Capítulo 7: Apresentação da construção de um protótipo para a deteção do radão no ar como uma alternativa de baixo custo, que futuramente deverá ser replicado de forma a permitir efetuar estudos dosimétricos em alguns territórios de Angola. Descreve-se o código de Monte Carlo Alfa MC.

Capítulo 8: Apresenta-se o estudo da taxa de exalação de radão por materiais de construção, como ponto de partida para avaliação de atividade radioativa de rochas típicas de Angola.

Por fim apresentam-se as conclusões relativas à exposição ao radão no interior de edifícios, destacando as zonas de maiores e menores incidências de concentração de radão bem como as medidas de mitigação caso sejam necessárias. Enfatizaram-se as técnicas que serão utilizadas em projetos futuros em Angola.

Capítulo 2

Introdução às radiações ionizantes

A radiação ambiente, natural ou produzida pelo homem, é uma realidade que não devemos ignorar. As populações estão, diariamente, expostas a diversos tipos de radiação, contudo, devido às diferentes energias, esta não interage com o corpo humano da mesma forma. A radiação, que não é mais do que energia transmitida sob a forma de onda eletromagnética, é designada como não ionizante ou ionizante, de acordo com a forma como interage com a matéria. As radiações não ionizantes são fótons que quando passam por um átomo ou por uma molécula, não têm capacidade para remover elétrons, mas por outro lado podem provocar excitações no eletrão e movê-lo para um estado de energia superior. No espectro eletromagnético estas radiações são as que possuem frequências inferiores a uma parte dos raios ultravioleta. A luz visível, radiação infravermelha, as micro-ondas e as ondas de rádio são normalmente consideradas como radiações não ionizantes. Embora não tenham capacidade de alterar, diretamente, a estrutura da matéria, podem, em certas condições, apresentar riscos para a saúde, como é por exemplo o aparecimento de problemas de pele e do sistema imunitário causados por excesso de exposição a radiação ultravioleta. Quando as radiações atravessam a matéria e transmitem energia aos elétrons podendo provocar a excitação ou a ionização dos átomos, são designadas ionizantes. Neste processo, um ou mais elétrons são arrancados do átomo transformando-o num ião positivo. O processo de ionização pode ser direto ou indireto. No primeiro caso, uma partícula carregada, ao deslocar-se na matéria vai perdendo energia ao provocar ionização local, quebras de ligações químicas ou excitação dos átomos vizinhos. No segundo caso, a partícula (fóton, neutrão, etc.), na sua primeira interação transfere toda ou parte da sua energia para partículas carregadas (elétrons ou prótons) que irão, por sua vez, provocar uma ionização direta [ICR71]. Os perigos inerentes da exposição às radiações ionizantes foram reconhecidos pouco depois da descoberta da radiografia por Roentgen em 1895. Foram observadas reações cutâneas em indivíduos que trabalhavam com os primeiros geradores de raios X, e em 1902 foi relatado o primeiro cancro induzido por radiação. Há uma série de características peculiares da radiação ionizante que a diferencia dos agentes bioquímicos tóxicos e outros agentes cancerígenos. A principal diferença está na sua capacidade de interagir e penetrar nas células, depositando energia de forma aleatória no seu interior. A maioria das células do corpo ficam suscetíveis a danos por radiação ionizante; a quantidade de danos resultantes será relacionada com os parâmetros físicos que determinam a dose da radiação recebida em células ou tecidos específicos. O termo carcinogénese é utilizado no seu sentido lato para incluir o desenvolvimento de todos os tipos de neoplasias malignas. As estimativas de risco, em seres humanos, derivados de estudos epidemiológicos resultantes das exposições a altas doses de radiação têm sido amplamente estudadas. No entanto, existem poucos dados sobre efeitos oncológicos na gama de doses abaixo de 10 a 20 cGy [Grd19]. A ionização envolve a ejeção de um eletrão orbital de uma molécula, produzindo uma carga positiva

ou molécula “ionizada”. Estas moléculas resultantes são instáveis e sofrem mudanças na sua composição química. Consequentemente são produzidos radicais livres, que são átomos ou moléculas contendo átomos com eletrões não emparelhados. Uma vez que o organismo humano é composto maioritariamente por água, os produtos mais comuns deste processo são o resultado da decomposição da água dando origem ao superóxido anião O_2^- e ao peróxido de hidrogénio H_2O_2 . Como os eventos iniciais são semelhantes para todos os tipos de radiação, os seus efeitos biológicos são também qualitativamente semelhantes. No entanto, as radiações altamente ionizantes, como é o caso da radiação alfa, produzem mais danos biológicos por unidade de energia absorvida. A eficácia biológica relativa (RBE) dos diferentes tipos de radiação, que compara a dose dessa radiação necessária para produzir um determinado efeito biológico com a dose de RX de 200 keV necessários para produzir o mesmo efeito biológico, está assim relacionado com a transferência linear de energia (LET), uma medida da densidade das ionizações produzidas ao longo dos traços da radiação. Pensa-se que a mudança biológica crítica inicial seja um dano às moléculas do ácido desoxirribonucleico (ADN) na célula. O subsequente desenvolvimento de alterações bioquímicas e fisiológicas, no entanto, pode levar horas ou dias, enquanto a indução do cancro pode levar muitos anos [Grd19].

2.1 Tipo de radiações ionizantes

Radiação ionizante é a radiação que possui energia suficiente para ionizar átomos e moléculas, ou seja, é capaz de arrancar um eletrão de um átomo ou molécula. Por norma, para remover um eletrão de um átomo, uma certa quantidade de energia deve ser transferida para o átomo. De acordo com a lei de conservação de energia, esta quantidade de energia é igual à diminuição de energia cinética da partícula que provoca a ionização. Portanto, a ionização torna-se possível apenas quando a energia das partículas incidentes ou das partículas secundárias, que aparecem como resultado de interações das partículas incidentes com a matéria, excedendo um certo valor limite (ionização do átomo). A energia de ionização das moléculas do ar é proximadamente igual a 34 eV [Kim17]. A radiação ionizante (figura 2.1) pode ser de natureza distinta. A radiação diretamente ionizante é composta por partículas carregadas, que ionizam átomos do material devido à interação de Coulomb com os seus eletrões. Tais partículas são, por exemplo, eletrões e positrões (radiação beta), núcleos de átomos de Hélio (radiação alfa), e vários outros núcleos, por exemplo, iões de metais acelerados (feixes de iões). A radiação indiretamente ionizante é composta de partículas neutras que não ionizam diretamente os átomos. Exemplos de radiação indiretamente ionizante são os fótons (radiação ultravioleta, raios X e gama) e os neutrões de qualquer energia (os neutrões são especiais e interagem apenas com os núcleos) [Kim17].

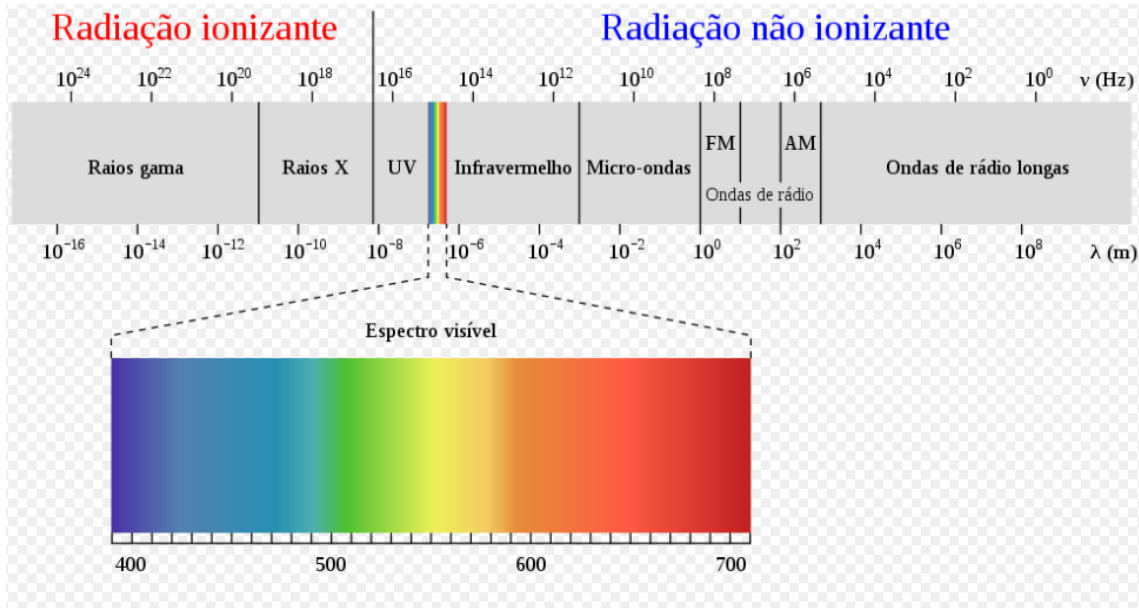


Figura 2.1: Radiações ionizantes e não ionizantes [Wik2ob]

2.2 Lei do decaimento radioativo

Existem vários tipos de decaimento nuclear com emissão de partículas ou de radiação eletromagnética, tais como, decaimentos alfa, beta, gama, captura eletrónica, fissão nuclear, emissão de neutrões, cuja consequência é uma maior estabilidade dos núcleos.

Em 1900, Rutherford descobriu que a taxa de emissão de radiação não era constante, mas diminuía exponencialmente com o tempo [Tipo8b]. Este é um processo estatístico uma vez que não se mede o tempo que um núcleo demora a decair, mas sim a probabilidade de um núcleo decair por unidade de tempo. Sendo o decaimento radioativo um processo aleatório, não se pode afirmar com certeza quando um nuclide instável decairá. No caso de um decaimento estatístico, o número de núcleos, dN , que decaem é proporcional ao intervalo de tempo, dt , e ao número de núcleos presente, logo:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.1)$$

onde N representa o número de radionuclídeos no instante t e λ a constante de decaimento radioativo [Tipo8a]. Esta constante é uma propriedade nuclear característica de cada nuclide e representa a probabilidade de um núcleo decair por unidade de tempo. O sinal negativo deve-se ao facto de o número de núcleos diminuir ao longo do tempo. A integração da equação anterior é conhecida por lei do decaimento radioativo:

$$N(t) = N(0) e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

onde $N(0)$, representa o número de núcleos da amostra no instante $t = 0$. De notar que

o decréscimo do valor da exponencial é controlado através da constante de decaimento radioativo λ . O tempo de meia-vida, $T_{1/2}$, é definido como o tempo necessário para que o número de núcleos radioativos se reduza a metade do seu valor inicial [Tipo8b].

Substituindo na equação 2.2 $N = N(0)/2$ obtém-se:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda} \quad (2.3)$$

O tempo médio de vida ou vida média, τ_{med} , do núcleo define-se como o tempo médio que o núcleo é capaz de sobreviver antes de decair [Kra87]. O número de núcleos que sobrevive no tempo t é $N(t)$ e o número de núcleos que decaem entre t e $(t + dt)$ é $(dN/dt)dt$. Isto é:

$$\tau_{med} = \frac{\int_0^{\infty} t |dN/dt| dt}{\int_0^{\infty} |dN/dt| dt} \Leftrightarrow \tau_{med} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.4)$$

A vida média é então dada por:

$$\tau_{med} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.5)$$

Como se pode verificar, a vida média é o inverso da constante de decaimento. O tempo de vida média relaciona-se com o tempo de meia-vida através da expressão:

$$T_{1/2} = (\ln 2) \tau_{med} \Leftrightarrow T_{1/2} = 0,693 \tau_{med} \quad (2.6)$$

2.3 Tipos de decaimentos radioativos

Um núcleo atômico pode sofrer alterações espontâneas ou induzidas. As alterações espontâneas no núcleo atômico ocorrem quando o núcleo é inicialmente instável e são designadas decaimento nuclear ou desintegração radioativa. Consoante o tipo de radiação produzida no decaimento, os processos de decaimento radioativo são denominados: α (alfa), β (beta) e γ (gama). Existem outras possibilidades como é o caso da captura eletrônica, da conversão interna e da fissão espontânea, contudo neste ponto apenas são considerados os três primeiros processos.

2.3.1 Decaimento alfa

Esse tipo de decaimento ocorre em muitos núcleos pesados, $82 < Z < 92$, que são produzidos artificialmente por elementos transurânicos ($Z > 92$), que decaem emitindo uma partícula alfa, na qual o núcleo pai perde massa e carga: $(A, Z) \rightarrow (A - 4, Z - 2)$. O núcleo filho pode ou não ser estável, mas a sua invariabilidade está perto da região de núcleos estáveis que, eventualmente, é alcançada. A partícula alfa é emitida preferencialmente face a outras

partículas mais leves (d, t, ^3He ...) uma vez que, para que o decaimento aconteça, a energia deve ser libertada. Após esta emissão de radiação, se o núcleo ainda estiver instável, pode emitir radiação gama. A energia libertada durante um decaimento alfa (Q_α) é dada pela diferença de energia em massa, entre o núcleo pai e os produtos finais, e aparece como energia cinética compartilhada entre o elemento resultante (descendentes) e a partícula alfa:

$$Q_\alpha = (m_p - m_D - m_\alpha) c^2 = E_D + E_\alpha \quad (2.7)$$

em que m_p , m_D e m_α são as massas do núcleo pai, do núcleo filho e da partícula alfa, respetivamente, e E_D e E_α são as energias cinéticas do núcleo descendente e da partícula alfa. Partindo do princípio que o núcleo em decomposição está em repouso, o núcleo descendente deve recuar no sentido oposto à direção inicial da partícula alfa e com o mesmo momento linear (i.e. $m_D v_D = m_\alpha v_\alpha$) [Lilo1]. Do cálculo da razão entre as energias do núcleo descendente e da partícula alfa, obtém-se a seguinte relação:

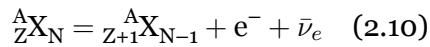
$$\frac{E_D}{E_\alpha} = \frac{\frac{1}{2} m v_D^2}{\frac{1}{2} m v_\alpha^2} = \frac{(m_D v_D)^2 m_\alpha}{(m_\alpha v_\alpha)^2 m_D} = \frac{m_\alpha}{m_D} \quad (2.8)$$

Combinando as equações 2.7 e 2.8, podemos rescrever a equação (2.7) do seguinte modo:

$$Q_\alpha = E_\alpha \left(1 + \frac{m_\alpha}{m_D} \right) \quad (2.9)$$

2.3.2 Decaimento β^-

Num decaimento β^- , o núcleo emite simultaneamente um eletrão, ou partícula beta negativa, ${}_{-1}^0\beta$ e um antineutrino, ${}^0_0\bar{\nu}$. Estas partículas são ambas criadas no momento do decaimento nuclear.



Quer o antineutrino quer a sua antipartícula, o neutrino ${}^0_0\nu$, são caracterizados por possuírem carga e massa nulas. A energia libertada durante um decaimento β^- pode ser facilmente calculada através da seguinte equação:

$$Q_{\beta^-} = m_p - (m_D + m_e) \quad (2.11)$$

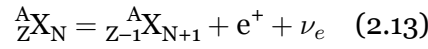
em que m_p , m_D e m_e são, respetivamente, as massas do núcleo pai, do núcleo descendente e do eletrão. Pode também expressar-se a energia libertada, durante um decaimento, em termos de energia cinética, da seguinte forma:

$$Q = E_{\beta^-} + E_{\bar{\nu}} \quad (2.12)$$

em que E_{β^-} e $E_{\bar{\nu}}$ são as energias cinéticas iniciais dos elétrons e do antineutrino. Dependendo das direções relativas do momento linear dos três produtos do decaimento (β^- , $\bar{\nu}$, núcleo de recuo), as energias cinéticas E_{β^-} e $E_{\bar{\nu}}$ podem ter qualquer valor entre zero e Q [Cho13].

2.3.3 Decaimento β^+ e a captura do elétron

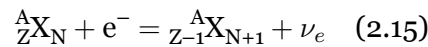
No decaimento β^+ , o núcleo emite um positrão, ou partícula beta positiva, ${}^+_0\beta$ e um neutrino.



Neste caso, a energia libertada no decaimento é:

$$Q_{\beta^+} = {}^A_{Z-1}X_{N+1} + e^+ + \nu_e \quad (2.14)$$

Para que o processo prossiga espontaneamente ($Q_{\beta^+} > 0$), o decaimento β^+ tem um limiar energia de $2m_0c^2$. Outro processo, pelo qual a carga nuclear também diminui por uma unidade $Z \rightarrow (Z - 1)$, é conhecido como captura de elétron. Um elétron atômico é capturado por um próton, transformando-se assim em um nêutron ligado e emitindo um neutrino. Este processo deixa o átomo final num estado excitado e a reação nuclear pode ser apresentada da seguinte forma:



A energia libertada neste processo de captura do elétron (EC) é dada por:

$$Q_{EC} = M_Pc^2 - (M_Dc^2 + B_n) \quad (2.16)$$

em que B_n é a energia de ligação do n -ésimo-elétron ($n = K, L_I, L_{II}, L_{III}, M_I, \dots$) [L.G99].

2.3.4 Decaimento gama

Um núcleo pode ser conduzido para um estado excitado por uma variedade de processos. Por exemplo, os decaimentos alfa e beta podem deixar os núcleos excitados e são então produzidas muitas reações nucleares. Um núcleo excitado pode sempre decair para um estado de menor energia pela emissão de radiação eletromagnética. No caso mais simples, no qual os níveis envolvidos são ambos estados de próton único, o decaimento consiste em uma transição do próton do estado superior para o inferior. Este processo é análogo à transição de um elétron atômico excitado de um nível de maior energia para um nível mais baixo, acompanhada de emissão eletromagnética ou da ejeção de um elétron de Auger. As características subjacentes à emissão eletromagnética podem ser entendidas recorrendo a conceitos clássicos derivados das equações de Maxwell. Com mais detalhe e precisão, podem ser explicadas apenas com recurso à Mecânica Quântica. A diferença entre o momento angular e as paridades relativas dos estados nucleares envolvidos na transição desempenha um papel crucial na determinação da probabilidade de transição. Se o núcleo excitado tiver

uma massa em repouso, M_0^* e o estado final tiver uma massa em repouso, M_0 , pelo princípio de conservação da energia e do momento linear, temos o seguinte:

$$M_0^* c^2 = M_0 c^2 + E_\gamma + T_\alpha \quad (2.17)$$

$$0 = P_\gamma + P_\alpha \quad (2.18)$$

Nas equações anteriores E_γ e P_γ são, respetivamente, a energia e o momento linear da radiação gama, c a velocidade da luz, T_α a energia cinética de recuo e P_α o momento linear do núcleo final [Mey67]. A energia libertada pela radiação gama pode então apresentar-se da seguinte forma:

$$E_\gamma \approx (M_0^* - M_0) C^2 \quad (2.19)$$

Normalmente, as transições resultantes numa emissão gama deixam o número atómico e o número de massa constantes, sendo conhecidas como transições isoméricas [Mey67].

2.4 Atividade

A atividade de uma amostra radioativa é definida como o número de decaimentos por unidade de tempo de acordo com a expressão [Lero4]:

$$A(t) = \lambda N(t) \quad (2.20)$$

Embora a antiga unidade de atividade de uma amostra radioativa, o curie (Ci), seja ainda utilizada, a unidade S.I. é o becquerel (Bq) que corresponde a um decaimento por segundo. A relação entre ambas é: $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 3,7 \times 10^{10} \text{ decaimentos/s}$.

Importa referir, que 1 Bq corresponde a uma atividade baixíssima, já que o corpo humano tem, normalmente, uma atividade de 9000 Bq (cerca de 100 Bq por cada kg). Isto acontece, essencialmente, por causa do potássio ^{40}K e do carbono ^{14}C , que são predominantemente ingeridos a partir de um grande número de alimentos [Cla16].

2.5 Grandezas dosimétricas

A exposição a radiações ionizantes inclui, também, determinados tratamentos médicos e outras atividades que envolvem o uso de materiais radioativos. Estudos científicos mostram que a exposição à radiação ionizante, acima de certos níveis, pode resultar em efeitos adversos à saúde, incluindo o aparecimento de neoplasias. Daí que a exposição à radiação ionizante deva ser monitorizada e controlada. A aplicação das recomendações da ICRU requer um amplo conhecimento de uma variedade de grandezas e conceitos, sendo

muitas destas utilizadas em diversos campos da ciência [I.E07]. Certas grandezas são utilizadas exclusivamente no domínio da proteção radiológica, uma vez que contêm fatores de ponderação que se referem a diferentes tipos de energia da radiação, bem como levar em conta a radiosensibilidade relativa dos diferentes tipos de órgãos e tecidos do organismo.

2.5.1 Fluência

A fluência, de um feixe de partículas, é uma grandeza que caracteriza o campo de radiação quanto ao número de partículas que atravessam uma determinada região do espaço e é definida como:

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (2.21)$$

Onde dN representa o número de partículas incidentes numa esfera de secção reta da , uma área infinitesimal perpendicular à direção do feixe, que as partículas atravessam [Sha01].

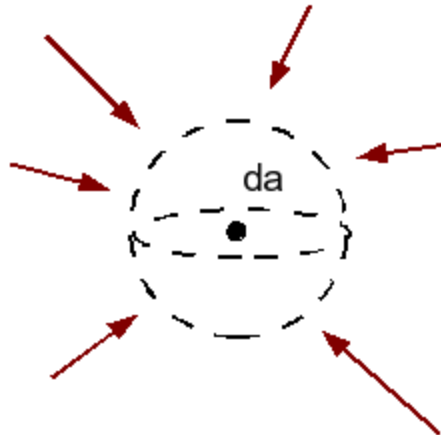


Figura 2.2: Radiação incidente numa esfera de secção reta da [Sha01].

Para a definição da fluência não importa a direção da partícula (daí usar-se a esfera). A definição aplica-se a qualquer tipo de partícula ou feixe. Define-se taxa (ou débito) de fluência como sendo:

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dN}{da} \right) (\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}) \quad (2.22)$$

De salientar que alguns autores consideram a taxa de fluência como sendo a grandeza fundamental, em vez da fluência, uma vez que os feixes são dinâmicos e trata-se de uma grandeza medida num dado intervalo de tempo.

2.5.2 Fluência energética

Para um feixe de partículas monocromático define-se a fluência energética como a razão:

$$\Psi = \frac{dR}{dA} = E \frac{dN}{da} \quad (\text{J m}^{-2}) \quad (2.23)$$

Em que dR é a energia radiante que entra numa esfera de secção reta da . A energia radiante dR é basicamente a energia cinética das partículas contabilizadas na fluência. Para a energia radiante excluímos a energia devida à massa das partículas.

Define-se taxa de fluência energética como sendo:

$$\Phi = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d}{dt} \left(E \frac{dN}{da} \right) \quad (\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}) \quad (2.24)$$

2.5.3 Kerma

O Kerma, *Kinectic energy released per unit of mass*, trata-se da energia cinética libertada por unidade de massa, sendo definido como:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (2.25)$$

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 [I.E07]. A unidade S. I. do Kerma é J kg^{-1} ou gray (Gy). O conceito de Kerma engloba a energia recebida pelas partículas carregadas, normalmente eletrões resultantes da ionização, sendo que estes eletrões podem dissipar essa energia através das sucessivas colisões com outros eletrões ou através da produção de radiação de travagem (bremsstrahlung). Assim podemos separar o Kerma em duas componentes:

$$K = K_c + K_r \quad (2.26)$$

onde K_c representa o Kerma de colisão quando a energia é dissipada localmente (por ionizações e/ou excitações), e K_r é o Kerma de radiação quando a energia é dissipada longe do local da incidência, por meio da emissão de raios-X.

2.5.4 Dose

Em termos de proteção é muito importante o conceito de dose de radiação absorvida ou a quantidade de energia depositada na matéria por qualquer tipo de radiação ionizante em qualquer tipo de material. Assim, define-se dose como a energia absorvida, proveniente de qualquer tipo de radiação, por unidade de massa do material absorvente como:

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (2.27)$$

onde $d\varepsilon$ é a energia média transmitida pelas partículas ionizantes a um material de massa dm . A unidade S.I de dose é o Gy e corresponde à absorção de um joule de energia por um quilograma de material [LBO4].

2.5.5 Dose equivalente

A dose equivalente H_T num determinado tecido ou órgão, T, definida como a soma algébrica do produto da dose média absorvida, pelo fator de ponderação da radiação, W_R , dependente do tipo e energia da radiação incidente R:

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R} \quad (2.28)$$

A dose equivalente é expressa em $J\ kg^{-1}$ e é também usualmente expressa em Sv (sievert). A soma é executada sobre todos os tipos de radiações envolvidos. Os valores de W_R apresentados na tabela 2.1 adotados pela ICRP 103 [ICRO7a] baseiam-se principalmente em dados experimentais da RBE (Relative Biological Effectiveness) para os vários tipos de radiações em doses baixas.

Tabela 2.1: Valores de fatores de ponderação da radiação[ICRO7a].

Tipos e intervalos de energia		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

2.5.6 Dose efetiva

O risco de todos os efeitos estocásticos para um indivíduo irradiado é representado pela dose efetiva, E, definida como a soma algébrica das doses equivalentes ponderadas sobre todos tecidos:

$$E = \sum_T W_T H_T \quad (2.29)$$

Tal como a dose equivalente, H_T , a dose efetiva, E é expressa em Sv. O risco para todos os efeitos estocásticos depende apenas do valor da dose efetiva, caso o corpo seja ou não

irradiado de forma uniforme. No caso uniforme, a irradiação do corpo inteiro, H_T é o mesmo em todo o corpo. Uma vez que a soma dos fatores de ponderação dos tecidos é igual a 1, a dose efetiva é igual à dose equivalente:

$$E = \sum_T W_T H_T = H_T \sum_T W_T = H_T \quad (2.30)$$

A tabela 2.2 mostra os fatores de ponderação dos mais variados tecidos ou órgãos, são valores médios calculados a partir de uma população de referência, de ambos os sexos e de uma vasta gama de idades.

Tabela 2.2: Fatores de ponderação de tecidos ou órgãos [ICR07a, ICR90, ICR93].

Órgão ou tecido	W_T
Medula óssea, cólon, pulmão, mamas e tecidos restantes	0,12
Gónadas	0,08
Bexiga, esôfago, fígado e tireoide	0,04
Superfície dos ossos, cérebro, glândulas salivares e pele	0,01
Alvéolo pulmonar humano	0,04
Região pulmonar linfática	0,00012

2.5.7 Equivalente de dose

O equivalente de dose num ponto do tecido é o produto da dose absorvida, D , e o fator de qualidade, Q , para a radiação específica nesse ponto e é dada por:

$$H = D Q \quad (2.31)$$

A unidade S.I. é igualmente expressa em $J kg^{-1}$ ou Sv. Os fatores de qualidade representados na tabela 2.3 são adimensionais e constituem fatores de peso provenientes da simplificação dos valores da RBE dos diferentes tipos de radiação, na indução de determinado tipo de efeito biológico. Na equivalência, as diferenças entre as radiações foram expressas pelos vários valores do LET ou seja, o valor do Q foi obtido em função do LET [ICR07b].

Tabela 2.3: Tabela de fatores de qualidade para diversos tipos de radiações e partículas [ICR07b].

Tipo de radiação/partícula	Q
Radiação X, radiação γ e eletrões	1
Protões e partículas com uma unidade de carga e com massa em repouso maior que uma unidade de atômica e de energia desconhecida	10
Neutrões com energia desconhecida	20
Partículas alfa e outras partículas com carga superior a uma unidade de carga	20

Capítulo 3

Interação da radiação ionizante com a matéria

Para que se compreenda a base física da dosimetria das radiações e a teoria da proteção radiológica, deve-se compreender os mecanismos pelos quais as várias radiações interagem com a matéria. Na maioria dos casos, estas interações envolvem uma transferência de energia da radiação para a matéria com a qual esta interage. A radiação pode interagir com os elétrons ou com o núcleo atômico. A secção eficaz de ocorrência de qualquer categoria particular de interação e consequentemente o poder penetrante das mais variadas radiações, depende do tipo e da energia da radiação incidente, bem como da natureza do meio absorvente. Em todos os casos, a excitação e ionização dos átomos resultam da sua interação com a radiação [Cem09]. Um dos efeitos resultantes da interação da radiação eletromagnética de alta energia (raios gama e raios X) com os elétrons atômicos é o fenómeno de atenuação do feixe. Dos mais variados mecanismos de interação destaca-se a absorção completa da energia do fóton, o que resulta num novo fóton de energia menor que viaja numa direção diferente (efeito de Compton), a ionização do átomo e a libertação de um elétron orbital (efeito fotoelétrico) e a produção de pares [Fra10].

Outro aspeto importante consiste na análise da interação das partículas carregadas com a matéria. Sempre que um núcleo instável emite radiação ionizante esta, consoante as suas características e energia, poderá interagir com a matéria, provocando diferentes alterações a nível atômico e subatômico. As partículas carregadas interagem com a matéria de uma forma completamente diferente dos fótons, uma vez que, devido às forças coulombianas, estas partículas interagem com mais do que um átomo ou elétron. Embora possa haver interações mais intensas, nas quais a partícula perde, imediatamente, grande parte da sua energia, em geral, esta vai sendo gradualmente transferida em cada colisão [ICR71]. Este processo permanece até que a partícula perca toda a sua energia, deixando de ser considerada radiação ionizante. A probabilidade de uma partícula deste tipo atravessar a matéria sem interagir é tão pequena que se considera desprezável. Em média, uma partícula de 1 MeV colide cerca de 10^5 vezes antes de perder toda a sua energia. Para além deste, existe outro tipo de interação, comum no caso dos neutrões, na qual estas partículas são absorvidas pelos átomos provocando uma reação nuclear. Sempre que ocorrem, estas colisões entre a partícula e o núcleo, resultam em perda radiativa de energia, *bremstrahlung*. Por outro lado, as partículas podem igualmente ser dispersadas sem perda significativa de energia. No caso dos elétrons, por possuírem menor massa, a dispersão múltipla é significativamente superior à que ocorre no caso das partículas pesadas. Além das interações coulombianas, as partículas carregadas pesadas dão origem a reações com produção de núclídeos radioativos como acontece, por exemplo, quando um feixe de prótons interage com um tecido produzindo ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , radioisótopos emissores de positrões de curta duração [Kha14]. O mecanismo de interação das partículas com a matéria depende da natureza das partículas, especialmente da razão entre a carga e a massa. Dependendo da forma como as partículas interagem com

a matéria, podem ser definidos quatro grupo de partículas:

- Partículas carregadas pesadas (partículas alfa).
- Partículas carregadas leves (eletrões e positrões).
- Fotões (partículas neutras sem massa).
- Neutrões (partículas pesadas neutras).

3.1 Definição de secção eficaz

A secção eficaz, é uma grandeza física fundamental na descrição dos fenómenos microscópicos, que permite saber qual é a probabilidade de uma interação ocorrer.

Para definir a secção eficaz considera-se uma situação em que um feixe de partículas, que se deslocam com uma dada velocidade $|\vec{v}|$, incide num alvo. Se no feixe existirem n_0 partículas por unidade de volume, o fluxo de partículas é:

$$\phi = n_0 v \quad (3.1)$$

Conclui-se que o fluxo é, por definição, o número de partículas, do feixe incidente, que incide no alvo por unidade de área e por unidade de tempo. Para um alvo fino, contendo N_a partículas, o número de partículas dispersas por unidade de tempo N_d é dado por:

$$N_d = \phi N_a \sigma \quad (3.2)$$

onde σ representa a secção eficaz.

Relacionando a secção eficaz com o conceito clássico de probabilidade nota-se que o número de partículas incidentes por unidade de tempo, N_0 , é igual ao produto do fluxo de partículas pela área total do alvo irradiado:

$$N_0 = \phi A \quad (3.3)$$

A razão N_d/N_0 traduz a probabilidade de ocorrência de uma interação e é dada por:

$$\frac{N_d}{N_0} = \frac{N_a \sigma}{A} \quad (3.4)$$

O que permite concluir que a secção eficaz é efetivamente proporcional à probabilidade de ocorrência da interação.

A equação 3.4 também permite uma interpretação clássica da secção eficaz como sendo a área efetiva do alvo que participa na interação. Classicamente a secção eficaz de um alvo esférico de raio r é dada pela área da sua secção reta πr^2 .

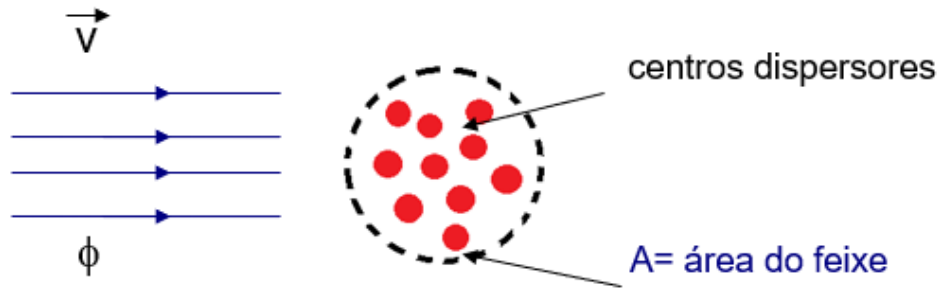


Figura 3.1: Interação de um feixe de partículas de secção reta A com um alvo.

Para se efetuar a descrição total de um processo de interação é imperioso conhecer as distribuições das seções eficazes em termos da energia do feixe e da direção das partículas dispersas na interação. Conhecendo as seções eficazes diferenciais em ângulo sólido, $d\sigma/d\Omega$, para um determinado valor E da energia do feixe, por integração, obtém-se a secção eficaz em função da energia:

$$\sigma(E) = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \quad (3.5)$$

3.2 Tipos de interações da radiação ionizante com a matéria

Das interações da radiação ionizante com a matéria destacam-se as reações nucleares, interação com os neutrões (não será abordada neste ponto, não tem ligação direta com a temática desta tese), a interação das partículas carregadas com a matéria e a interação da radiação gama com a matéria.

3.2.1 Reações nucleares

Quando dois núcleos se movem, um em direção ao outro, apesar da repulsão coulombiana, podem eventualmente aproximar-se o suficiente para que haja interação nuclear entre as partículas de um núcleo com as partículas do outro. Em 1936, Bohr, estudando as reações nucleares, observou que estas ocorrem em duas fases: primeiro há a formação de um núcleo composto e excitado e, em seguida, a decomposição do núcleo composto, sendo os produtos de reação independentes do modo como o núcleo composto foi formado [PKGR12]. As reações nucleares podem ser analisadas quantitativamente em termos das energias dos núcleos e das partículas envolvidas. Se a reação ocorrer entre partículas carregadas, a partícula incidente deve ter uma energia mínima que lhe permita ultrapassar a barreira de potencial (limiar de reação). Ao contrário das reações endoenergéticas que necessitam desta energia adicional para ocorrerem, as reações exoenergéticas, mesmo no caso das partículas incidentes serem de baixa energia, não precisam de qualquer estímulo, como é, por exemplo, a reação (n, γ) [Kha13].

Neste trabalho o nosso interesse diz respeito à interação de partículas alfa com os meios materiais que, devido ao facto da energia destas partículas ser da ordem de apenas alguns MeV, são essencialmente do tipo coulombiano [Kha13].

3.2.2 Interação da radiação eletromagnética com a matéria

Na faixa de energias que inclui os raios X e os raios gama, há várias interações possíveis da radiação com o átomo, com os eletrões atômicos ou ainda com o núcleo. As secções eficazes de interação (e de não-interação) dependem das características do meio e da radiação. A cada energia de fóton ($h\nu$) corresponde um momento linear associado ($h\nu/c$), podendo ocorrer ‘colisões’ em que o fóton transfere energia e momento para outras partículas. As interações que ocorrem na matéria com fótons de energias na faixa de alguns keV até dezenas de MeV são: o efeito fotoelétrico, o efeito de Compton, a produção de pares e a dispersão de Rayleigh [Ran04].

3.2.2.1 Efeito fotoelétrico

Para energias baixas (< 100 KeV) o efeito fotoelétrico é dominante nos materiais de baixo número atômico. Este efeito, é caracterizado pela transferência total de energia de um fóton para o átomo, sendo conseqüentemente ejetado um eletrão com uma energia cinética bem definida, T , dada pela seguinte equação:

$$T = h\nu - b \quad (3.6)$$

Onde h é a constante de Planck, ν é a frequência da radiação e b é a energia de ligação do eletrão orbital [Tso95].

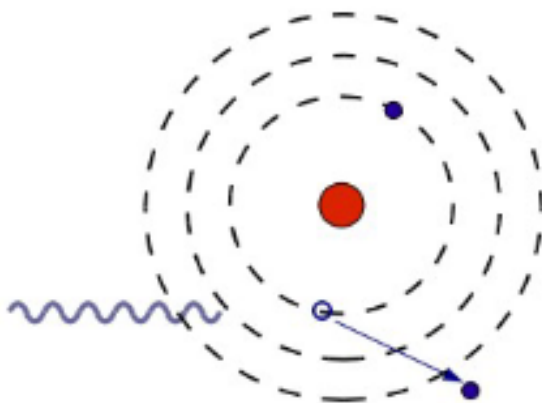


Figura 3.2: Absorção fotoelétrica.

Após o fenómeno de absorção do fóton, o átomo, num estado excitado, regressa ao estado fundamental através da emissão de fótons de fluorescência ou eletrões de Auger.

A fração de ionizações que resultam da emissão de fótons de fluorescência é designada de rendimento de fluorescência. O rendimento de fluorescência da camada K é dado por:

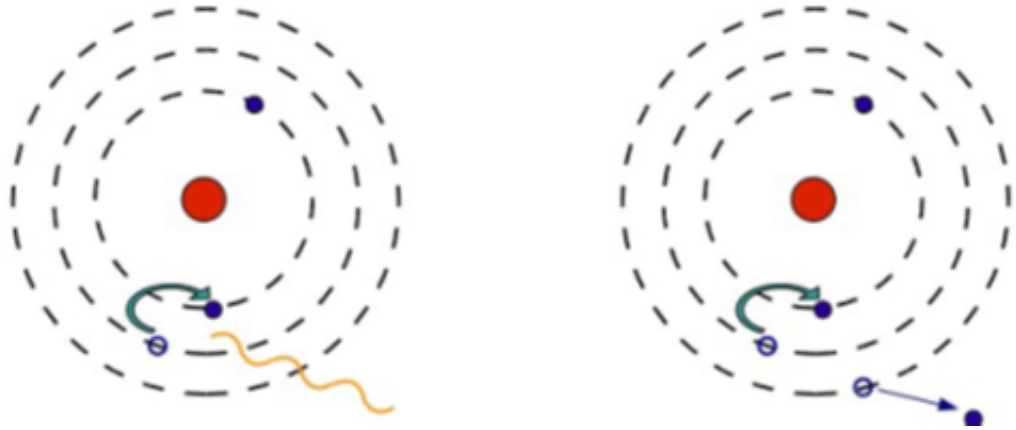


Figura 3.3: Emissão de radiação devido ao efeito fotoelétrico, à esquerda emissão de radiação por fluorescência e à direita emissão de elétrons de Auger.

$$\omega_k = \frac{n_{fk}}{n_{vk}} \quad (3.7)$$

onde n_{fk} e n_{vk} são respetivamente o número de fótons k e número de lacunas k .

No efeito fotoelétrico há uma radiação característica X que pode escapar.

\bar{E}_k , \bar{E}_L correspondem à energia média dos fótons de fluorescência da camada K , L , ...
 ω_k , ω_L são os rendimentos de fluorescência (elétrons de Auger que contam para a energia depositada), τ_k e τ_L correspondem aos coeficientes de interação.

Como $\tau = N_{A\rho}\delta^{foto}/A$ os coeficientes parciais são proporcionais às seções eficazes de absorção de cada uma das camadas: τ_k/τ é a % de absorção por efeito fotoelétrico na camada K ; ω_k é a % de emissão de radiação X devida a transições de elétrons para a camada K ; $\frac{\tau_k}{\tau}\omega_k$ é a probabilidade de emissão de um fóton X numa transição K . Relativamente ao total da energia $h\nu$ do fóton, a percentagem de energia emitida sob a forma de radiação característica é dada por $\bar{E}_k/h\nu$. Relativamente a todos os casos possíveis a fração emitida $= \frac{\tau_k}{\tau}\frac{\bar{E}_k}{h\nu}\omega_k + \frac{\tau_L}{\tau}\frac{\bar{E}_L}{h\nu}\omega_L \dots = \frac{\delta}{h\nu}$ em que δ é a energia média emitida por fluorescência por cada fóton absorvido de energia $h\nu$. Nos tecidos biológicos esta fração é pequena: ω_k , ω_L são pequenos e $\bar{E}_k \sim 0,5$ keV.

3.2.2.2 Efeito de Compton

Neste efeito, o fóton interage com um elétron periférico do átomo, cedendo-lhe uma parte da sua energia, sendo emitido um fóton menos energético, que continua a sua trajetória dentro do material, mas numa direção diferente. Este efeito foi observado pela primeira vez por Compton (1922) e a sua explicação teórica está representada graficamente na figura 3.4 [Rano4].

Como a transferência de energia depende da direção do elétron emergente e esta é aleatória, um fóton de energia fixa pode resultar em elétrons cujo nível de energia pode variar desde zero até um valor máximo. O efeito de Compton é predominante para energias intermédias,

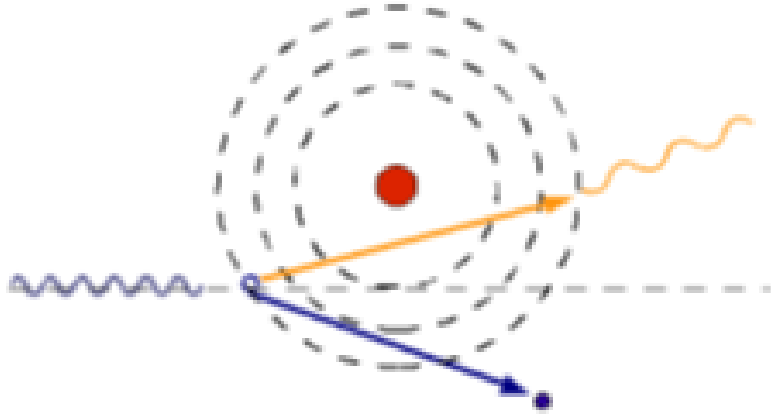


Figura 3.4: Efeito de Compton.

isto é, de 100 keV a 1 MeV. Para energias mais baixas, da ordem dos keV, o fóton disperso leva consigo uma fração apreciável da energia incidente. Contudo, para energias mais elevadas isto já não se verifica. Tal facto significa que, para energias menores a fração de energia que é diretamente depositada numa única interação de Compton (i.e. passada, ao eletrão) é pequena. A energia do fóton disperso é função da energia do fóton incidente:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + h\nu/m_e c^2(1 - \cos\theta)} \quad (3.8)$$

A secção eficaz de Compton pode ser separada em dois termos: um relativo à absorção de energia (que é transmitida para o eletrão) e outro referente à probabilidade de haver transferência de energia para o fóton disperso:

$$\sigma^c = \sigma_a^c + \sigma_s^c \quad (3.9)$$

Os valores destas secções eficazes parciais são:

$$\sigma_a^c = \left(\frac{T}{h\nu} \right) \sigma^c$$

$$\sigma_s^c = \left(\frac{h\nu'}{h\nu} \right) \sigma^c$$

Onde $h\nu$ é a energia do fóton incidente, T é a energia cinética do eletrão e $h\nu'$ é a energia do fóton disperso. Para cada evento tem-se $h\nu = h\nu' + T$. A secção eficaz de Compton é aproximadamente constante para energias baixas (até 100 keV, domínio da radiologia). Este valor diminui bastante para altas energias (> 1 MeV), onde a criação de pares se torna dominante. A secção eficaz de Klein-Nishina é dada por eletrão, sendo assim independente de Z . A secção eficaz atómica é o produto de Z pela secção eficaz de Klein-Nishina:

$$\sigma_{atm}^c = Z\sigma_{ele}^c \quad (3.10)$$

3.2.2.3 Produção de pares

A produção de pares trata-se de uma das formas predominantes de absorção de radiação eletromagnética de alta energia, também conhecida como formação de par elétron-positrão e que ocorre quando fótons de energia, superior a 1,02 MeV, passam próximo do núcleo, interagindo com um campo elétrico nuclear colombiano. Nesta interação, o fóton dá origem a um par elétron-positrão.

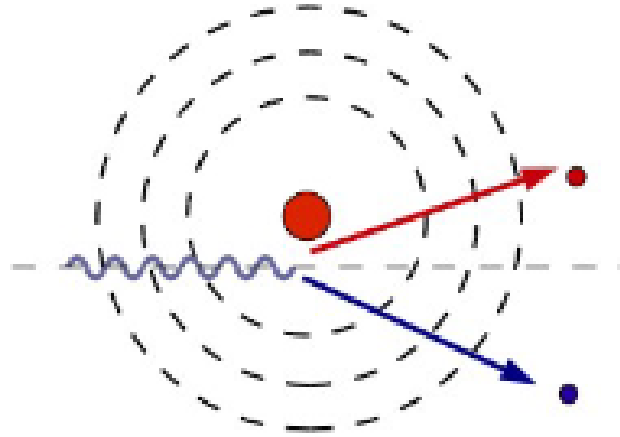


Figura 3.5: Produção de pares.

Também é possível a interação com os elétrons atômicos, resultando na ejeção desse elétron: emissão de um tripleto $e^+e^-e^-$. A secção eficaz da produção de pares varia com Z^2 , enquanto que a secção eficaz atômica da produção de tripletos varia com Z [Jam07].

3.2.2.4 Dispersão de Rayleigh

Na dispersão de Rayleigh não existe transferência de energia para o meio. O fóton é disperso de forma coerente por todos os elétrons do átomo (existe uma fase bem definida entre a dispersão causada por cada um deles). A distribuição da secção eficaz em função do ângulo tem um pico pronunciado na região dos pequenos ângulos. Por exemplo, para 1 MeV, mais de 50% dos fótons dispersos estão dentro de um ângulo de 5° . Para baixas energias, em particular para materiais de Z elevado, a distribuição angular é mais alargada. Mas neste último caso, o modo dominante de ação entre fótons é através do efeito fotoelétrico. Um critério prático para determinar a distribuição angular de Rayleigh é considerar a seguinte relação:

$$\theta_R = 2 \arcsin \left[\frac{0,0133 Z^{1/3}}{E} \right] = 2 \arcsin \left[\frac{0,0266 Z^{1/3}}{\varepsilon} \right] \quad (3.11)$$

onde θ_R (em rad) é o semi ângulo de abertura de um cone contendo pelo menos 75% dos fótons de Rayleigh dispersados, Z é o número atômico e E é a energia em MeV [Rano4].

3.3 Interação de partículas carregadas com a matéria

As partículas carregadas e que incidem com uma determinada energia cinética num meio material perdem parte significativa dessa energia ao atravessá-lo. Essa perda de energia cinética é causada por três fenômenos: interação com núcleos atômicos, emissão de radiação de travagem (*bremsstrahlung*) e a ionização e excitação dos átomos do meio material. As partículas alfa interagem com os elétrons ou núcleos dos átomos através da força coulombiana. Uma parte significativa das interações resulta na perda de energia da partícula carregada, de onde se pode concluir, que a probabilidade de uma partícula alfa atravessar um meio denso é praticamente nula. Consideremos uma partícula alfa proveniente do decaimento do ^{214}Po , um isótopo descendente do ^{222}Rn . Esta partícula tem uma energia de 7,69 MeV e, como a energia necessária para excitar um elétron de um gás varia entre 25 e 40 eV, isto significa que, no ar ambiente, uma partícula alfa, antes de perder toda a sua energia, sofre em média 10^5 interações [Leo94]. No caso das partículas carregadas, as interações da força de força de Coulomb podem ser apenas caracterizadas em termos do tamanho relativo dos parâmetros clássicos de impacto b em função do raio atômico a , como indicado na figura 3.6 [Atto4].

As colisões duras, suaves e as forças de interação de Coulomb com o campo nuclear externo tornam-se dominantes quando $b \approx a$, $b \gg a$ e $b \ll a$ respetivamente [Atto4].

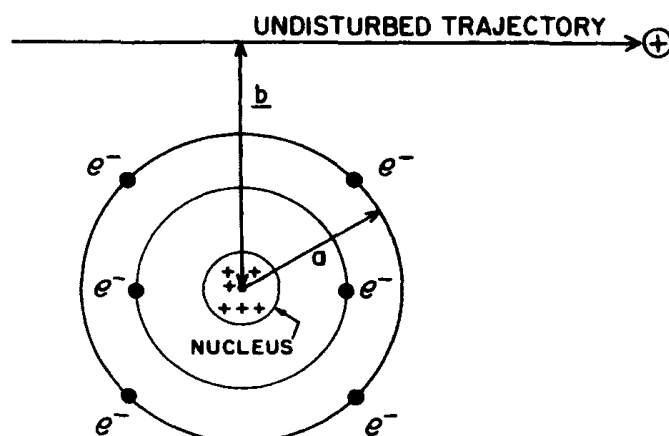


Figura 3.6: Parâmetros importantes das partículas carregadas quando colidem com os átomos: a é o raio atômico clássico; b é o parâmetro de impacto clássico [Atto4].

Quando o parâmetro de impacto b é da ordem das dimensões atômicas, torna-se mais provável que a partícula incidente interaja principalmente com um único elétron atômico, que é ejetado do átomo com considerável energia cinética e é chamado de raio delta δ . No tratamento teórico do processo de *knock-on*, as energias de ligação são negligenciadas e os elétrons atômicos tratados como “livres”. Os raios δ , como são suficientemente energéticos, não sofrem interações coulombianas adicionais por si só, pelo que dissipam a sua energia cinética ao longo de um percurso independente (designado “spur”), a partir da partícula carregada primária [Atto4].

A probabilidade de colisões duras ($b \approx a$) depende do spin quântico-mecânico e efeitos de troca, envolvendo assim, a natureza da partícula incidente. Como se verá, a forma das

equações do poder de paragem, que incluem o efeito de colisões duras, depende do tipo de partícula e são diferentes para eletrões e para partículas pesadas. Embora as colisões duras ocorram em menor número do que as colisões suaves, as frações da energia da partícula primária, perdidas por estes dois processos, são geralmente equiparáveis [Atto4].

Por outro lado, no caso das colisões suaves ($b \gg a$), quando as partículas carregadas passam a uma distância, a , considerável de um átomo, a influência dos campos coulombianos das partículas, irá afetar o átomo como um todo, distorcendo-o e excitando-o para um nível de energia superior e, por vezes, ionizando-o ao ejetar um eletrão de valência. O efeito resultante traduz-se na transferência de uma pequena quantidade de energia (poucos eV) para um átomo do meio absorvente. Pelo facto dos valores de b serem grandes, as colisões suaves são as interações mais frequentes de partículas carregadas e representam cerca de metade da energia transferida para o meio [Atto4].

As forças de interação de Coulomb com o campo nuclear externo ($b \ll a$) ocorrem quando o parâmetro de impacto de uma partícula carregada é muito menor do que o raio atómico e a interação coulombiana dá-se principalmente com o núcleo. Este tipo de interação é mais importante para os eletrões. Contudo, menos de 2 a 3% das interações, o eletrão é dispersado elasticamente, não emite um fóton de raios X nem excita o núcleo e perde, apenas, uma quantidade insignificante de energia cinética, necessária para garantir a conservação do momento linear da colisão. Por conseguinte, este não é um mecanismo de transferência de energia para o meio absorvente, mas é um meio importante de desvio de eletrões [Atto4].

3.4 Interação de partículas carregadas pesadas com a matéria

No processo de interação de partículas carregadas pesadas com a matéria, por exemplo partículas alfa ou prótons, a transferência de energia entre estas partículas e os átomos do meio, com o qual interagem, é muito menor do que no caso dos eletrões. Existe uma probabilidade de ocorrência da interação e, quando isso acontece, estas partículas são praticamente absorvidas pelo material, mesmo que a sua espessura seja muito fina. Ao contrário do que acontece com as partículas sem carga, estas partículas depositam praticamente toda a sua energia no ponto de interação.

3.4.1 Poder de Paragem

Quando as partículas carregadas atravessam um determinado meio, transferem-lhe a sua energia, através de múltiplas colisões e a sua velocidade vai diminuindo. Esta perda de energia, por unidade de comprimento, é designada poder de paragem (*stopping power*):

$$S = -\frac{dE}{dx} \quad (3.12)$$

O poder de paragem pode ser expresso pela equação de Bethe e Bloch (equação 3.13) e o seu valor, para cada tipo de partícula, depende do material:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 \right] \quad (3.13)$$

Pode concluir-se que o poder de paragem depende do quadrado da energia da partícula e aumenta com a diminuição da velocidade.

Na prática, porém, normalmente são adicionadas duas correções: a correção do efeito de densidade δ , e a correção de camada C, de modo que:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \quad (3.14)$$

sendo

$$2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 = 0,1535 \text{ MeV cm}^2/\text{g};$$

$$\beta = v/c;$$

$$\gamma = 1/(1 - \beta^2);$$

m_e - massa do eletrão;

r_e - raio do eletrão ($2,817 \times 10^{-13}$ cm);

N_a - número do Avogrado;

I - potencial médio de excitação do meio;

Z - número atómico do material absorvente;

A - número de massa do material absorvente;

ρ - densidade do material absorvente;

z - carga da partícula incidente em unidades de carga do eletrão e

δ - correção de densidade

C - correção de camada

W_{max} - máxima transferência de energia numa única colisão [Le094].

A perda total de energia da partícula é a soma de três componentes, uma relacionada com as reações nucleares, outra com a radiação de paragem e a terceira com as colisões. A perda de energia devido a reações nucleares pode ser desprezada e a perda por radiação é dissipada longe do ponto onde ocorre a primeira interação. Em geral, a energia que é perdida devido às colisões é absorvida junto da trajetória. Quando se pretende avaliar a energia transferida em torno da trajetória da partícula, torna-se necessário definir um limite. Neste caso, o poder de paragem é designado poder de paragem restrito ou transferência linear de energia LET (*Linear Energy Transfer*).

3.4.2 Alcance das partículas alfa

A penetração das partículas alfa, nos materiais, é muito reduzida, sendo, por exemplo, incapaz de ultrapassar uma folha de papel. Da figura 3.7 pode-se avaliar o alcance de partículas alfa, no ar e em vários materiais, em função da sua energia. Observa-se que o alcance é menor para materiais mais densos e que aumenta com a energia da partícula. O

valor do alcance no ar pode ser estimado semi-empiricamente por expressões do tipo:

$$\langle R \rangle = 0,318 E^{\frac{3}{2}} \quad (3.15)$$

onde $\langle R \rangle$ é o valor médio do alcance (em cm) e E é a energia da partícula alfa (em MeV). Esta relação é válida para a faixa de energias de 3 a 7 MeV, que abrange a quase totalidade dos valores de energia das partículas alfa emitidas.

Na figura 3.7 são apresentados os valores dos alcances de partículas alfa em vários materiais em função da energia.

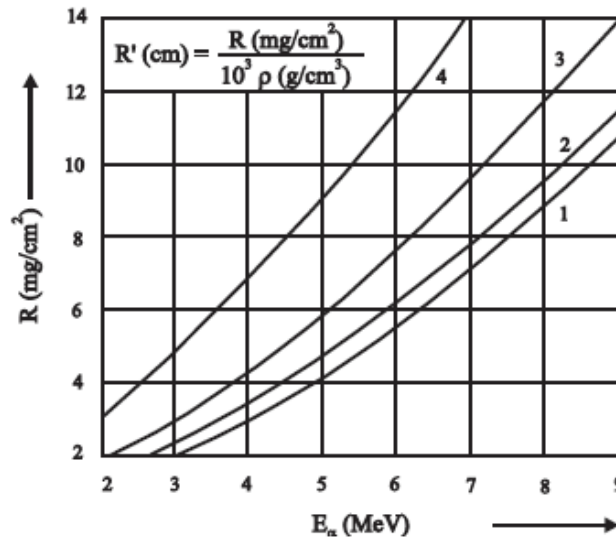


Figura 3.7: Alcance de partículas alfa em vários materiais (densidades em g/cm³): (1) Ar = 0,0013; (2) Tecido = 1,0; (3) Alumínio = 2,70; (4) Cobre = 8,96 [Tau13].

3.4.3 Alcance CSDA e Alcance projetado

Experimentalmente, o alcance das partículas pode, em princípio, ser determinado para um meio opticamente transparente como uma emulsão fotográfica, seguindo microscopicamente cada traço da partícula em três dimensões e obtendo o comprimento médio de muitas dessas partículas idênticas com a mesma energia inicial. Uma quantidade semelhante mas não idêntica é chamada de alcance CSDA (*Continuous Slowing Down Approximation*), que considera que a taxa de perda de energia, ao longo da trajetória, é igual ao poder de paragem. Em termos de poder de paragem mássico, o alcance CSDA é definido como :

$$R_{CSDA} = \int_0^{T_0} \left(\frac{dT}{\rho dx} \right)^{-1} dT \quad (3.16)$$

onde T_0 é a energia inicial da partícula. Se $dT/\rho dx$ está em MeVcm²/g e dT em MeV, então R_{CSDA} tem como unidade g/cm² [Atto4].

O alcance projetado é mais facilmente visualizado em termos de camadas planas de meio absorvente nas quais incide, perpendicularmente, um feixe de partículas carregadas. Conta-se o número de partículas incidentes que penetram na estrutura à medida que a sua espessura aumenta de zero para ∞ (ou para uma espessura suficientemente grande para parar todas as partículas incidentes). O alcance projetado, $\langle t \rangle$, neste caso pode ser definido como:

$$\langle t \rangle = \frac{\int_0^{\infty} t \frac{dN(t)}{dt} dt}{\int_0^{\infty} \frac{dN(t)}{dt} dt} \quad (3.17)$$

Onde N_0 é a diferença entre o número de partículas incidentes e as que sofrem reações nucleares e $N(t)$ é o número de partículas que penetram em uma estrutura de espessura t [Atto4].

No âmbito de uma simulação Monte Carlo, tanto R_{CDA} como $\langle t \rangle$ podem ser calculados usando um programa que simule a propagação de partículas alfa num meio material. O R_{CDA} é determinado pela soma de todos os passos realizados durante o transporte da partícula alfa. Para evitar erros dos valores obtidos do R_{CDA} , os mesmos são corrigidos no programa por intermédio da dispersão múltipla.

3.5 Distribuição da perda de energia

Até aqui a discussão sobre a perda de energia tem-se centrado, principalmente na perda média de energia sofrida por um feixe de partículas carregadas ao atravessarem um meio material com uma determinada espessura. No caso de se considerar apenas uma determinada partícula, a quantidade de energia perdida não será, em geral, igual a um determinado valor médio, devido às flutuações estatísticas que ocorrem no número de colisões sofridas e à energia transferida em cada colisão. Um feixe inicialmente monoenergético, depois de passar por um material de espessura fixa, apresentará uma distribuição de energia em vez de apenas um pico, de uma função delta, deslocado para baixo devido à perda média de energia dada pela fórmula dE/dx . Do ponto de vista teórico, calcular a distribuição das perdas de energia num material com uma determinada espessura é um problema matemático difícil e, geralmente, consideram-se dois casos: meios materiais espessos e meios materiais finos. A distribuição da perda de energia pode ser descrita por uma função gaussiana. Como as perdas de energia estão sujeitas a flutuações estatísticas, duas partículas que tenham a mesma energia inicial e que percorram a mesma distância, não apresentam necessariamente o mesmo processo de perda de energia.

Se o número de colisões da partícula alfa com os elétrons atômicos, ao atravessar um meio material for elevado e cada perda de energia pode ser considerada independente, pode ser aplicado o teorema do limite central [Sig06]. Para meios pouco espessos, “finos”, usam-se distribuições de Landau ou Vavilov, que são distribuições de energia não-simétricas. Em casos práticos, para se definir o limite de espessura para a distribuição em causa usa-se um parâmetro de corte, K , dado pela equação:

$$K = \frac{\bar{\Delta}}{W_{max}} \quad (3.18)$$

onde W_{max} é a energia máxima transferida numa única colisão com o eletrão atómico, dada por [Ber12]:

$$W_{max} = \frac{2m_e \beta^2 \gamma^2}{1 + \frac{2\gamma m_e}{m_\alpha} + \frac{m_e^2}{m_\alpha^2}} \quad (3.19)$$

Nesta equação $\gamma = E/m_\alpha$, E é a energia da partícula, m_α é a massa da partícula alfa incidente e m_e é a massa do eletrão.

O parâmetro $\bar{\Delta}$ representa a energia média perdida ao atravessar a camada “fina” de espessura x e pode ser avaliada através da expressão simplificada da fórmula Bethe Bloch.

$$\bar{\Delta} \cong 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \left(\frac{z}{\beta}\right)^2 x \quad (3.20)$$

3.6 Dispersão múltipla

Uma partícula alfa ao atravessar um meio é, em geral, dispersada pelos núcleos dos átomos segundo pequenos ângulos. A dispersão múltipla é normalmente aplicada quando o número de colisões é suficiente para se implementar os métodos de natureza estatística. Supondo que as colisões entre as partículas são independentes a distribuição de pequenos ângulos tende a ser gaussiana [Per10].

Neste caso é suficiente para muitas aplicações utilizar uma aproximação gaussiana para os 98% das distribuições angulares projectadas. No que se refere à direção de incidência, em condições normais, o ângulo médio de desvio é zero, mas o desvio padrão θ_0 aumenta em função do comprimento x do material que a partícula atravessa, sendo expresso segundo Lynch e Dahl [Ger91] por:

$$\theta_0 = \frac{13,6MeV}{\beta cp} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0,088 \log_{10} \left(\frac{xz^2}{X_0\beta^2} \right) \right] = \frac{13,6MeV}{\beta cp} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0,038 \ln \left(\frac{xz^2}{X_0\beta^2} \right) \right] \quad (3.21)$$

Onde p , βc , e z são, respetivamente, o momento linear, a velocidade e a carga da partícula incidente e x/X_0 é a espessura do meio de dispersão em comprimentos de radiação.

Capítulo 4

O gás radão, suas características e implicações

O urânio é um elemento radioativo que se encontra em abundância na superfície terrestre, principalmente em rochas graníticas, dando origem ao radão, um gás nobre radioativo presente no ambiente, incluindo ar, solo e água. A importância do radão centra-se em dois diferentes aspetos: por um lado, representa um perigo ambiental, com efeitos reconhecidos na saúde humana e, por outro, é uma ferramenta geofísica útil para rastrear propriedades dinâmicas do meio ambiente. Em ambos os casos, a deteção de radão é extremamente relevante, contudo representa um grande desafio técnico. De acordo com o tratado da EURATOM [Boc14], a radioatividade ambiente deve ser monitorizada e relatada.

A medição do radão e dos seus descendentes passou a revestir-se de extrema relevância, desde que este gás foi reconhecido como o principal contribuinte para a dose de radiação natural a que a população se encontra sujeita, sendo inclusivamente classificado, pela OMS, como cancerígeno desde 1988 [UNSO0a]. Esta organização concluiu, em setembro de 2009, que o radão é a segunda causa de cancro de pulmão, a seguir ao fumo do tabaco, contribuindo para 3 a 14% dos casos desta neoplasia, dependendo do nível médio de radão do país [Org09]. Está também provado que, quanto mais baixa for a concentração de radão no interior de uma habitação, menor é o risco associado à sua exposição. Contudo, não está definido qualquer limiar abaixo do qual se possa afirmar que o radão habitacional não apresente um risco associado ao desenvolvimento de neoplasias pulmonares [Lou12, Lau06, Tir10, Axe15, Tsc06].

A OMS estabelece como nível de referência, para a concentração média anual de radão, o valor de 100 Bq m^{-3} e sugere que, se este nível não puder ser aplicado nas condições específicas de cada país, o nível de referência não deverá exceder os 300 Bq m^{-3} [Org09].

A exposição humana a fontes naturais de radiação sempre existiu, isto é, a terra é e tem sido desde sempre, bombardeada por partículas de alta energia com origem no espaço exterior, que geram partículas secundárias nas camadas mais baixas da atmosfera. Por outro lado, a crosta terrestre contém radionuclídeos e, para a maioria dos indivíduos, a exposição à radiação de fundo natural representa a parte mais significativa da sua exposição total à radiação. O gás radão consitui a maior fonte natural de radiação a que as populações estão expostas e representa cerca de metade da exposição total de todas as fontes, figura 4.1.

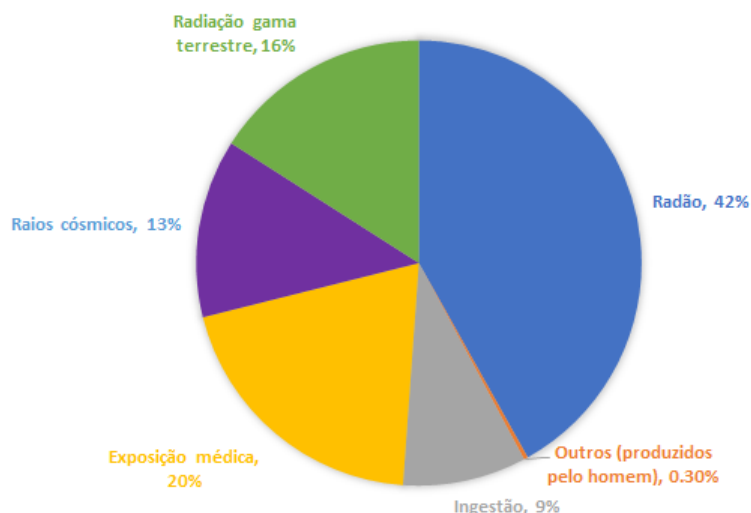


Figura 4.1: Percentagem da dose anual de radiação recebida pela população mundial [Uni10, APA20].

4.1 Origem e propriedades do radão

O radão é um gás radioativo de origem natural, inerte, sem cor e sem cheiro e resulta do decaimento radioativo do urânio, ^{238}U , que está presente no solo, na água e nas rochas. O decaimento radioativo ocorre quando um elemento com excesso de energia, para se tornar mais estável, tem de libertar essa energia. Neste processo o núcleo perde massa, transformando-se num novo elemento.

No caso concreto do ^{238}U o seu descendente direto é o tório, ^{234}Th , que é também instável. A estabilidade nuclear ocorre até se chegar ao último elemento, desta série de decaimentos e transformações de um núcleo noutra, o chumbo, ^{206}Pb . Este processo, conhecido como cadeia de decaimento, está representado esquematicamente na figura 4.2. Como se pode ver, nesta longa cadeia de decaimento, existe um único elemento gasoso, o radão, ^{222}Rn , todos os outros elementos são sólidos. Os elementos desta cadeia de decaimento têm diferentes tempos de meia-vida, que variam desde milhões de anos até microssegundos. O radão em particular tem um tempo de meia-vida de 3,8 dias.

Durante este processo de decaimento, o radão presente nas rochas e solos, liberta-se da estrutura dos grãos minerais [Ott92], num processo designado emanação [sak11]. Dada a sua grande mobilidade, uma vez libertado, desloca-se para os poros, sendo transportado por difusão até atingir a superfície do solo. A este processo dá-se o nome de exalação [Res14, Sah14], figura 4.3. A maior ou menor quantidade de radão que chega à superfície da terra é influenciada por alguns fatores, como por exemplo, a quantidade de urânio presente no solo e nas rochas e a porosidade e permeabilidade dos solos. Ao ser exalado, o radão dissipa-se e mistura-se, rapidamente, com outros gases de modo que a sua concentração em ambientes exteriores é, em geral, bastante baixa, da ordem de 10 Bq m^{-3} [UNSooc].

Em relação às propriedades físicas e químicas, o radão é ligeiramente mais denso do que o ar, a sua densidade é de $9,73 \text{ g L}^{-1}$, o que, sob condições padrão, o torna o gás natural mais pesado. Quando sujeito a temperaturas abaixo do seu ponto de congelamento, o radão apresenta uma fosforescência brilhante, que se torna amarela a temperaturas mais baixas e

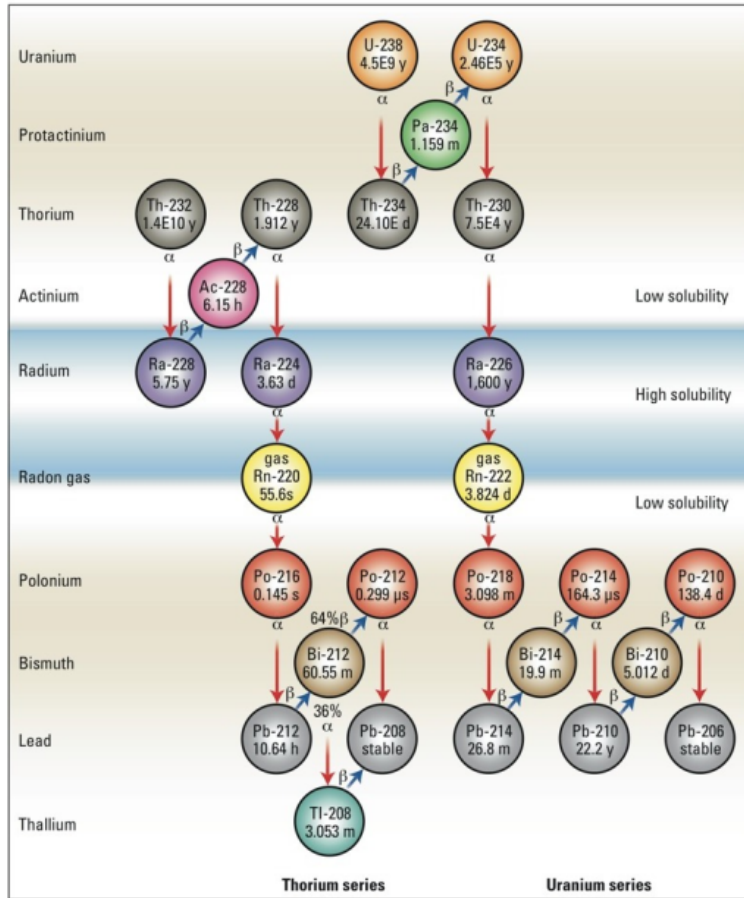


Figura 4.2: Série de decaimento do Urânio e do Tório. As informações relativas aos tempos de meia vida e os decaimentos foram obtidos na base de dados NuDat 2 (NNDC 2013). Abreviaturas: d, dias; h, horas; min, minutos; s, segundos; a, anos [ARS15].

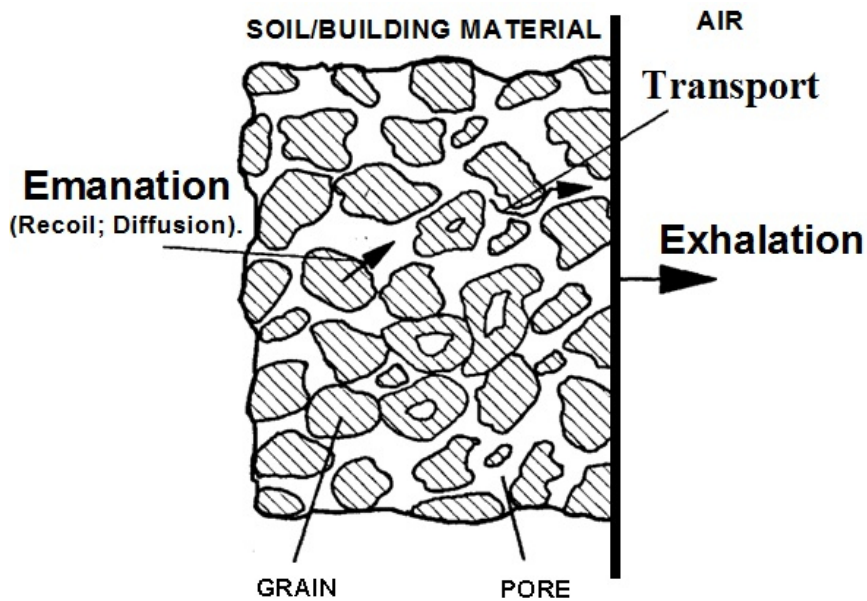


Figura 4.3: Emanação e exalação de radão das rochas [Res14].

laranja avermelhado à temperatura do ar líquido [Lido5]. Foi essa propriedade que, quando foi descoberto, fez com que o radão fosse designado por *niton*, uma palavra proveniente do latim que significava "o brilhante"[Geb07].

4.2 Efeitos e riscos para a saúde

Se o radão for inalado, os seus produtos de decaimento, mais concretamente o ^{218}Po , e o ^{214}Po , que são sólidos e se encontram agregados à superfície de aerossóis, podem fixar-se nos pulmões (figura 4.4), penetrando e irradiando células de membranas mucosas, brônquios e outros tecidos pulmonares. Crê-se que o elemento iniciador do processo de carcinogénese é a energia da radiação ionizante que afeta as células epiteliais brônquicas. Embora os cancros de pulmão relacionados com o radão sejam detetados principalmente nas vias aéreas superiores, o radão aumenta a incidência de todos os tipos histológicos de cancro de pulmão, incluindo o carcinoma de pequenas células, o carcinoma de Aden e o carcinoma de células escamosas [Zap16]. O cancro de pulmão, devido à inalação de produtos de decaimento do radão, constitui o principal risco associado a este gás. Estudos realizados em mineiros permitiram concluir que variáveis como a idade, o tempo de exposição, principalmente, o uso de tabaco influenciam o nível de risco individual. De facto, está provado que o uso de tabaco multiplica enormemente o risco de cancro induzido por radão [U.S92]. Embora não tenham sido demonstrados, de forma consistente, quaisquer outros efeitos do radão na saúde, estudos epidemiológicos confirmam que elevadas concentrações de radão em ambientes fechados aumentam o risco de cancro de pulmão na população em geral. Estima-se que a proporção de casos de cancro de pulmão associados ao radão se situe entre 3% e 14%, dependendo da sua concentração média no país e do método de cálculo empregado [Org09]. Como não se conhece um limiar abaixo do qual se possa afirmar, com certeza, que o radão não constitui um risco, é necessário ter em conta que, baixas concentrações de radão podem resultar em um pequeno aumento do risco de cancro de pulmão. Dos estudos que têm sido realizados sabe-se inclusivamente que, a maioria dos casos de cancro de pulmão induzidos pelo radão, ocorre em situações de exposição a concentrações baixas ou moderadas de radão uma vez que, em geral, existe um menor número de pessoas expostas a altas concentrações de radão em ambientes interiores [Org09].

No gráfico da figura 4.5 estão representadas as mortes resultantes por cancros pulmonares em função da concentração de radão e do consumo de tabaco. A linha castanha representa os não fumadores, a linha verde representa fumadores até aos 30 anos, a linha vermelha representa fumadores até aos 50 anos e a linha azul representa os fumadores ativos. Pode verificar-se que, com o aumento da concentração, a mortalidade por cancro do pulmão aumenta pouco no caso de não fumadores e de fumadores até aos 30 anos de idade. Pode ainda concluir-se que, para os fumadores ativos há um aumento de quase 15%, passando de 200 Bq m^{-3} para 800 Bq m^{-3} .

Tabela 4.1: Propriedades físicas, químicas e radiológicas do radão[SHRD12].

Propriedades	Radão	Referência
Peso molecular	^{222}Rn , ^{220}Rn , ^{219}Ac	Cothern1987 a
cor	Incolor	Lewis 2001
Estado Físico	Gás a 0 °C e a 760 mmHg	Lewis 2001
Ponto de fusão	-71 °C	Lide 2005
Ponto de ebulição	-61,8 °C	Lewis 2001
Densidade a -20 °C	$9,96 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$	Cothern1987 a
Odor	Inodoro	O'Neil et al. 2006
Limiar de odor:		
Água	Inodoro	
Ar	Inodoro	
Solubilidade:		
Água a 20 °C	$230 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$	O'Neil et al. 2006
Solventes orgânicos	Líquido orgânico, ligeira solubilidade em álcool	Weast 1980
Pressão de valor a 25° C ^a	395,2 mmHg	Cothern 1987a
Lei da constante de Henry	Sem dados	
Temperatura de autoignição	Gás nobre; não possui autoignição	
Ponto de inflamação	Gás nobre; não queima	
Limites de inflamação	Gás nobre; não é inflamável	
Meia Vida:		
^{222}Rn	3,8235 dias	DOE 2008
^{220}Rn	55,6 segundos	DOE 2008
^{219}Rn	3,96 segundos	DOE 2008
Energia do decaimento (MeV) e intensidades (%)		DOE 2008
^{222}Rn	Partículas Alfa 4,826 (0,0005%) 4,986 (0,078%) 5,48948 (99,920%)	
^{220}Rn	Raios gama: 0,510 (0,076%) Partículas Alfa 5,747 (0,114%) 6,288 (99,886%)	DOE 2008
^{219}Rn	Partículas Alfa (15 relatados) 6,425 (7,5%) 6,530 (0,12%) 6,553 (12,9%) 6,819 (79,4%)	U.S. DHEW 1970
	Raios gama (dezenas reportadas) 0,0111 (9,6%) 0,0769 (5,0%) 0,0793 (8,4%) 0,2712 (10,8%)	
Atividade específica, $\lambda N/m$ (Ci g ⁻¹):		
^{222}Rn	$1,538 \times 10^5$	Baseado em DOE 2008
^{220}Rn	$9,135 \times 10^8$	Baseado em DOE 2009
^{219}Rn	$1,301 \times 10^{10}$	Baseado em DOE 2010

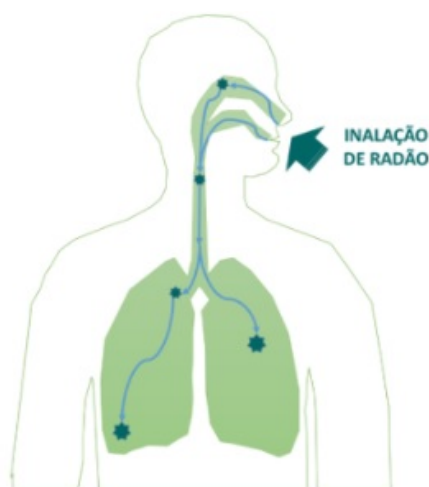


Figura 4.4: Esquema ilustrativo da inalação do radão [APA20].

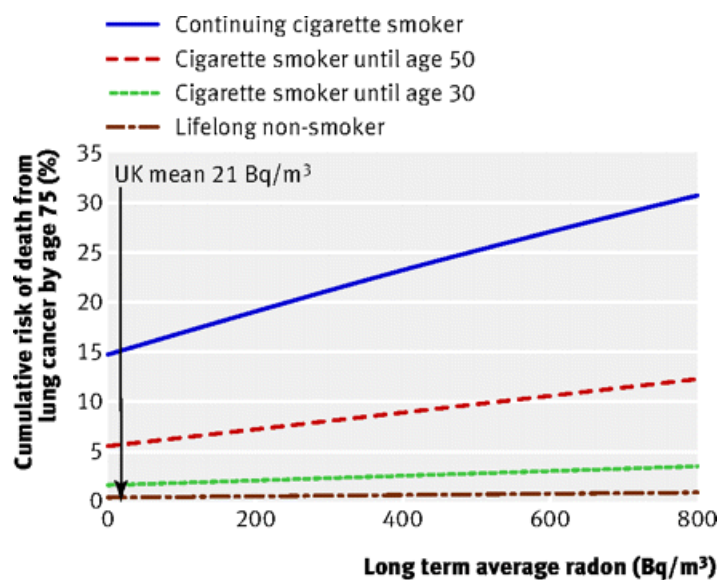


Figura 4.5: Risco acumulado de morte por cancro de pulmão aos 75 anos de idade, de acordo com a concentração média de radão em residências a longo prazo para fumadores ativos e ex-fumadores, no Reino Unido, com base nas taxas de mortalidade de 2006 [GMD08].

4.3 Radão habitacional

Como certos edifícios são construídos em áreas geográficas onde a população se encontra em risco acrescido de exposição ao radão, é fundamental que se promovam ações de sensibilização para os potenciais efeitos, deste gás radioativo, sobre a saúde humana.

O principal mecanismo de transporte do radão, do solo para o interior dos edifícios, é a diferença de pressão atmosférica. Normalmente, como no interior dos edifícios a pressão atmosférica é mais baixa do que a do lado exterior, isto funciona como um aspirador de radão para o seu interior. O radão, que se acumula no interior de edifícios, desloca-se por difusão através de várias vias tais como: o substrato rochoso, poços de abastecimento de água, gases existente no solo, rochas fraturadas, da infraestrutura de drenagem, das fossas, dos alicerces, das guarnições, das fendas e das juntas entre as paredes e o chão, de canalizações mal isoladas, de alguns materiais de construção e, até, das águas usadas durante o duche, figura 4.6. Normalmente, o solo contribui com cerca de 95% para o aumento da concentração de radão no interior de edifícios [Fero06].

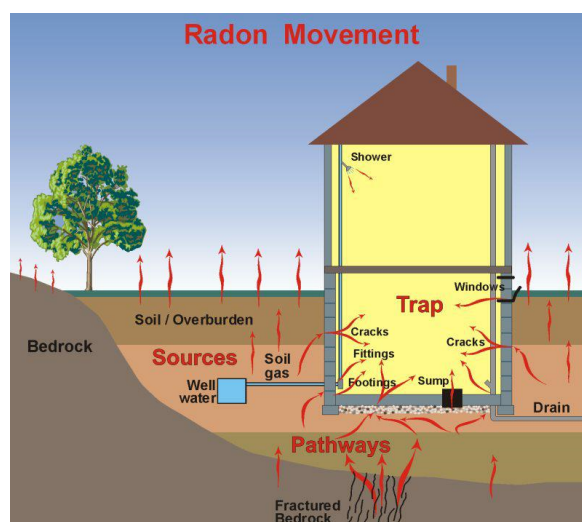


Figura 4.6: Vias de penetração do radão em edifícios [Fri10].

Uma vez que o radão é um gás nobre, isto é, não reage quimicamente e, por isso, não é detetável pelos nossos sentidos, tem de se utilizar métodos de deteção adequados. A medição da concentração de radão no ar, no interior de um edifício, pode ser feita por métodos passivos ou ativos. Neste trabalho, para se medir a concentração de radão no ar interior foi utilizado um método passivo, recorrendo a detetores CR-39. Este assunto será abordado em pormenor no capítulo 5.

4.4 Distribuição do radão habitacional no Mundo

A distribuição de radão não é a mesma em todo o planeta. Há países da OECD (*Organization for Economic Co-operation and Development*), onde foram realizados inquéritos para determinar as concentrações de radão em residências. Verifica-se que a proporção de cancro pulmonares, que ocorrem anualmente e que são induzidos pelo radão, é determinada,

principalmente, pelas concentrações médias de radão medidas no interior das residências. Na tabela 4.2, estão indicados os países da OECD que apresentam, em média, maiores concentrações de radão no ar interior, como é o caso do México, da República Checa, da Finlândia, do Luxemburgo e da Suécia. E, também, aqueles que registam menores concentrações médias, a Austrália, o Japão, o Reino Unido, a Nova Zelândia e a Holanda. Verifica-se, ainda, que em outras partes do globo as médias se situam à volta de 39 Bq m^{-3} , podendo este valor ser considerado com uma estimativa global. Tendo em consideração que esta é uma temática praticamente desconhecida em muitos países, principalmente nos de língua oficial Portuguesa e, em Angola em particular, este foi um dos motivos que suportou a decisão de se desenvolver este estudo.

Tabela 4.2: Valores de concentração de radão no interior nos países da OECD[Org09].

País	Nível de radão no interior [Bq m^{-3}]		
	Média aritmética	Média geométrica	Desvio padrão geométrico
Países da OECD			
Austrália	11	8	2,1
Áustria	99	15	NA
Bélgica	48	38	2
Canadá	28	11	3,9
República Checa	140	44	2,1
Dinamarca	59	39	2,2
Finlândia	120	84	2,1
França	89	53	2
Alemanha	49	37	2
Grécia	55	44	2,4
Hungria	82	62	2,1
Islândia	10	NA	NA
Irlanda	89	57	2,4
Itália	70	52	2,1
Japão	16	13	1,8
Luxemburgo	110	70	2
México	140	90	NA
Holanda	23	18	1,6
Nova Zelândia	22	20	NA
Noruega	89	40	NA
Polónia	49	31	2,3
Portugal	62	45	2,2
República da Coreia	53	43	1,8
Eslováquia	87	NA	NA
Espanha	90	46	2,9
Suécia	108	56	NA
Suíça	78	51	1,8
Reino Unido	20	14	3,2
EUA	46	25	3,1
Média Mundial	39		

4.5 A importância de um estudo dosimétrico habitacional em Angola

Em Angola a utilização das radiações ionizantes está principalmente associada a técnicas de diagnóstico e terapia em Medicina Nuclear, o que tem gerado, sem dúvida, imensos e comprovados benefícios para a sociedade. Angola é membro da Agência Internacional de Energia Atômica desde 1999, estando neste momento a criar condições políticas para a produção de energia nuclear. Para isso, o governo vem frisando que a prioridade nos tempos mais próximos são os projetos de investigação e a formação de quadros.

Sendo a geologia de Angola constituída predominantemente por rochas de idade Paleoproterozóica, representadas por unidades vulcânicas e graníticas, conforme se pode ver na figura 4.7, parece-nos perfeitamente adequado fazer um estudo dosimétrico populacional em determinados pontos do país. A cidade do Lubango, em particular, constituirá o centro piloto do estudo de avaliação da exposição ao gás radão, a que as populações estão sujeitas, e servirá, também, como base ou ponto de partida de investigação.

Como não existe legislação sobre o gás radão em Angola, os resultados obtidos, poderão servir como uma prova evidente que este gás existe, independentemente do facto dos valores obtidos serem ou não elevados, sendo um primordial objetivo apresentá-los nas instâncias do governo central. Ficará, assim, em planos previsionais, a expansão de pontos nos demais municípios da província da Huila e, mais tarde, em outras províncias do país.

4.6 Normas internacionais relativas à deteção e aos níveis de referência/ recomendações para a concentração de radão no ar interior.

Nesta secção serão abordadas as normas que serviram de base para comparação dos níveis médios de concentração de radão observados na cidade do Lubango com os níveis ou limites estabelecidos pela OMS, a base de cálculo da dose anual efetiva, resultante da inalação de ^{222}Rn e seus descendentes presentes no ar de todas as fontes, as doses recebidas globalmente pela população de todas as fontes naturais de radiação e nível ação de recomendado em habitações.

Em virtude da inexistência, em Angola, de legislação sobre qualidade do ar no interior de edifícios, em particular no que diz respeito ao radão, como alternativa devem-se adotar as normas internacionais que regulamentam os níveis de concentração no interior de edifícios, de tal modo que, caso os valores medidos sejam superiores aos valores máximos recomendados, se tomem medidas de mitigação. A maior ou menor exposição dos seres humanos a fontes naturais de radiação ionizante é uma realidade à qual não se pode escapar e, para um grande número de indivíduos, esta exposição chega a ser superior à de todas as fontes artificiais combinadas. Há dois fatores que contribuem para a exposição à radiação natural: partículas de raios cósmicos de alta energia incidentes na atmosfera terrestre e de radionuclídeos que têm origem na crosta terrestre e que estão presentes em todo o ambiente,

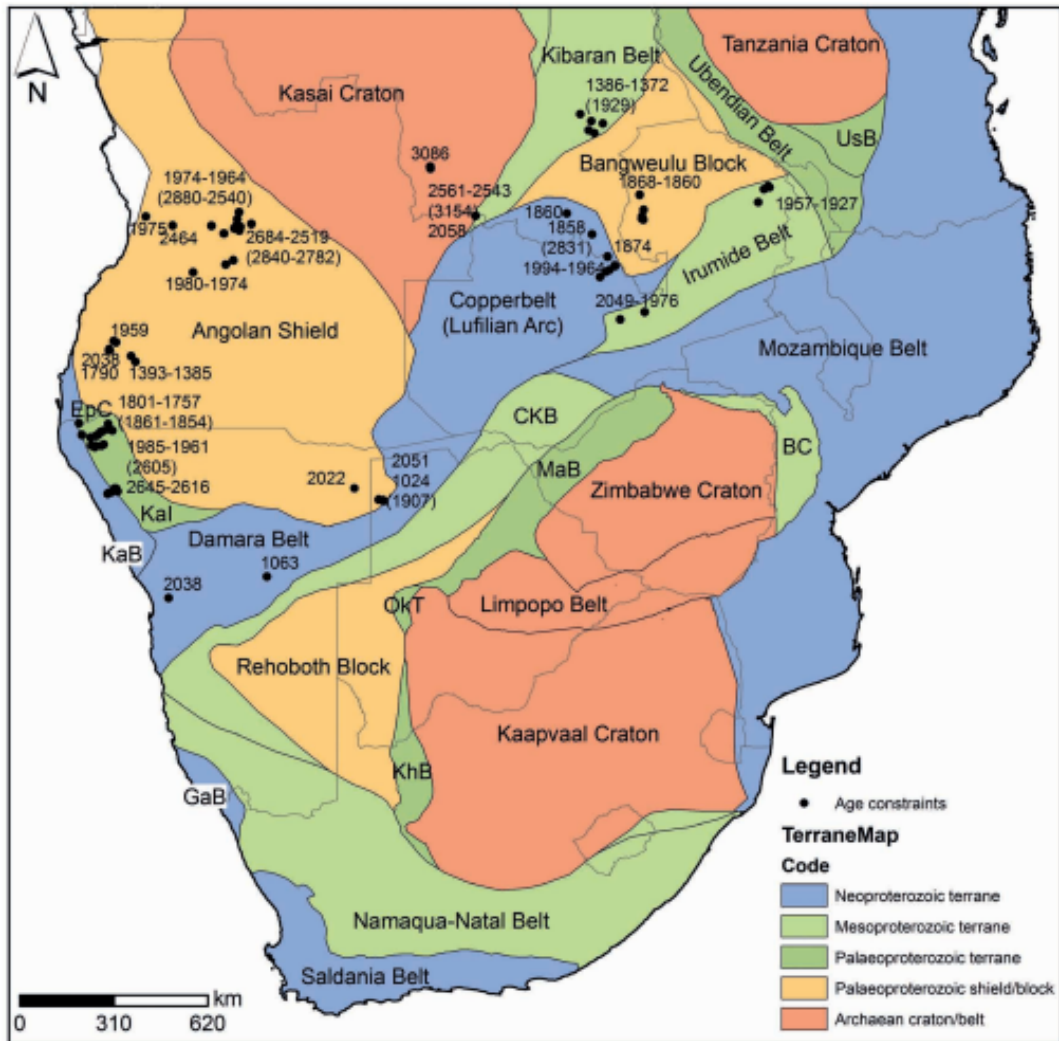


Figura 4.7: Mapa baseado no Sistema de Informação Geográfico, mostrando a estrutura tectónica pré-cambriana da África Austral, Hanson (2003) [McC13].

incluindo o próprio corpo humano. O nível de referência, que representa o valor máximo da concentração média anual de radão aceite num edifício, é uma componente importante de um programa nacional de radão e deve ser estabelecido pelos países a nível nacional. Quando as concentrações de radão são superiores a este nível é fortemente recomendado que sejam tomadas medidas que permitam reduzir estas concentrações e as exposições decorrentes. Em alguns países como a Suécia e a República Checa, este procedimento é mesmo obrigatório. Contudo, apesar das recomendações, a decisão de implementação de medidas de mitigação ou de redução da concentração de radão, quando os níveis de referência são ultrapassados, cabe a cada país [Wor10].

Um nível de referência, não especifica uma fronteira rígida entre segurança e perigosidade, mas define um nível para o controlo do risco de exposição ao radão no interior de edifícios, que cada país poderá considerar como sendo demasiado elevado se não for implementado um programa de ação. O conceito de nível de referência difere do conceito de nível de ação que era utilizado na maioria dos países antes das recomendações mais recentes da ICRP 103[Wri08]. Anteriormente, o trabalho de mitigação era recomendado apenas para concentrações de radão que excediam o nível de ação, o que dava uma impressão imprecisa de que as concentrações de radão abaixo deste nível seriam seguras. Um inquérito da OMS a 36 países revelou que quase todos estabeleceram níveis de referência, para as habitações existentes, entre 200 Bq m^{-3} e 400 Bq m^{-3} [Wor10, Boc14]. Baseando-se nos últimos dados científicos sobre os efeitos do radão na saúde, a OMS estabelece como nível de referência no interior de edifícios o valor limite de 100 Bq m^{-3} . Do ponto de vista da saúde pública das populações justifica-se, porque se espera que, desta forma, haja uma redução efetiva dos riscos de saúde associados ao radão. No entanto, se este nível não puder ser implementado no país, o nível de referência adotado não deve exceder os 300 Bq m^{-3} [Wor10, Org09].

Como um dos objetivos do presente trabalho consiste em estimar a dose anual efetiva a que as populações estão sujeitas, surge a necessidade aplicar a norma que está na base do seu cálculo para se poder comparar os resultados obtidos dos estudos realizados em Angola, com outros países. Assim, a estimativa da dose absorvida para as células críticas do trato respiratório por unidade de exposição de ^{222}Rn aplicável à população geral pode ser derivada de uma análise de informação sobre a distribuição do tamanho do aerossol, taxa de respiração, deposição fracionada nas vias respiratórias, taxa de remoção de muco e localização das células alvo nas vias respiratória. Tais estimativas dependem de um modelo e estão necessariamente sujeitas a todas as incertezas associadas aos dados de entrada. A avaliação dosimétrica da dose absorvida em células basais do epitélio brônquico por unidade de exposição dá valores na gama $5\text{-}25 \text{ nGy (Bq h m}^{-3})^{-1}$. O valor central é estimado em $9 \text{ nGy (Bq h m}^{-3})^{-1}$ para condições médias em espaços interiores de edifícios, uma taxa de respiração de $0,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, um diâmetro médio do aerossol de $100\text{-}150 \text{ nm}$ e uma fração não anexada dos descendentes de radão de $0,05$. Para um fator de ponderação do tecido de $0,08$ para as regiões brônquica e bronquiolar e usando o fator de qualidade 20 , correspondente à radiação alfa, a dose efetiva por unidade EEC é de $15 \text{ nSv (Bq h m}^{-3})^{-1}$. A gama de fatores de conversão de dose para radão, derivados de estudos epidemiológicos e dosimetria das radiações, varia de 6 a $15 \text{ nSv (Bq h m}^{-3})^{-1}$. Estudos epidemiológicos atualizados em 11 minas subterrâneas

[Uni98] sugere um aumento do risco de radão por unidade de exposição. Por conseguinte, é antecipado um aumento na convenção de conversão de dose com base epidemiológica. Os estudos epidemiológicos sobre o gás radão, ainda não têm precisão suficiente para fornecer estimativas de risco numéricas que poderiam ser utilizadas numa convenção de conversão de dose epidemiológica. Dada a atual gama de valores do fator de conversão de dose baseados em estudos epidemiológicos e modelos dosimétricos, o valor estabelecido de $6,7 \times 10^{10} \text{ mSv (Bq h m}^{-3}\text{)}^{-1}$ é considerado apropriado para o cálculo da dose média efetiva [PRO18b]. Para as concentrações representativas de radão são estabelecidos fatores de equilíbrio de 0,4 e tempos ocupacionais 7000 h para ambientes interiores de moradias unifamiliares [UNSoob] e 2000 h para edifícios públicos [PRO18b]. A dose anual efetiva resultante da inalação de ^{222}Rn e seus descendentes presentes no ar é estimada em 1,1 mSv [UNSoob]. As doses globalmente recebidas pela população, devido a todas as fontes de radiação natural, foram reavaliadas pelo comité da UNSCEAR de 1988 e estão indicadas na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Dose anual efetiva de todas fontes radioativas naturais[UNS88]

Fonte de radiação	Dose anual efetiva (mSv)		
	Exterior	Interior	Total
Raios cósmicos	0,30	-	0,30
Neutrões	0,055	-	0,055
Radionuclídeos cosmogénicos	-	0,015	0,015
Radionuclídeos primordiais:			
^{40}K	0,15	0,18	0,33
^{87}Rb	-	0,006	0,006
Série do ^{238}U :	0,1		1,34
^{238}U até ^{234}U		0,005	
^{230}Th		0,007	
^{226}Ra		0,007	1,24
^{222}Rn até ^{214}Po		1,1	
^{210}Pb até ^{210}Po		0,12	
Série do ^{232}Th :	0,16		0,34
^{232}Th		0,003	
^{228}Ra até ^{224}Ra		0,0013	0,18
^{220}Rn até ^{208}Tl		0,16	
Total	0,8	1,6	2,4

A dose média anual efetiva é estimada em 2,4 mSv refere-se à parte adulta da população. A variação em torno desta média deve-se principalmente a variações na exposição externa e na exposição interna (inalação) devido aos descendentes do radão de curta duração [UNS88].

Uma medida importante consiste em examinar a base para a adoção de um nível de ação de intervenção em habitações. A dose anual efetiva deve estar no intervalo do nível de ação recomendado, entre 3 e 10 mSv a⁻¹, acima deste intervalo, medidas de mitigação devem ser acioandas [Bre94]. Estes níveis de ação estão relacionados com a concentração média anual de radão num edifício e a ação tomada deve ter como objetivo a redução da exposição a este gás radioativo. Deve salientar-se que, não é suficiente adotar melhorias marginais destinadas apenas a reduzir as concentrações de radão a um valor imediatamente abaixo do nível de ação e ainda que, uma vez decidida a intervenção, o grau dessa intervenção deve ser otimizado [Bre94].

Capítulo 5

Métodos de detecção de radão

Os seres humanos não possuem órgãos sensoriais capazes de detetar a radiação ionizante e, por isso, devem confiar em instrumentos para a detecção e monitorização da radiação. Como exemplo deste tipo de instrumentos pode salientar-se: o contador Geiger- Müller e o detetor de cintilação para a detecção de partículas; diversos tipos de dosímetro (filme, termoluminescentes, etc) para a medição da dose absorvida; e câmaras de ionização, que permitem medir a taxa de dose. Em cada uma destas categorias, encontramos instrumentos concebidos especificamente para a medição de um determinado tipo de radiação, por exemplo, raios X, raios gama e neutrões rápidos [Kad20]. Embora existam muitos tipos de instrumentos diferentes, o requisito básico de qualquer desses instrumentos é que a radiação interage com o detetor de tal modo que a magnitude da resposta do instrumento seja proporcional ao efeito da radiação ou da propriedade da radiação a ser medida. Alguns efeitos físico-químicos de radiação que se aplicam na detecção e medição da radiação, na física da saúde estão listados na tabela 5.1 [Kad20].

Tabela 5.1: Efeitos de radiação utilizados na detecção e medição da radiação [Kad20]

Efeito	Tipo de Instrumento	Detetor
Elétrico	1. Câmara de ionização	1. Gás
	2. Contador proporcional	2. Gás
	3. Contador Geiger	3. Gás
	4. Detetor de estado sólido	4. Semicondutor
Químico	1. Filme	1. Emulsão fotográfica
	2. Dosímetro químico	2. Sólido ou líquido
Luz	1. Contador de cintilação	1. Cristal ou líquido
	2. Contador Cerenkov	2. Cristal ou líquido
	3. Dosímetro de optoluminescência	3. Cristal
	4. Dosímetro de termoluminescência (TLD)	4. Cristal
Calor	1. Calorímetro	1. Sólido ou líquido

Durante as últimas décadas têm-se verificado avanços no processamento eletrónico dos sinais de saída destes detetores e no subsequente tratamento da informação neles contidas. As informações registadas e armazenadas estão disponíveis para descarregar em computadores e outros equipamentos. Os instrumentos são concebidos para uma série de aplicações diferentes, tais como a monitorização ambiental de rotina; a monitorização da exposição da radiação em ambientes laborais; a medição de superfícies contaminadas por radioisótopos e a medição do radão, e seus descendentes, na água, no solo e no ar, sendo este último ponto um dos objetivos deste trabalho [Kad20].

Os três isótopos do radão ^{219}Rn , ^{220}Rn e ^{222}Rn existem no meio ambiente como membros da série radioativa primordial. Com raras exceções, apenas o isótopo ^{222}Rn , cuja meia-vida é de 3,82 d, tem sido medido diretamente no ar. Uma vez que o ^{235}U corresponde apenas a 0,73%, em peso de urânio natural, os seus descendentes, incluindo o ^{219}Rn que tem uma meia-vida de 4 s, não são encontrados no ambiente em concentrações significativas. Por outro lado, embora a concentração de ^{220}Rn , perto da superfície da terra, seja comparável à do ^{222}Rn , a sua meia-vida de 55 s, impede a medição direta com instrumentos portáteis [Gor19].

Conforme ficará mais claro ao longo do corpo deste trabalho, a medição da atividade do ^{222}Rn e dos seus descendentes, trata-se de um processo bastante delicado, o que faz com que a precisão com que se obtêm os resultados das medições efetuadas, tenham certas limitações. Neste estudo privilegiou-se a utilização de materiais plásticos sensíveis à radiação alfa. Por outro lado, a recolha de uma amostra válida é de igual importância, para uma análise precisa e para a realização de um programa de avaliação da exposição humana aos radionuclídeos de origem natural. Este é um problema particular no caso dos isótopos de radão cujas concentrações variam, marcadamente, com o tempo e a localização, uma vez que, tanto no ar no interior dos edifícios, como no exterior, estão sujeitas a variações diurnas e sazonais [Jr.86].

A quantidade fundamental na medição de um material radioativo é o número de átomos em decaimento por unidade de tempo. Raramente é possível fazer uma medição absoluta da atividade, mas é necessário obter um fator de calibração para o sistema de deteção baseado em um padrão da mesma substância. A calibração inadequada de um sistema de deteção é a causa mais prevalente de medições errôneas de atividade. A calibração adequada de um sistema de deteção de radão depende da determinação do fundo e da eficiência da contagem de cada detetor utilizado [NCR88].

Por outro lado, é fundamental focar-se na existência do equilíbrio radioativo entre o ^{222}Rn e os seus descendentes. Considerando que, em consequência da desintegração do ^{222}Rn , se obtêm uma cadeia de decaimento com vários nuclídeos descendentes, podem escrever-se as seguintes equações, que relacionam as atividades do radão com a dos descendentes. Designando por $(A)_1$ a atividade do radão, $(A)_2$ a atividade do seu descendente e assim sucessivamente, tem-se a seguinte relação:

$$(A)_1 = (A)_0 e^{-\lambda t} \quad (5.1)$$

Como $(A)_1$ é a atividade, pode escrever-se;

$$(A)_1 = -\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 (A)_1 \quad (5.2)$$

Os dois nuclídeos seguintes da série de decaimento evoluem de acordo com as equações:

$$(A)_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (A_1)_0 \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right) + (A_2)_0 e^{-\lambda_2 t} \quad (5.3)$$

$$(A)_3 = \frac{(A_1)_0 \lambda_2 \lambda_3}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right) + \frac{(A_2)_0 \lambda_3}{(\lambda_3 - \lambda_2)} \left(e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_3 t} \right) + (A_3)_0 e^{-\lambda_3 t} \quad (5.4)$$

Onde λ_1 , λ_2 e λ_3 , são, respetivamente, as constantes de decaimento de cada um dos núclídeos. Apesar destas equações se tornarem cada vez mais complexas, para aplicações ambientais raramente são necessárias. Além disso, para a maioria dos casos, podem inclusivamente ser simplificadas [Bas16].

Tendo em consideração as condições específicas de um determinado local, as concentrações dos descendentes do radão podem, provavelmente, existir em diferentes proporções de combinação entre eles e com o radão. Numa experiência, um recipiente com um dado volume, e contendo no seu interior uma elevada concentração de radão, pode ser caracterizada a partir da concentração da energia potencial das partículas alfa (PAEC), C_p , segundo as comissões reguladoras de ambientes radioativos consideram como indicador de risco [ICR94]. Seja um descendente i da cadeia de decaimento de radão, define-se a energia potencial das partículas alfa emitidas durante o decaimento do átomo para o ^{210}Pb estável. A energia Potencial das partículas alfa por unidade de actividade de um conjunto de N átomos é dado por: ε_i/λ_i , onde λ_i é a constante de decaimento do descendente i . Na tabela 5.2 constam os valores de ε_i e ε_i/λ_i para os descendentes do ^{222}Rn .

Tabela 5.2: Energia Potencial das partículas alfa para os descendentes do radão [ICR94]

Energia Potencial das partículas Alfa					
Radionuclídeo	Tempo de meia-vida	MeV/átomo	10^{-12} J/átomo	MeV/Bq	10^{-12} J/Bq
^{218}Po	3,05 min	13,69	2,19	3615	5,79
^{214}Pb	26,8 min	7,69	1,23	17840	28,6
^{214}Bi	19,9 min	7,69	1,23	13250	21,2
^{214}Po	164 μ s	7,69	1,23	2×10^{-3}	3×10^{-6}
Total				34710	55,6

Para uma mistura de descendentes de radão, a PAEC é definida como:

$$C_P = \sum C_i \frac{\varepsilon_i}{\lambda_i} \quad (5.5)$$

Onde C_i é a concentração do descendente i , caso se considere uma mistura particular de descendentes de radão num determinado volume de ar, V . Do produto $C_p V$ obtém-se a energia total que pode ser depositada pelas partículas alfa, se todos os átomos nesse volume decaírem em ^{210}Pb [LBO4, Lou13]. Quando existe equilíbrio secular a concentração de ^{222}Rn e da sua descendência é igual $C_i = C_{Rn}$. Logo $C_P = \sum C_i \frac{\varepsilon_i}{\lambda_i} = C_P = C_{Rn} \sum \frac{\varepsilon_i}{\lambda_i}$.

Os descendentes do ^{222}Rn podem alcançar o equilíbrio secular em menos de três horas (como se pode ver na cadeia do decaimento do ^{238}U) e a atividade coletiva do ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Pb e ^{214}Bi , conhecida por Concentração do Equilíbrio Equivalente dos

Produtos de Decaimento (Equilibrium-Equivalent Decay- Product), $EEDC_{Rn-222}$, é dada por:

$$EEDC_{Rn-222} = 0,106A_{Po-218} + 0,513A_{Pb-214} + 0,381A_{Bi-214} \quad (5.6)$$

Onde A_{Po-218} , A_{Pb-214} , A_{Bi-214} são as atividades ($Bq\ m^{-3}$ ou $pCi\ L^{-1}$) de ^{218}Po , ^{214}Pb e ^{214}Bi , respetivamente. É importante salientar que na equação 5.6 não está incluído o ^{214}Po devido aos poucos átomos de ^{214}Po em comparação com ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e devido ao tempo de meia vida de $164\ \mu s$ (em equilíbrio secular entre ^{222}Rn e ^{214}Po , $A_{Rn-222} = A_{Po-214}$ [Bas16]. O quociente entre $EEDC_{Rn-222}$ e a concentração atual é denominado fator de equilíbrio, F :

$$F = \frac{EEDC_{Rn-222}}{C_{Rn}} \quad (5.7)$$

O fator de equilíbrio, que permite calcular a dose anual efetiva, é igual à unidade se o radão e os seus descendentes de semivida curta estiverem em equilíbrio secular. Este fator foi determinado por Amgarou et al [Amg03] recorrendo ao conceito de fator de equilíbrio reduzido, F_{Red} , definido apenas quando se leva em linha de conta o ^{218}Po e $^{214}Po/^{214}Bi$, descendentes do radão [Lou13].

5.1 Detetores ativos

A deteção ativa consiste essencialmente em medições instantâneas da concentração de radão, ou dos seus descendentes, no ar em intervalos de tempo curtos (da ordem dos minutos). A amostra recolhida é depois tratada num sistema de deteção de radioatividade onde se pode medir separadamente o radão dos seus descendentes, mediante o uso de filtros, campos eletrostáticos negativos ou simplesmente deixando a amostra de ar em repouso durante 3 horas para que a maioria dos seus descendentes, que entram no volume de deteção, decaia radioativamente e se possa medir apenas o radão. Os dispositivos mais comuns que usam esta técnica são as células de Lucas, as câmaras de ionização, os espectrómetros alfa, o método de dois filtros e o método de contagem integrada [Soa11]. Um dos fatores que condiciona a utilização de detetores ativos é a necessidade de corrente elétrica para o seu funcionamento.

5.1.1 Câmaras de ionização

O interesse nas medições de ^{222}Rn com câmaras de ionização é principalmente histórico, uma vez que instrumentos menos dispendiosos são agora amplamente utilizados. A exceção está na sua utilização atual como sistemas de medição de alta precisão nas inter comparações de laboratório.

As câmaras de ionização são, geralmente, cilindros de latão ou aço com um ânodo coletor central [URR36, HAR51]. Foram construídas câmaras “seladas” e de fluxo com volumes sensíveis de uma a várias centenas de litros para medições de ^{222}Rn [Wat69, IKU73, Hig73]. As câmaras de ionização, normalmente, funcionam em condições normais de pressão

atmosférica ou com valores ligeiramente superiores. Tanto com câmaras seladas como com câmaras de fluxo, o ar que se pretende medir é filtrado, antes da entrada no volume sensível, de forma a remover aerossóis atmosféricos, incluindo os produtos derivados do radão. Em câmaras seladas, os descendentes de curta duração, formados na câmara, conseguem alcançar o equilíbrio radioativo com o gás, enquanto que, numa câmara de fluxo, é alcançada apenas uma fração da concentração do descendente em equilíbrio. Nas câmaras de ionização dinâmicas ou de fluxo, a corrente produzida dentro do volume sensível é medida com um eletrómetro e um registador de gráficos. Os eletrómetros disponíveis comercialmente são precisos para mais ou menos um por cento a cerca de 10^{-13} A. Dependendo do fundo e do volume da câmara, o limite de deteção é de 4 Bq m^{-3} ($0,1 \text{ pCi l}^{-1}$) [NCR88].

5.1.2 Detetores de cintilação

Foram observadas partículas alfa únicas emitidas por radionuclídeos que ocorrem naturalmente como *flashes* de luz de uma tela ZnS do Espintariscópio do Sir Walter Crookes. Curran e Baker [Cur48] usaram um fototubo para substituir o olho humano para observar radiação alfa com ZnS. O tubo fotomultiplicador e o ZnS ativado com prata numa caixa à prova de luz são os componentes essenciais de muitos sistemas de deteção alfa. O ZnS(Ag) é um pó inorgânico branco opaco, com estrutura cristalina de pequena dimensão e com uma densidade de $4,1 \text{ g cm}^{-3}$. Emite luz na faixa de 450 nm e tem um rendimento de fótons de 2, em relação ao antraceno. O tempo de decaimento da luz de ZnS (Ag) é 40 vezes maior do que o do antraceno. Tubos fotomultiplicadores da classe espectral S-12 com um pico de resposta a 410 nm são geralmente utilizados em sistemas que empregam um cintilador ZnS(Ag). O ZnS(Ag) é essencialmente insensível a qualquer forma de radiação de fundo natural que não sejam partículas alfa. Embora os pulsos detetados nos tubos fotomultiplicadores das interações ZnS(Ag)-alfa não sejam adequados para análise espectral, as baixas taxas de contagem de fundo e as altas eficiências de deteção alcançadas por tais sistemas fazem deles os instrumentos prioritários para muitas aplicações. Recipientes fechados com superfícies internas revestidas com ZnS(Ag), comumente conhecidos como células de cintilação, são os sistemas de coleta e deteção mais utilizados para a determinação do ^{222}Rn no ar. Embora a sua aplicação mais comum seja como um detetor de amostras instantâneas, foram desenvolvidas equações necessárias para que as células de cintilação possam ser utilizadas como detetores contínuos e de fluxo em situações adequadas [Bus79]. Um sistema para a determinação de ^{222}Rn em amostras geoquímicas foi descrito por Damon e Hyde [Dam52]. As paredes interiores de tubos de vidro de pirex de 40 cm^3 , foram revestidos com 20 mg cm^{-2} de ZnS(Ag), enquanto as superfícies exteriores, excepto a base curva e o preenchimento do tubo do braço lateral foram prateadas para refletir as cintilações. O tubo do braço lateral foi usado para a evacuação e enchimento do volume sensível. Este tubo foi pintado com tinta preta para proteção contra a luz e presumivelmente fechado com tubos e uma pinça. O sistema foi acoplado a um tubo fotomultiplicador curvo num escudo à prova de luz. A taxa de contagem de fundo do sistema foi de 300 contagens por hora (cph) atribuídas principalmente ao fósforo. Embora a eficiência de deteção do sistema não tenha sido dada, os autores declararam que a sensibilidade do sistema se aproximava da câmara de ionização e tinha

a vantagem de ser insensível à composição do gás que enche a câmara ou à presença de iões ou vapores condensáveis. Van Dilla e Taysum [Van55, Col63] simplificaram o desenho anterior da célula de cintilação para a determinação do ^{222}Rn exalado de animais injetados com rádio. Todas as superfícies interiores de uma célula cilíndrica de vidro de 120 cm^3 foram revestidas com uma fina camada de pó de sulfato de zinco, ZnS(Ag) e foi fixada uma única válvula de fole para evacuação e enchimento da célula. Lucas [Luc57] desenvolveu células de cintilação de baixo fundo, exibindo espectros reprodutíveis e eficiência de deteção. Nas células de Lucas, o ar coletado é colocado em contacto com um recipiente com um volume de 96 cm^3 , cujas paredes internas são recobertas por este material cintilador de ZnS(Ag) . As cintilações que são produzidas pela incidência de partículas alfas sobre as paredes internas da célula são detetadas por um fotomultiplicador instalado numa das extremidades do recipiente. A base da célula de Lucas é selada com uma janela de quartzo transparente. Quando as partículas alfa atingem o material cintilador, provocam a emissão de fótons na faixa ultravioleta que, após atravessarem a janela de quartzo, são convertidos em pulsos elétricos por uma válvula do fotomultiplicador. Um circuito contador ajustável por intermédio de um temporizador, permite determinar o número de pulsos ocorridos num intervalo tempo pré-definido [Len96]. A superfície interna da janela de quartzo é revestida com uma camada, condutora e transparente de óxido de estanho para eliminar a carga negativa induzida do fotocátodo quando a célula é acoplada a um tubo fotomultiplicador planar. Sem o revestimento condutor, os descendentes do ^{222}Rn tendem a depositar-se na janela carregada resultando em variações na eficiência de deteção até 15%. A célula de cintilação e o tubo fotomultiplicador estão cobertos com uma tampa à prova de luz. A taxa de contagem de fundo do sistema faz uma média de cinco contagens por hora (cph). A eficiência de deteção da célula preenchida com hélio é de 8600 cph Bq^{-1} (320 cph pCi^{-1}) de ^{222}Rn e seus descendentes. O valor de LLD, num período de medição de 60 minutos, é de 1 mBq ($0,03\text{ pCi}$), obtido com um nível de confiança de 95%. Uma vez que a eficiência de deteção da célula era reduzida em apenas 10% quando preenchida com ar, Lucas sugeriu que os níveis ambientais de radão poderiam ser medidos diretamente, ou seja, sem pré-concentração da amostra. A simplicidade e o baixo custo do sistema, com a célula de cintilação servindo tanto como coletor como detetor, encorajou a adaptação da célula para estudos de campo. As células de Lucas são amplamente utilizadas devido à sua fiabilidade e disponibilidade geral.

5.1.3 Métodos de dois filtros

Um outro método de deteção ativa, utilizado com frequência para medir o ^{222}Rn , é o chamado método dos dois filtros. Neste método, uma certa quantidade de ar é bombeada através de um filtro (que retém os átomos dos descendentes do ^{222}Rn) até um recipiente que contém um outro filtro. Após um certo período de recolha de ar, o segundo filtro é retirado do recipiente e colocado em contacto com um sistema de deteção. São assim detetadas as emissões ocorridas, devidas aos átomos dos descendentes do ^{222}Rn , que se formaram durante o trânsito entre os dois filtros e que foram coletados no segundo filtro. Desta forma, a atividade detetada é proporcional à quantidade de gás radão que foi bombeada [Boc89, Rob91]. Com o objetivo de minimizar as perdas de radão e dos seus descendentes nas paredes da câmara, a

taxa de fluxo de ar deve ser definida para permitir uma adequada formação dos produtos de decaimento do radão dentro de uma câmara com tamanho ideal. A análise da atividade pode ser realizada após a amostragem (amostra individual) ou durante o processo de filtração, por medição de cintilação ou espectrometria alfa com detetores semicondutores (medição contínua) [Org09].

Uma vantagem do detetor de dois filtros é que o mesmo fornece uma medição direta da concentração de radão, em vez de inferir a partir da concentração dos descendentes do radão no ambiente. Embora as medições diretas sejam comuns para medir concentrações mais elevadas de radão, por exemplo, ao medir as emissões de radão no solo [Gro11, W. 96], as medições dos descendentes de radão são frequentemente utilizadas para medições de baixa concentração, pois é possível aumentar a sensibilidade da medição, acumulando os descendentes por filtração ou precipitação eletrostática. Quando os descendentes do radão são capturados diretamente do ar ambiente utilizando, por exemplo, o método de um filtro, a concentração dos derivados do radão é mais sensível aos parâmetros ambientais do que os detetores de dois filtros [Xia10]. Isto porque o detetor de dois filtros não é afetado pelo grau de desequilíbrio ambiental entre o radão e os seus descendentes. Ainda que o detetor de dois filtros meça a atividade alfa dos descendentes do radão internamente, estes descendentes são gerados em condições controladas dentro da câmara de retardamento, de modo que as contagens do estado estacionário são proporcionais à concentração de radão no ambiente. O custo de ser sensível apenas a concentração de radão reside no facto de que o detetor é suficientemente grande para acomodar a câmara de retardamento e regista menos contagens do que os detetores dos descendentes, devido aos limites práticos do tamanho da câmara de retardamento. Uma das principais limitações do detetor de dois filtros é o seu lento tempo de resposta, com um meio tempo de subida de 45 minutos. A resposta lenta do detetor é um problema comum a muitas técnicas de alta sensibilidade [Gri16].

5.2 Detetores passivos

O processo de deteção passiva, consiste na colocação de detetores num dado local com potencial de exposição ao radão. Este detetor normalmente utiliza uma película sensível à passagem de partículas alfa através do registo de traços, que são posteriormente contados para se estimar a concentração. O tempo de exposição destes detetores é bastante variável e depende do tipo de detetor a ser utilizado num dado espaço e pode variar de poucos dias a vários meses. Os detetores de traços mais utilizados são os SSNTD's [Mas12]. Após um tratamento químico ou eletroquímico adequado, esses traços são suficientemente alargados e alongados, podendo ser visíveis com um microscópio ótico. O número de traços contados por unidade de área do detetor, tem como resultado um valor que se relaciona diretamente com o tempo de exposição e, portanto, com a concentração média de emissores no período de exposição [Lou13].

5.2.1 Detetores de carvão ativado

Normalmente este detetor é constituído por um cilindro metálico de reduzidas dimensões, contendo carvão no seu interior. A taxa de absorção do radão, por parte do carvão é proporcional à sua concentração no ar. A utilização de detetores de carvão ativado é um método passivo, barato e de sensibilidade suficiente para deteção de radão, num período de alguns dias. A principal desvantagem deste método é o tempo máximo de amostragem, limitado a pouco mais do que uma semana que é reduzido já que o tempo de semivida do radão é de 3,8 dias. Com estes detetores de carvão, também não é possível efetuar medições em longos períodos, o que faz com que os detetores de traços sejam, por isso, os mais adequados [Lou13].

5.2.2 Detetores de traços (CR-39)

A monitorização dos traços nucleares resultantes do radão e dos seus descendentes, atualmente é feita com detetores de plástico, permitindo avaliar o potencial de exposição destes radionuclídeos em ambientes *indoor* e *outdoor*. O desenvolvimento metodológico desse tipo de detetores surgiu em consonância com o estudo das propriedades de materiais sólidos, principalmente os detetores de radiação ionizante (fragmentos de fissão, núcleos instáveis no geral, partículas alfa e prótons).

O estudo dos SSNTDs iniciou-se no final da década de 50. D.A. Young [You58], observou que cristais de fluoreto de lítio (LiF) registavam os danos provocados por fragmentos de fissão de ^{235}U induzida por neutrões. Em 1959, E.C.H.Silk e R.S. Barnes [ECH59] obtiveram as primeiras fotos (via microscopia eletrónica) de danos devido a fragmentos de fissão em micas. A partir de então, o desenvolvimento dessa área de pesquisa deu-se de uma forma bastante rápida, impulsionado, principalmente, pelo trabalho pioneiro de R.L.Fleischer, P.B.Price e R.M.Walker, desenvolvido no início dos anos 60 [Rob91, Fle98].

Nos primeiros anos de investigação da Física Nuclear verificou-se que, por intermédio da microscopia eletrónica, era possível observarem-se fissões de urânio nos variados minerais, através dos traços nucleares nos respetivos materiais. Mas durante as pesquisas, chegou-se à conclusão de que a microscopia eletrónica não apresentava eficiência na aquisição de informações e /ou dados quantitativos, quando era utilizada como detetores de traços nucleares resultantes da fissão. Uma das prováveis motivações reside no facto de os eletrões utilizados nesse tipo de análise fazerem com que a região do mineral, danificada pelos fragmentos de fissão (que é chamada traço latente), fosse rapidamente reconstituída, ou seja, a microscopia eletrónica tem a propriedade de apagar os traços de fragmentos de fissão dos minerais. Esse fenómeno, no entanto, não representou um obstáculo de difícil transposição, pois logo se descobriu que, por meio de um tratamento químico adequado, os traços latentes nos minerais podem ser alargados ou expandidos de tal forma a ser possível a sua observação por meio da microscopia ótica, desde que esses minerais fossem translúcidos. Atacando-se quimicamente os minerais, os traços latentes, cujo diâmetro é da ordem do angström, são alargados e os diâmetros ampliados até a uma dimensão da ordem do micrón. Os traços “revelados” (os traços atacados quimicamente) possuem estabilidade e nitidez suficientes,

de modo que a sua observação é considerada a condição base para a utilização de SSNTDs como detetores de radiação fortemente ionizante [Rob91].

Na década dos anos 60, do século XX, constatou-se que outros materiais, além dos minerais, podiam ser utilizados como detetores (como vidros, por exemplo). Além disso, verificou-se que enquanto que os vidros e os minerais detetam apenas fragmentos de fissão de elementos pesados, outros materiais, como certos plásticos (nitratos de celulose e policarbonatos), têm a capacidade de registrar radiações como os prótons e as partículas alfa [Fle98]. Quando radiação ionizante, por exemplo a radiação alfa, incide num SSNTD provoca uma desordem na estrutura molecular do mesmo (traço latente), o qual se pode estender (dependendo da energia da partícula incidente) por vários microns. Esse traço, que tem um diâmetro da ordem do angström [Rob91], deve ser atacado quimicamente para poder ser observável ao microscópio ótico.

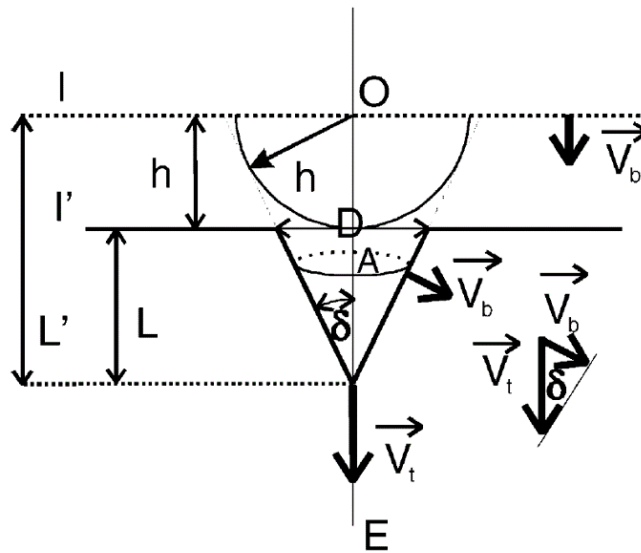


Figura 5.1: Traço após o ataque químico [Niko4].

O traço formado após o ataque químico, visto de perfil, assemelha-se a um cone. Como a observação ao microscópio ótico é feita sobre a superfície do plástico, a aparência do traço, visto ao microscópio, assemelha-se a uma elipse ou círculo (dependendo do ângulo de incidência) [Rob91, Som73].

Um outro processo utilizado para a revelação dos traços, proposto por Tommasino [Tom73, Ili90], em 1970, é o chamado ataque eletroquímico. Nesse processo, junto com o ataque químico habitual, aplica-se alta tensão no material a ser analisado. Os traços formados, resultam em ramificações, tais como os galhos de uma árvore [Ili90]. Esse tipo de revelação, apesar de prejudicar de certa forma a regularidade do formato dos traços, facilita a análise dos detetores por meio de processos automáticos [Rob91].

Na década de 60 e 70, foram desenvolvidos diversos tipos de materiais plásticos para a detecção de partículas alfa, como os policarbonatos Lexan, fabricados pela General Electric (EUA) e MAKROFOL, fabricados pela Bayer AG(Alemanha) e os nitratos de celulose: DAICEL, fabricados no Japão, Kodak-Pathè, fabricados em França, e CA 80-15 e LR-115,

fabricados também pela Kodak-Pathè [Rob91, Eng80]. Cada um destes plásticos possui características diferentes, tais como a sensibilidade (eficiência) para o registo de partículas alfa e o formato dos traços. Deste modo, cada um deles deve ter um ataque químico diferenciado e específico. Em geral são utilizadas soluções de NaOH, com normalidade, temperatura e tempo revelação específico para cada um dos detetores. Atualmente, os detetores de plástico mais utilizados para a monitorização do radão e dos seus descendentes são os LR-115 e o polycarbonato CR-39, este último em particular foi o utilizado no presente projeto de investigação.

Os LR-115, também conhecidos como nitrato de celulose, ($C_5H_8O_9N_2$), [Ili90], têm cor avermelhada (mas são translúcidos) e estão disponíveis comercialmente em lâminas de 13 μm de espessura, montadas sobre uma base de plástico transparente comum (o mesmo que é utilizado em filmes fotográficos). A condição de ataque químico ideal para os LR-115 [Dur84] é obtida utilizando soluções de NaOH com concentrações que variam em termos de Normalidade (1 N - 6 N) e cujas temperaturas variam de 40 a 70 $^{\circ}\text{C}$. Em geral, de acordo com a bibliografia, os valores mais frequentemente utilizados são: 2,5 N de NaOH a 60 $^{\circ}\text{C}$ [Kal05].

No caso de se desejar contar os traços nucleares de modo automático, é imprescindível utilizar um tempo de ataque de tal maneira que a camada sensível do detetor seja quase totalmente corroída, de forma a que os traços se transformem em buracos, nessa camada sensível. Assim é possível garantir o contraste entre a camada vermelha do LR-115 e os traços deixados pelas partículas ao interagirem com o detetor. Se, pelo contrário, a observação for feita mecânicamente, é preferível um ataque de duração mais curta, pois ataques prolongados têm a propriedade de deformar os traços e, portanto, de dificultar a distinção entre os traços e outras figuras de ataque que aparecem após o desgaste químico, devido a falhas ou imperfeições na própria estrutura do plástico [Rob91].

O polímero comercialmente conhecido como Columbia Resin (CR-39, *allyl diglycol-carbonate*- $C_{12}H_{18}O_7$) é o detetor plástico de maior eficiência, pelo menos de entre aqueles que estão disponíveis comercialmente. A sua fórmula estrutural é a seguinte [Cas78] :

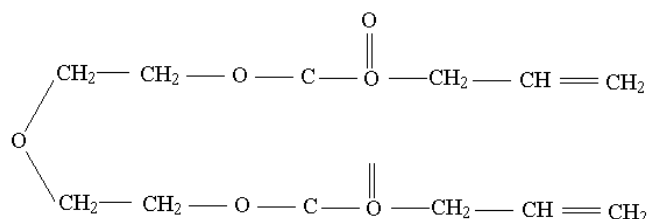


Figura 5.2: Fórmula estrutural do CR-39) [Cas78].

O seu desenvolvimento, como detetor de traços, deu-se a partir da segunda metade dos anos 70 e os primeiros trabalhos, sobre este tipo de detetor, foram publicados quase no final desta década. Uma das grandes vantagens dos CR-39, além da sua eficiência, é, segundo os especialistas, o facto de ser totalmente amorfo [Cas78, Car78], o que permite que os traços sejam bastante regulares. Além disso, o CR-39 é muito transparente, sendo que existe um contraste ideal entre os traços e o próprio material plástico, facilitando bastante a observação ao microscópio ótico. Outra grande vantagem é que o CR-39 é um dos plásticos

mais resistentes em relação a possíveis danos ocasionados por condições ambientais, como por exemplo, a temperatura, a humidade, a ação corrosiva de poluentes, etc. [Rob91, Car78]. Um aspeto importante em relação a este tipo de detetor, é o fundo, uma vez que, a partir do momento em que os detetores de plásticos são fabricados, eles já podem detetar tanto componentes pesados da radiação cósmica como também a radiação alfa devido ao ^{222}Rn e aos seus descendentes, presentes nos ambientes onde os detetores são guardados. Isto significa que, quando o detetor for utilizado ele já deverá ter uma certa quantidade de traços latentes. A essa quantidade de traços presentes no detetor, antes da sua utilização, designa-se por *background* ou fundo. Não há a possibilidade de se evitar totalmente o processo de formação de traços latentes durante o período em que os detetores são guardados, mas existem certos procedimentos que podem amenizar o problema, tais como o de embalar as placas de detetores com várias camadas de papel e/ou plástico comum, para diminuir o contacto do ^{222}Rn com os detetores e os stocks das placas na vertical, para atenuar a incidência de partículas da radiação cósmica [Rob91].

Como já foi anteriormente referido, neste trabalho foram utilizados detetores passivos CR-39 (figura 5.3) que têm uma espessura aproximada de 1,5 mm e uma área efetiva de $10 \times 10 \text{ mm}^2$. A escolha destes detetores deveu-se ao facto de não necessitarem de energia no local de avaliação e serem os indicados para se fazerem medições em longos períodos de tempo (>30 dias), serem altamente fiáveis, ideais para grandes campanhas de medição e os preços serem competitivos.

Estes detetores são colocados dentro de uma saqueta de alumínio, protegendo-os e evitando que o radão entre dentro da câmara de difusão, por forma a minimizar os níveis de fundo. Quando se abre a saqueta que contém o detetor inicia-se o processo de medição. As saquetas não estão, normalmente, num estado de vácuo, porque isso iria provocar um tipo de menor pressão e puxando algum ar, no caso de uma selagem mal feita. Contudo encontram-se numa atmosfera de ar relativamente puro, para evitar fundos exagerados.

O detetor CR-39 colocado no interior da câmara de difusão, marcada com o código 223935 como se pode ver na figura 5.3, é totalmente inócuo. É feito de plástico, não tem qualquer efeito sobre a saúde, não liberta qualquer tipo de radiação, não liberta cheiro e a única coisa que pode, eventualmente, provocar é o risco de asfixia, se uma criança, um bebé ou um animal pequeno, o engolir. Pode ainda observar-se que a tampa possui uma pequena ranhura, em torno do invólucro, que permite a passagem do radão.

5.3 Detetores de semicondutor

Um detetor semicondutor é um detetor de radiação ionizante onde o meio a ser ionizado é um semicondutor. Trata-se de um dispositivo que quando colocado num campo de radiação é capaz de indicá-la por intermédio das cargas elétricas geradas por essa radiação no material semicondutor. Os dispositivos que utilizam semicondutores como meio de deteção de radiação tornaram-se disponíveis no começo dos anos 60. As primeiras versões eram chamadas de cristais contadores, mas hoje em dia são conhecidos como detetores de estado sólido. Os semicondutores mais utilizados são o germânio e o silício [Kno10]. No presente



Figura 5.3: Detetor CR-39 e a câmara de difusão.

trabalho destacam-se em particular os detetores de silício por serem os mais utilizados na deteção do radão.

5.3.1 Princípio de funcionamento

Para percebermos o princípio de funcionamento dos detetores temos de analisar os conceitos de semicondutores intrínsecos e extrínsecos e a junção PN.

- **Semicondutores intrínsecos**

Com o desenvolvimento das técnicas de refinamento, o silício passou a ser preferido em relação ao germânio, pois permite a construção de dispositivos eletrónicos com menores correntes de saturação. O silício é utilizado no fabrico de díodos, transístores, chips, termístores, entre outros dispositivos. Este semiconductor é o segundo elemento mais abundante na Terra, podendo ser encontrado, por exemplo, na argila, no quartzo, no granito, na areia, entre outros materiais. Um átomo de silício possui quatro eletrões na sua banda de valência, logo é um átomo tetravalente. O silício agrupa-se em pequenos cristais (cristal singular), composto por cinco átomos de silício (figura 5.4) [Ama17].

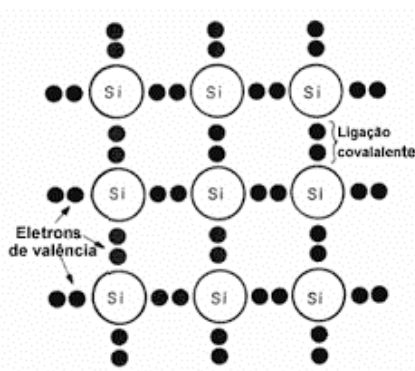


Figura 5.4: Eletrões da banda de valência de cada átomo representados num cristal de Silício.

Através da análise da figura seguinte, é possível concluir que cada átomo do cristal

singular partilha elétrons com o átomo central. Estes elétrons permitem criar uma ligação covalente, pelo que se pode concluir que o átomo central possui oito elétrons na órbita de valência. Os cristais de silício são compostos por vários cristais singulares agrupados numa rede tridimensional. Logo, cada átomo que pertence a esta estrutura compartilha oito elétrons com os quatro átomos adjacentes, permitindo que todos eles possuam oito elétrons de valência, o que torna a estrutura estável. Os elétrons de valência partilhados por dois átomos diferentes (ligação covalente) encontram-se mais fortemente ligados aos seus átomos, pois são atraídos por dois núcleos de dois átomos diferentes. Esta estrutura permite que o silício se comporte de forma muito aproximada a um isolante para temperaturas muito baixas (0 K ou 0 absoluto, que corresponde a $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) [Mil87].

A estabilidade do cristal de silício pode ser quebrada por fatores externos como a temperatura, a luz ou a ação de um campo elétrico resultante da aplicação de uma diferença de potencial, conduzindo à libertação de um elétron e, conseqüentemente, à criação de uma lacuna (espaço vago criado pela falta do elétron). À medida que a temperatura aumenta, as ligações covalentes tornam-se mais fracas, pois os elétrons de valência adquirem mais energia, podendo eventualmente quebrar a ligação covalente e originar a criação de um par elétron-lacuna. Fisicamente, não existem lacunas, pois estas representam simplesmente a falta de um elétron. A existência de uma lacuna proporciona ao elétron, que se encontra na órbita de valência do átomo vizinho, uma oportunidade para a anular. Ao preencher a lacuna, cria-se uma outra lacuna no átomo vizinho. Este processo repete-se várias vezes, sem se dar conta, pelo que se pode inferir que o movimento das lacunas é comparável ao movimento dos elétrons, possuindo, no entanto, um sentido contrário. Os elétrons livres criados pelo aumento da temperatura possuem um movimento desordenado, sendo a corrente média criada por este processo nula. No entanto, se for aplicada uma diferença de potencial aos terminais do cristal, verifica-se um movimento ordenado dos elétrons no sentido do maior potencial. Pode-se, então, concluir que o aumento da temperatura reduz a resistividade do silício, tornando-o um melhor condutor. Por esse motivo, considera-se que os semicondutores possuem um coeficiente de temperatura negativo [Ama17].

A estrutura do silício referida nos parágrafos anteriores pressupõe uma amostra pura (todos os átomos do cristal são de silício). Estes semicondutores designam-se por semicondutores intrínsecos. Atualmente, as técnicas de refinamento permitem obter cristais de silício com um nível de impurezas muito reduzido (um átomo de uma impureza por 10^{10} átomos de silício) [Boy08].

- **Semicondutores extrínsecos**

Nos semicondutores intrínsecos, a quantidade de pares elétron-lacuna criados é bastante reduzida. Deste modo, para aumentar a condução, é necessário dopar o cristal. Pode-se dopar o cristal com átomos trivalentes (possuem três elétrons na banda de valência), ou átomos pentavalentes (possuem cinco elétrons na banda de valência). Os átomos trivalentes, ao recombinarem-se com os átomos de silício (que

são tetravalentes), criam uma lacuna (figura 5.5).

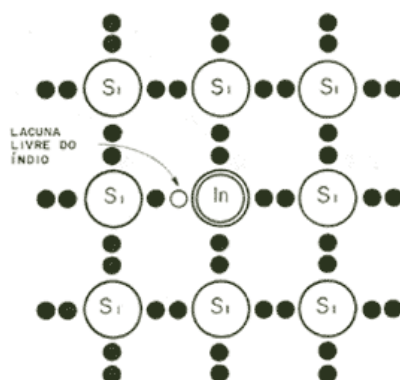


Figura 5.5: Cristal de silício dopado com material trivalente (semicondutor tipo P).

Se o cristal de silício for dopado com material pentavalente cria-se um elétron livre (figura 5.6).

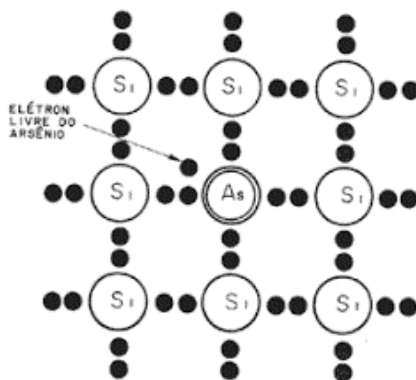


Figura 5.6: Cristal de silício dopado com material pentavalente (semicondutor do tipo N).

O processo de dopagem é realizado através da submissão do cristal de silício a altíssimas temperaturas, o que permite quebrar as ligações covalentes. Simultaneamente, bombardeia-se o cristal com impurezas. Ao arrefecer, são formadas novas ligações covalentes, criando-se deste modo semicondutores extrínsecos. Assim, caso se utilizem impurezas pentavalentes (fósforo e arsénio) cria-se um semicondutor do tipo N; se, pelo contrário, forem utilizadas impurezas trivalentes (índio, boro e gálio) cria-se um semicondutor do tipo P [Ama17].

Relativamente aos semicondutores extrínsecos do tipo N, os portadores maioritários são os elétrões, enquanto as lacunas representam os portadores minoritários. Assim, se um semicondutor do tipo N for sujeito a uma diferença de potencial, surgirá uma corrente de elétrões num sentido e uma corrente de lacunas no sentido contrário. Esta corrente de lacunas revela-se desprezável, visto que se trata de portadores minoritários. Já no caso do semicondutor do tipo P, os portadores maioritários são as lacunas enquanto os portadores minoritários são os elétrões [Ama17].

• Junção P-N

Quando dois semicondutores, um do tipo N e outro do tipo P, se juntam, origina-se uma junção PN. Esta união conduz a um processo de difusão de cargas, ou seja, os elétrons deslocam-se para a região onde a sua concentração é mais baixa (semicondutor do tipo P). Deste modo, criam-se lacunas do lado do semicondutor do tipo N. Assim, os elétrons livres que se encontram no semicondutor do tipo N, repelem-se entre si provocando o seu movimento. Alguns destes elétrons atravessam a junção e anulam as lacunas existentes no semicondutor do tipo P. Este fenómeno cria um par de iões: um ião negativo do lado P, pois o átomo (trivalente) ganhou um elétron em relação à sua estrutura inicial e um ião positivo do lado N. Do lado semicondutor do tipo N, formam-se iões positivos e do lado semicondutor do tipo P formam-se os iões negativos, dando origem a uma zona designada por região de depleção (figura 5.7).

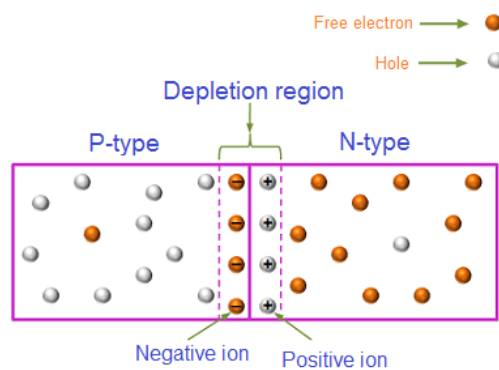


Figura 5.7: Junção P-N [PRE15].

À medida que se forma a região de depleção, o seu potencial elétrico vai aumentando, até que atinge um valor que impede que a difusão continue. Quando se atinge o equilíbrio, a região de depleção não possui mais portadores. Desta forma, os elétrons do lado N têm que vencer o campo elétrico criado pela região de depleção (resultante dos dipolos criados pelo par de íons positivos e negativos), que exerce uma força de repulsão impedindo os elétrons livres de atravessar a junção. No caso do silício, o potencial elétrico de equilíbrio (tensão de arranque) é tipicamente de 0,7 volt para uma temperatura de 25 °C. Os pares elétron-lacuna criados pelo efeito da temperatura possuem um movimento desordenado. Contudo, caso se aplique uma tensão aos terminais da junção, verifica-se que os elétrons se irão deslocar no sentido contrário aos potenciais decrescentes, enquanto as lacunas terão um comportamento inverso. Quando a junção PN é polarizada diretamente, os elétrons do lado N são sujeitos a uma força de repulsão que contraria a barreira de potencial da região de depleção (figura 5.8). Se a tensão exterior for superior à tensão de arranque, os elétrons conseguem vencer essa barreira de potencial, iniciando a sua condução, sendo a resistência à passagem da corrente bastante reduzida.

Assim, quando um elétron sai do terminal negativo da fonte de tensão, atravessa o semicondutor do tipo N. Se a tensão da fonte for superior à tensão de arranque, o

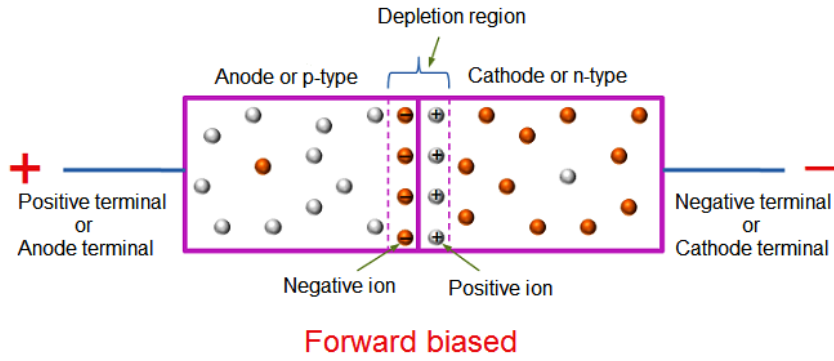


Figura 5.8: Junção P-N diretamente polarizada [PRE15].

eletrão possui energia suficiente para contrariar a barreira de potencial, alcançando o semiconductor do tipo P, onde se recombina com uma lacuna. Este eletrão está continuamente sujeito à força de tração do terminal positivo da fonte. Deste modo, vai-se recombinando com as lacunas que se encontram à sua direita até chegar à outra extremidade da junção P-N e a junção entra em condução. Caso a junção seja inversamente polarizada, a tensão aplicada aumenta a região de depleção (figura 5.9) pois, tanto os eletrões, como as lacunas de ambos os semicondutores, são atraídos para os terminais da fonte. Desta forma, o número de portadores junto da região de depleção diminui, o que permite aumentar o seu tamanho. Neste caso, o equilíbrio é atingido quando o potencial da região de depleção cessa o seu crescimento.

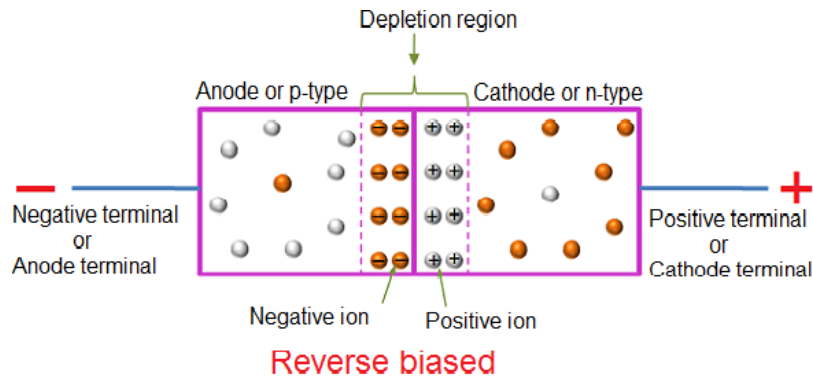


Figura 5.9: Junção P-N inversamente polarizada [PRE15].

Apesar da região de depleção aumentar, existe uma corrente inversa quase insignificante resultante dos portadores minoritários criados pela energia térmica. A temperatura ambiente produz alguns portadores minoritários em cada uma das regiões: eletrões no semiconductor do tipo P e lacunas no semiconductor do tipo N. A grande maioria dos portadores minoritários recombina-se com os portadores majoritários, no entanto, alguns portadores minoritários conseguem alcançar a região de depleção devido ao potencial imposto pela fonte externa. Desta forma, ao atravessarem a região de depleção dão origem a uma pequena corrente inversa, designada corrente de saturação [Ama17].

5.3.2 Tipos de detetores semicondutores para detecção de radão

O RAD7 DURRIDGE é um dos detetores semicondutores mais utilizados para a detecção de radão e foi o utilizado neste trabalho uma vez que é o que está disponível no laboratório, LabExpoRad, na Covilhã.

O RAD7 DURRIDGE utiliza um detetor alfa de estado sólido, que é um material semicondutor (geralmente silício), que converte a radiação alfa diretamente num sinal elétrico. Uma vantagem importante dos dispositivos de estado sólido é a sua robustez por um lado e, por outro, é a capacidade de determinar eletronicamente a energia de cada partícula alfa. Isto torna possível saber exatamente qual foi o isótopo (^{218}Po , ^{214}Po , etc.) produzido durante a radiação. Assim, pode distinguir-se, imediatamente, o radão antigo do radão novo; distinguir o radão do torão e distinguir um sinal do ruído. Esta técnica, conhecida como espetrometria alfa, é muito vantajosa para aplicações de rastreio ou captura de amostras. Existem muito poucos instrumentos, para além do RAD7, que sejam capazes de o fazer.

É necessário e importante, distinguir entre monitores reais contínuos, em tempo real, e outros instrumentos e dispositivos. Com um monitor contínuo, pode-se observar a variação dos níveis de radão, durante o período da medição. Por vezes esta medição pode mostrar grandes flutuações na concentração de radão e pode permitir inferir-se a presença de processos que influenciam no nível de radão. Para obter dados de boa qualidade, é importante que haja contagens suficientes, que forneçam leituras estatisticamente precisas. Os dispositivos que só fornecem uma única leitura média, ou cuja precisão é inadequada, exceto após um longo período de medição, não são, neste sentido, monitores contínuos. Outro parâmetro importante é a radiação de antecedentes. Esta é a leitura fornecida, pelo instrumento, quando não há radão na amostra do ar. Para se efetuar monitorização de baixo nível, a radiação de fundo tem de ser extremamente baixa e estável. Graças ao detetor de partículas alfa de alta qualidade e análise única do espectro em tempo real, a radiação de fundo é muitíssimo pequena e o detetor é imune à acumulação do ^{210}Pb , que afeta significativamente outros instrumentos.

Um núcleo ^{222}Rn que se desintegra no interior da célula deixa um descendente direto (^{218}Po), como um ião com carga positiva. O campo elétrico que existe no interior da célula conduz este ião com carga positiva ao detetor, ao qual adere por atração eletrostática. Se porventura o núcleo de ^{218}Po (de curta duração) se desintegrar na superfície ativa do detetor, a sua partícula alfa resultante tem 50% de hipóteses de atingir o detetor e produzir um sinal com uma amplitude proporcional à energia da partícula alfa. O RAD7 amplifica, filtra e ordena os sinais, de acordo com a intensidade da amplitude produzida. No modo *TRACKING*, o RAD7 só utiliza o sinal de ^{218}Po para determinar a concentração de radão e o de ^{216}Po para determinar a concentração do torão, ignorando os descendentes do radão, que têm tempos de semivida mais longos. Desta forma, o RAD7 consegue uma resposta rápida a alterações na concentração de radão [Dur20].



Figura 5.10: RAD7 [Dur20]

5.4 Fotodíodos

O fotodíodo é um dispositivo semiconductor que converte luz ou radiação ionizante em corrente elétrica. A corrente é gerada quando os fótons ou uma outra radiação são absorvidos no fotodíodo. Os fotodíodos são feitos de uma junção p-n ou junção PIN. Quando um fóton ou uma outra radiação com uma determinada energia incide na superfície do fotodíodo, origina uma par elétron-lacuna. Se porventura este fenómeno decorrer nas vizinhanças da região de depleção, as partículas do par serão aceleradas em direções opostas devido ao campo elétrico existente nesta região. Os elétrons deslocam-se para o cátodo (lado n) e as lacunas para o ânodo (lado p). Os fotodíodos podem ser utilizados como dosímetros pelo facto de serem sensíveis à radiação ionizante e possuírem uma janela suficientemente fina que deixa passar a radiação. Neste trabalho foi realizado o estudo dos fotodíodos semicondutores PIN Silonex SLCD-61N5, com vista à sua utilização na deteção de partículas alfa cuja descrição será apresentada no Capítulo 7.

5.4.1 Métodos de deteção de radão utilizando fotodíodos de silício PIN

O interesse nas medições do radão vem por um lado no campo da proteção radiológica e, por outro, pelas investigações nas áreas de geofísica e astrofísica. Vários trabalhos têm vindo a ser desenvolvidos para interligar as emanações de radão com os fenómenos de erupções vulcânicas e terremotos [Effo2, Maro2]. Dependendo da aplicação, os detetores de radão têm de ser concebidos para trabalhar em determinadas situações específicas. Para fins de proteção radiológica, existem vários tipos de dispositivos que cumprem as características requeridas [Qui03]. Limites de deteção baixíssimo, cerca de alguns mBq/m^3 são necessários em laboratórios que trabalham na deteção de neutrinos cósmicos e estão a ser desenvolvidos aparelhos mais sensíveis para a medição do radão no ar e na água [Tak99, Kiko1, Maro6]. Todos os sistemas de deteção que utilizam dosímetros semicondutores incluem as mesmas funções básicas [Spi05].

Os métodos de deteção de radão usando dosímetros de semicondutores estão resumidos na figura 5.11, onde os sensores utilizados convertem a energia depositada por uma partícula alfa em energia elétrica. Isto pode ser conseguido de várias formas, porém, neste contexto, a energia é absorvida por um semiconductor, por exemplo de silício. Vários investigadores

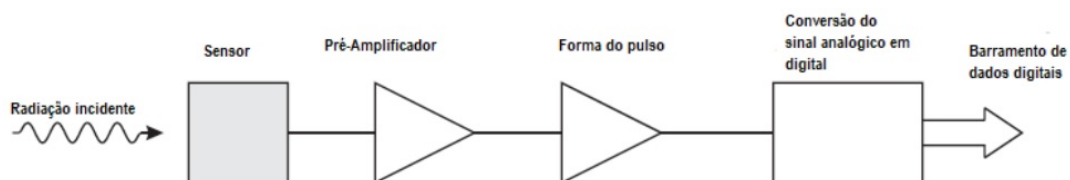


Figura 5.11: Funções básicas de um detector [Spio5]

utilizam nos seus trabalhos de desenvolvimento de protótipos de deteção de radão , sensores da Hamamatsu [Tak99, Lee20, Gui18, Sor20, Tag01]. A carga do sinal produzida no fotodetector é bastante pequena, pelo que o sinal do sensor deve ser amplificado pelo pré-amplificador ou amplificador. A magnitude do sinal está sujeita a flutuações estatísticas e a ruído eletrónico, pelo que, no desenvolvimento de protótipos, deve ser tido em conta que o sensor e o pré-amplificador devem ser concebidos, cuidadosamente, de forma a minimizar o ruído eletrónico [Nam15, Pel21, Gri08].

Capítulo 6

Avaliação dosimétrica populacional da concentração do radão habitacional no município do Lubango

Estão atualmente a ser realizadas, em vários países, campanhas de sensibilização, a fim de determinar a distribuição dos níveis de radão em edifícios. Uma vez que a concentração média de radão varia com as condições climáticas e a localização geográfica, é muito difícil recolher dados representativos com as mais variadas técnicas de recolha de amostras. Para efeitos de medições a longo prazo, a avaliação de exposição em edifícios é feita por dosímetros de integração passiva, detetores CR39. Para se obter uma distribuição da dose anual efetiva para uma determinada população, a partir destas medições, são considerados vários fatores, alguns dos quais são discutidos e ilustrados com determinados procedimentos, incluindo a variação temporal e espacial, equilíbrio entre os descendentes de radão, fatores ocupacionais e aspetos dosimétricos.

6.1 Caracterização geográfica e geológica do Lubango

Este estudo centra-se no extremo sudeste de Angola em Lubango, a capital da província da Huíla, localizada no planalto da Huíla, figura 6.1. É constituído pela comuna do Lubango (equivalente à própria cidade) e pelas comunas da Arimba, Hoque e Huíla (comuna com o mesmo nome que o da província). O principal referencial geográfico do Lubango é a Serra da Chela, uma grande cadeia montanhosa que cerca todo o oeste do município, onde se registam algumas das maiores elevações da província e do país. Tem aproximadamente 876000 habitantes, uma área de 3147 km² e uma altitude média de 1790 m. Angola está localizada na região inter-tropical (o equador, a norte e o trópico de capricórnio, a sul). O seu clima depende de factores climáticos predominantes como a latitude, a circulação atmosférica e a incidência de raios solares, mas também de factores típicos e intrínsecos da região, como a corrente fria de Benguela, no Oceano Atlântico e a topografia da região. O clima de Angola é por natureza sazonal, caracterizado por verões quentes e húmidos (outubro a maio) e invernos frios e secos (junho a setembro) [Hun19]. O Lubango tem uma temperatura média anual de 18 °C e é provavelmente a cidade com o clima mais ameno e temperado de Angola, como se pode ver pelos registos das temperaturas anuais apresentados na figura 6.2 [Wik20a].

Em termos geológicos (ver figura 6.3), o Lubango é caracterizado por rochas ornamentais graníticas [CES05]. Filões de pegmatito e aplito, alguns de apreciável possança, são ainda frequentes, sobretudo, nas zonas ocupadas pelas rochas migmatíticas. Entre todas estas rochas de idade pré-cambriana, há uma íntima ligação, atendendo à sua génese -anatexia. Do primitivo substrato, representado por gnaisses, anfíbolitos e micaxistos, existem restos em vários pontos da área. Estes vestígios do terreno primitivo não atingidos pela difusão do

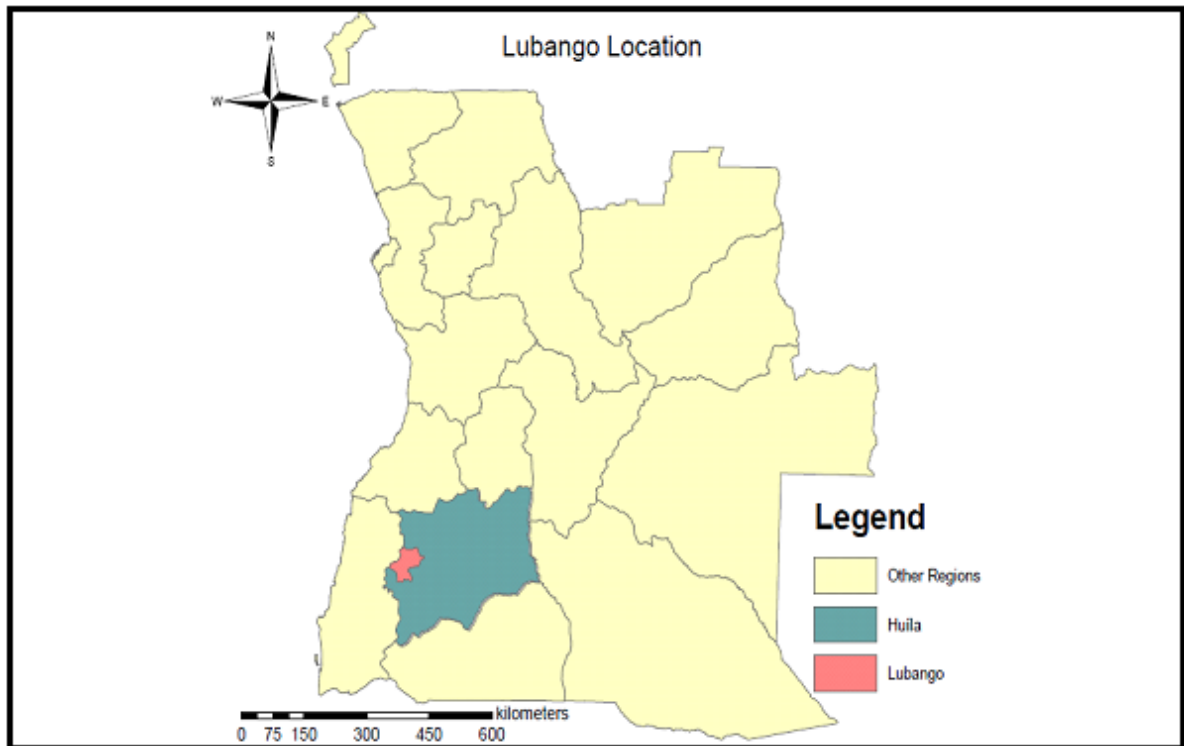


Figura 6.1: Mapa de Angola e da cidade do Lubango, feito no ArcMap 10.3 [ESR18, ESR20a] e as shapefiles foram adaptadas do MapCruzin.com.

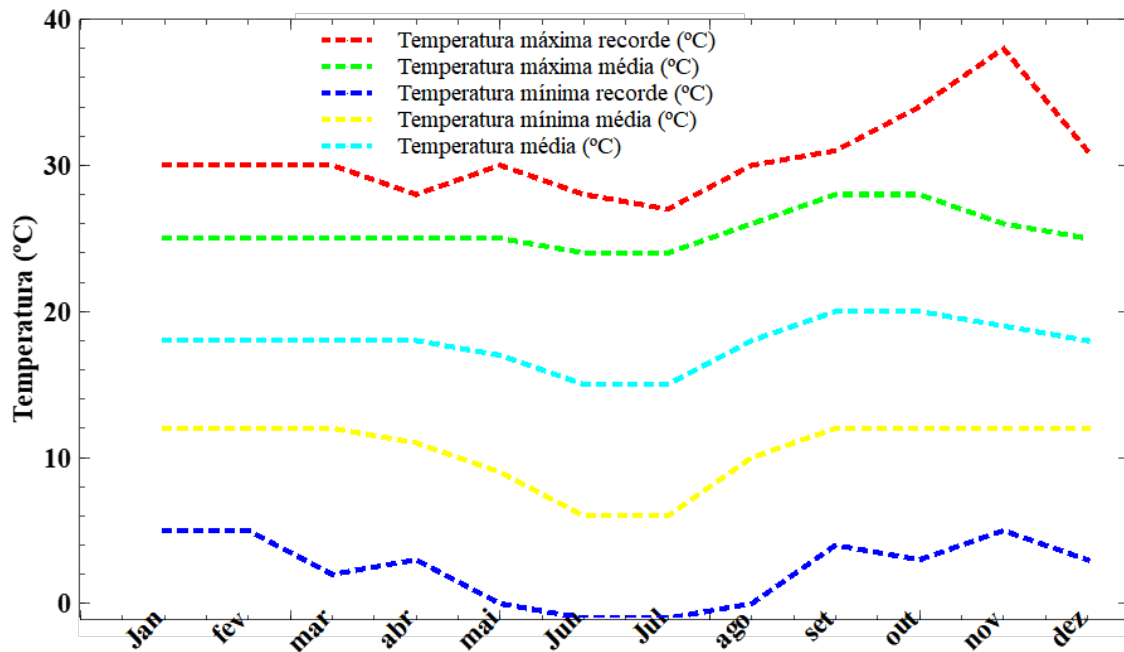


Figura 6.2: Registos anuais de temperatura do Lubango a partir de Setembro de 2020 (adaptado de [Wik20a]).

«ichor», são, porém, de tão fracas proporções que não têm representação na carta geológica elaborada [Fra71].

Rochas eruptivas de diferente natureza e várias idades, tais como gabros com ou sem olivina, noritos, hornblenditos, doleritos com ou sem olivina, pórfiros (quartzíticos e dioríticos), riólitos, lamprófiros (espessartitos), andesitos, basaltos olivínicos, etc., afloram, também em certa profusão na área, constituindo filões, soleiras, etc. Nalguns casos, o modo da jazida destas rochas, parece mesmo traduzir a existência de chaminés vulcânicas (morro do Hoque) ou testemunham a de mantos de lavas (serra de Onomono). A subida de todas estas rochas, através do substrato granítico-migmatítico, está sem dúvida, ligada aos vários episódios, da tectónica regional. As massas filonianas existentes, algumas com dezenas de quilómetros e ainda a vasta rede de fraturas, não obliteradas pelos magmas ou suas emanações, mostram claramente, ter sido a área submetida a ações tectónicas, de grande intensidade e de vários tipos, que se teriam feito sentir desde o Pré-câmbrico ao Cretácico e talvez mesmo depois [Fra71].

Rochas de origem sedimentar, mais ou menos metamorfizadas (grés e quartzitos), afloram igualmente na área, repousando diretamente sobre o granito. Estas rochas, ocupam parte do canto sudoeste, constituindo ali o topo do esporão do planalto da Humpata, sobranceiro a Sá da Bandeira (hoje o Lubango). Tendo sido ainda identificadas noutros locais, tais como, na margem esquerda do rio Hanga, na margem esquerda do rio Tovire e ainda a oeste do Hoque, junto à confluência Tovire-Hoque [Fra71].

As rochas greso-quartzíticas existentes nestes locais são, porém, ali somente representadas por retalhos de reduzidas dimensões. As rochas referidas, fazem parte do agrupamento estratigráfico designado por «Formação da Chela», que se acha largamente representado nas áreas situadas a sul. Das rochas existentes, o granito é a que ocupa a maior parte da área (cerca de três quartos). Esta rocha apresenta, porém, consoante a sua situação, variações, tanto texturais como mineralógicas, representadas respetivamente por granitos gnáissicos, granodioritos, granitos porfíroides, etc. A variação mineralógica, vai ao ponto, de certas rochas do maciço existente, terem sido classificadas como dioritos e sienitos. A restante parte da área, é quase somente, ocupada pelas rochas migmatíticas, visto as outras rochas a que já se fez referência, ocuparem espaço restrito, em relação ao abrangido pelas rochas graníticas e migmatíticas [Fra71].

Nas rochas migmatíticas há, também, variações tanto estruturais como mineralógicas. O granito ocupa no geral, a parte da área de altitude mais elevadas, ou seja, a menos trabalhada pela erosão, havendo, porém, algumas pequenas manchas, disseminadas, por entre as rochas migmatíticas [Fra71]. Das rochas afins do granito, isto é, as rochas de origem comum, a que se já se fez referência, somente, os granodioritos, têm representação apreciável, visto, ocuparem zonas mais ou menos extensas. Acerca das restantes -dioritos e sienitos -dir-se-á, que os dioritos não são raros, reportando-se, no geral, ao tipo quartzodiorítico. Quantos aos sienitos, estes apenas foram identificados em dois locais, sendo, porém, de diminutas dimensões os afloramentos existentes. Além das formações referidas, existem ainda na área, outras mais recentes, representadas por rochas incoerentes (solo). A estas formações de natureza eluvionar ou aluvionar, foram atribuídas idades, que vão desde o Pliocénico ao

Quaternário recente [McC13, Fra71, SILO5].

Em termos de ocorrências minerais, trabalhos de cobertura geológica e prospeção, efetuados na área correspondente levaram à descoberta de índices de molibdénio, cobre, ouro e moscavite (mica). Quanto ao ouro, este elemento existe, se bem que em fraca percentagem, nas aluviões do rio Mungondo, um pouco a jusante, do local onde se situa a ocorrência de mica [Fra71].

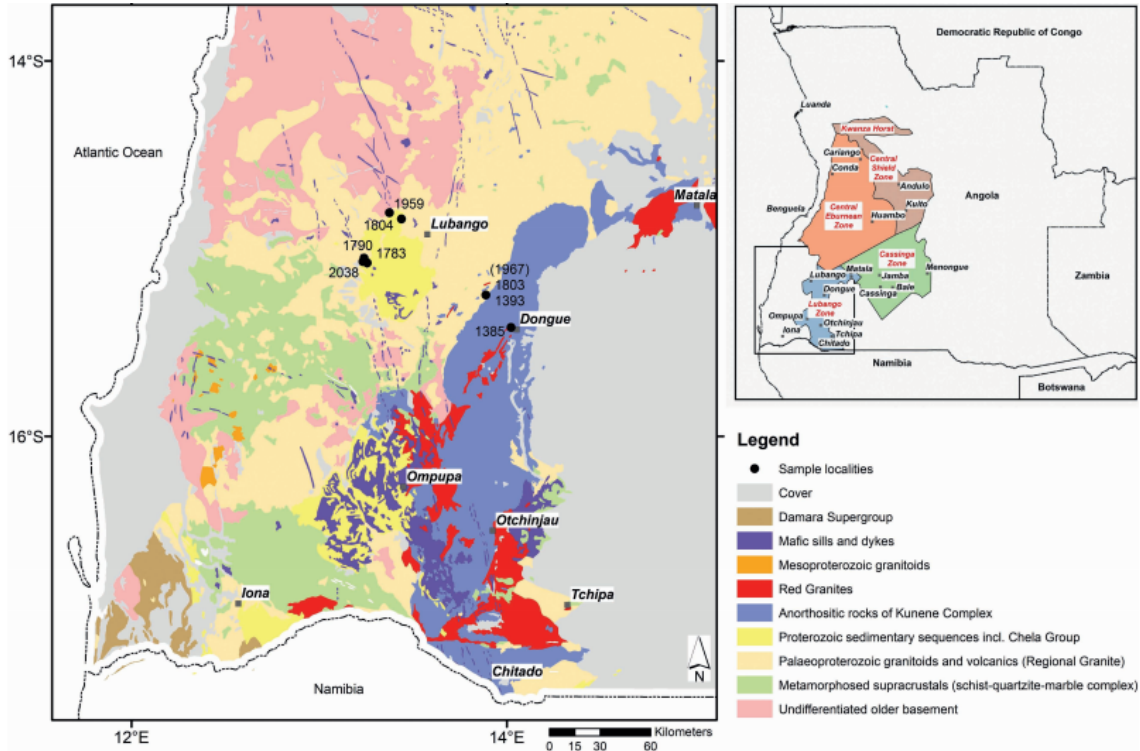


Figura 6.3: Geologia do SW Angola e várias cidades (Carvalho e Alves 1993) [McC13, Per11].

6.2 Medição da concentração do radão habitacional

No início dos anos 90, Angola viveu momentos de guerra civil, levando a população a abandonar regiões instáveis e a concentrar-se em regiões mais pacíficas, a cidade do Lubango em particular. Esta é uma das razões que levou à diversificação urbana da cidade. Assim, cerca de 36% (N=27) dos edifícios selecionados são predominantemente de adobe, enquanto 64% (N=47) são edifícios de tijolo. Dos edifícios avaliados 76% (N=56) são do tipo rés-do-chão, 19% (N=14) são de um andar, 4% (N=3) são edifícios de dois andares e três andares, respetivamente. O maior edifício avaliado foi o Hospital Central do Lubango, com 8 andares, contribuindo com 1% (N=1). O anexo A.1 apresenta mais detalhes sobre principais características das habitações em estudo.

Para medir a concentração de radão no interior dos edifícios, foi utilizada uma técnica passiva com detetores CR-39. Estes *chips* de plástico, de pista nuclear sólida de $10 \times 10 \text{ mm}^2$, são detetores integrados e leves, colocados dentro de uma câmara de difusão cilíndrica sensível ao radão, que são comumente usados para medições do gás radão a longo prazo [Vas13, Koc18, Zen18, Lee05, Sha16a].

Foram fixados com fita adesiva forte, a fim de evitar mudanças de posição. Para minimizar possíveis erros associados a variações ambientais durante a colocação dos detetores, foram colocados no mesmo dia de manhã por uma equipa treinada para o efeito. Para avaliar o potencial de exposição ao radão, foram utilizados 164 detetores, e 74 unidades habitacionais foram seleccionadas e divididas em dois grupos distintos de habitações: um primeiro grupo foi composto por 16 edifícios públicos nos quais 96 *SSNTD* CR-39 foram colocados nos pisos térreos a 1 m acima do solo [San18, Has96] durante um período de 90 dias [Iid97, Ask19], durante o inverno, onde trabalhadores e estudantes permanecem a maior parte do tempo, tais como gabinetes de instituições públicas, salas de professores, salas de aula, laboratórios, gabinetes de diagnóstico e tratamento médico, etc. Um segundo grupo era composto por 58 casas unifamiliares, nas quais 68 detetores foram também colocados nas mesmas condições, em locais onde os residentes permanecem a maior parte do tempo, salas de jantar ou quartos, durante 90 dias, também durante o inverno. A recolha de todos os detetores foi realizada pela mesma equipa responsável pela sua colocação e seguindo a mesma ordem e plano de intervenção. Os detetores foram colocados afastados das paredes e afixados em móveis ou armários. Colocou-se um maior número de detetores em instituições públicas, por haver nesses locais uma maior densidade populacional e, conseqüentemente, mais indivíduos expostos ao radão. A possibilidade de colocar os detetores em caves foi descartada, uma vez que as pessoas dificilmente permanecem em caves por muito tempo. Por esse motivo, foram todos colocados no rés-do-chão, a cerca de 1 metro do chão já que, sendo ligeiramente mais denso do que o ar atmosférico, o radão tem tendência a acumula-se nas zonas mais baixas dos edifícios.

Neste trabalho, as medições foram realizadas apenas durante a estação fria. Como se pode observar na figura 6.2, podem ser alcançadas temperaturas inferiores a $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Durante este tempo as pessoas têm a tendência de manter as janelas e as portas das casas fechadas, facilitando a acumulação de radão no seu interior. Por hábito, nesta estação do ano, a população do Lubango, regressa a casa logo após o pôr do sol, por volta das 18 horas,

permanecendo no seu interior, em média, 11 horas por dia. Estes factos favorecem a escolha da hora de inverno para a realização do presente estudo, uma vez que são esperadas concentrações interiores mais elevadas do que as que poderiam ser obtidas no verão.

6.2.1 Procedimento de medição da RAC

Após o período de 90 dias, os detetores foram selados e transportados de avião para o laboratório LabExpoRad na Covilhã, Portugal. Depois do ataque químico numa solução de NaOH de 6,25 M a 90 °C durante 220 minutos, os detetores foram lavados com água destilada e secos durante alguns minutos. O número de traços alfa em cada detetor foi contado automaticamente utilizando um Microscópio Radosys (figura 6.4).



Figura 6.4: Microscópio da marca Radosys existente no LabExpoRad, na Covilhã.

A concentração de atividade de radão C_{Rn} (RAC) é calculada através da seguinte equação [RAD13]:

$$C_{Rn} = \frac{(T_D - T_{D_0}) \times F_C}{t} (\text{Bq m}^{-3}) \quad (6.1)$$

em que,

$$T_D = \frac{n_g - \bar{n}_b}{S} (\text{track mm}^{-2}) \quad (6.2)$$

Onde t é o tempo de exposição (em horas), F_C é o fator de calibração específico dos detetores (em $\text{Bq h}(\text{m}^3 \text{ track mm}^{-2})^{-1}$) automaticamente fornecido pelo *Radosys QC system*, T_D é a diferença entre o número de traços n_g e o número médio de traços de fundo \bar{n}_b por área, S , e T_{D_0} é o traço por área de fundo de fabrico. Como valor padrão, T_{D_0} , o sistema usa o valor $0,3 \text{ track mm}^{-2}$ [RAD13], mas é recomendável obter T_{D_0} experimentalmente.

Neste caso n detetores brancos são processados da mesma forma que os detetores expostos, para posteriormente subtrairmos o número de traços dos expostos pelo fundo. O número médio de traços de fundo \bar{n}_b na área digitalizada para a cidade do Lubango foi de 453.

A incerteza da concentração do radão é calculada de acordo com a norma ISO 11665-4: 2012(E9) [ISO12]:

$$\sigma_{C_{Rn}}^2 = w^2 \left(n_g + \frac{\bar{n}_b}{n} \right) + C_{Rn}^2 \left(\frac{\sigma_\omega}{\omega} \right)^2 \quad (6.3)$$

onde ω é a seguinte razão:

$$\omega = \frac{F_C}{t.S} \quad (6.4)$$

e

$$\left(\frac{\sigma_\omega}{\omega} \right)^2 = \left(\frac{\sigma_t}{t} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_S}{S} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{F_C}}{F_C} \right)^2 \quad (6.5)$$

6.2.2 Técnica de interpolação usada para fazer o mapa de radão

Foi desenhado um mapa a cores da distribuição da concentração de radão utilizando o Sistema de Informação Geográfica (SIG) [Ken13]. Foram utilizadas técnicas de interpolação determinística que criam superfícies a partir de pontos medidos, com base na extensão da semelhança (por exemplo, distância inversa ponderada (IDW) [SHE68]. Esta interpolação pressupõe que cada ponto medido tem uma influência local que diminui com a distância. Assim, os pontos na vizinhança próxima recebem pesos altos, enquanto os pontos a uma distância maior recebem pesos pequenos [Shao8].

O princípio subjacente da interpolação espacial é a primeira Lei da Geografia, formulada por Waldo Tobler [Tobo4], esta lei afirma que tudo está relacionado, as coisas mais próximas estão relacionadas com as mais distantes. A maioria dos métodos de interpolação aplica-se a autocorrelação espacial onde se dá mais importância aos pontos mais próximos em detrimento dos mais distantes. A maioria dos métodos de interpolação permite controlar o número de amostras dos pontos utilizados para estimar os valores das células. Por exemplo, se limitar as amostras em 10 pontos, o interpolador utilizará os 10 pontos mais próximos para estimar os valores das células [Kes11]. A distância a cada ponto de amostra varia em função da distribuição dos pontos. Se a amostra tiver muitos pontos, reduzindo o tamanho da amostra, acelera o processo de interpolação, porque um conjunto menor de números será usado para estimar o valor de cada célula. Também se pode controlar o tamanho da amostra através da definição de uma área ou raio de estudo. O número de amostras de pontos encontrados dentro de um raio de pesquisa pode variar em função da forma como os pontos são distribuídos. Pode-se optar por utilizar alguns ou todas as amostras que se enquadram neste raio, para calcular o valor da célula. Um raio de pesquisa variável continuará a expandir-se até que o tamanho da amostra específica seja encontrado. O raio de busca fixo utilizará apenas as amostras contidas no seu interior, independentemente de quantos pontos possam ser. Com base no exposto anteriormente, como o município do Lubango tem três comunas, neste projecto colocou-se a maior parte dos detetores em zonas da cidade onde há maior densidade populacional, principalmente em zonas onde há mais ofertas quer

em serviços públicos quer em privados nos domínios da educação saúde, educação e em empresas. Nesta visão o mapa representado na figura destacou-se a interpolação na zona de maior densidade populacional, ficando de fora as comunas da Huila e do Hoque, isto pelo facto da área do Lubango ser muito grande, não sendo suficiente o número de detetores para englobar todas áreas. O mapeamento do Lubango neste caso só será definitivo quando os detetores forem colocados numa proporção maior em todas comunas da província da Huila.

6.2.3 Dose anual efetiva

A fim de calcular a dose anual efetiva, D_{ef} , para as moradias unifamiliares aplicou-se a seguinte equação proposta na publicação UNSCEAR [UNSoob].

$$D_{ef} = C_{Rn} T F DCF \quad (6.6)$$

Onde D_{ef} é a dose anual efetiva (em mSv), C_{Rn} é a concentração média de radão (em Bq m⁻³), T é o tempo de ocupação interior (7000h por ano para moradias unifamiliares e 2000 h para edifícios públicos). DCF é o fator de conversão de dose ou coeficiente de dose [PRO18b]. O tempo de ocupação interior em edifícios públicos é coincidente com o tempo de trabalho estabelecido pela lei geral de trabalho de Angola, tabela 6.1 Na maioria das circunstâncias, o ICRP recomenda um coeficiente de dose de 3 mSv por mJ h m⁻³. Utilizando a hipótese do fator de equilíbrio padrão de F=0,4 para a maioria das situações, isto corresponde a $6,7 \times 10^{-6}$ mSv por Bq h m⁻³. Para trabalhos em interiores que envolvam atividade física substancial, a ICRP recomenda 6 mSv por mJ h m⁻³. Utilizando a hipótese do fator de equilíbrio padrão de F=0,4, isto corresponde a $1,4 \times 10^{-5}$ mSv por Bq h m⁻³ [PRO18b]. Neste estudo, as medições foram apenas feitas no inverno, pelo que, de acordo com o descrito na literatura [Sto11], se espera que correspondam a valores superiores aos que seriam medidos no verão, o que permite concluir que a dose anual efetiva obtida será sobrestimada. O cálculo da incerteza da dose efetiva anual é obtido utilizando a seguinte equação:

$$U = \sigma_{Rn} \times K \quad (6.7)$$

Onde σ_{Rn} é o erro da medição e K é a constante da dose anual efectiva.

Tabela 6.1: Tempo de ocupação interior em edifícios públicos em Angola

Mês	Dias úteis	Horas mensais
Janeiro	22	176
Fevereiro	18	144
Março	21	168
Abril	19	152
Maio	21	168
Junho	22	176
Julho	21	168
Agosto	22	176
Setembro	21	168
Outubro	22	176
Novembro	20	160
Dezembro	21	168
Total	250	2000

6.3 Resultados e discussão dos valores obtidos na região em estudo

Após a revelação dos detetores CR39, aplicando todos os métodos e procedimentos detalhados nos pontos anteriores, com o microscópio óptico da Radosys, obtiveram-se os valores correspondentes à concentração de radão dos 75 edifícios selecionados que são apresentados no anexo A.2.

6.3.1 Concentração de radão no interior dos edifícios

Com objetivo de se comparar os resultados obtidos na cidade do Lubango, em termos de valores médios, tanto em edifícios públicos como em moradias unifamiliares, com estudos já realizados em Angola, regiões fronteiriças e em outros países, construíram-se as tabelas 6.2 e 6.3 onde está indicada a concentração média de radão. Analisando os dados destas tabelas conclui-se que a maior e a menor concentração média de radão em edifícios públicos, é, respetivamente, (256 ± 9) Bq m⁻³, na Administração Comunal da Arimba e (25 ± 1) Bq m⁻³, no Instituto Superior Politécnico da Huíla. No que diz respeito às moradias unifamiliares, os valores mais elevados e mais baixos são respetivamente (159 ± 4) Bq m⁻³, no bairro Helder Neto e (13 ± 0) Bq m⁻³, no bairro Lucrécia. Globalmente, os valores de concentração de radão, medidos no Lubango, cobrem uma ampla faixa, entre 7 e 491 Bq m⁻³, com um valor médio de 108 Bq m⁻³. Os menores valores de concentração de radão foram registadas no centro da cidade. No entanto, os valores mais elevados de concentração de radão, foram medidos nas regiões oeste, norte e sul, áreas muito próximas das montanhas e atravessadas por alguns rios onde abundam rochas graníticas. Estudos semelhantes foram feitos em algumas regiões de Angola durante o inverno, nomeadamente Cabinda Huambo

e Menongue, onde foram medidas concentrações médias de 22 Bq m^{-3} , 94 Bq m^{-3} e 53 Bq m^{-3} respetivamente [Sal20a], valores mais baixos do que os medidos na cidade do Lubango.

Tabela 6.2: Concentração média de radão em edifícios públicos

Código	Localidade	Número de detetores	RAC (Bq m^{-3})
1	Ademar Damião	4	48 ± 2
2	Administração Municipal do Lubango	4	84 ± 2
3	Instituto Médio de Economia do Lubango	4	35 ± 2
4	Instituto Superior Politécnico da Huíla	2	25 ± 1
5	Escola Portuguesa do Lubango	4	61 ± 4
6	Escola Secundária do Lubango	5	50 ± 2
7	Hospital Central do Lubango	4	163 ± 2
8	14 de Abril	4	65 ± 2
9	27 de Março	4	87 ± 3
10	Administração Comunal do Hoque	10	156 ± 3
11	Administração Comunal da Huila	16	153 ± 2
12	Administração da Arimba	3	256 ± 9
13	Maternidade	10	167 ± 3
14	Escola Secundária da Arimba	6	105 ± 3
15	Mapel	6	65 ± 2
16	Instituto Superior de Ciências da Educação	11	219 ± 5

Tabela 6.3: Concentração média de radão em moradias unifamiliares

Código	Localidade	Número de detetores	RAC (Bq m ⁻³)
1	14 de Abril	3	37 ± 1
2	Arco íris	1	64 ± 3
3	Arimba	1	40 ± 1
4	Lage	3	59 ± 2
5	Benfica	5	80 ± 2
6	CDTE Cow Boy	6	143 ± 4
7	CDTE Nzagi	5	46 ± 1
8	Dr António Agostinho Neto	1	55 ± 1
9	Ferrovia	2	45 ± 1
10	Helder Neto	4	159 ± 4
11	João de Almeida	3	66 ± 2
12	Lalula	3	130 ± 4
13	Laureanos	1	34 ± 2
14	Lucrécia	3	13 ± 0
15	Mapunda	5	145 ± 4
16	Minhota	2	51 ± 2
17	Mitcha	5	63 ± 2
18	Mutundo	1	117 ± 6
19	Nambambi	4	66 ± 2
20	Senhora do Monte	5	86 ± 2
21	Sofrio	1	129 ± 2
22	Tchioco	4	56 ± 2

6.3.2 Estimativa da dose anual efetiva

Os valores de dose anual efetiva, para edifícios públicos (figura 6.5) e moradias unifamiliares (figura 6.6), foram calculados com a equação 6.6. A dose anual efetiva em edifícios públicos com tempo de exposição de 2000 horas e nas moradias unifamiliares considerando um tempo de exposição de 7000 horas variou de $0,34 \pm 0,01$ mSv a⁻¹ a $7,48 \pm 0,11$ mSv a⁻¹, o que é superior a alguns locais na Namíbia [Mun18], o país vizinho. A média global é 1 mSv a⁻¹, que é exatamente igual à dose média de inalação de radão, de todas as fontes [UNSoob] e inferior a $2,4$ mSv a⁻¹, correspondente à exposição natural total à radiação [UNS88]. A dose anual efetiva encontra-se no intervalo do nível de ação recomendado, entre 3 e 10 mSv a⁻¹ [Bre94].

Comparativamente, em outros pontos do país, as doses anuais estimadas, devido a inalação de radão, $0,75 \pm 0,19$ mSv, em Cabinda; $2,83 \pm 0,8$ mSv, no Huambo; e $1,49 \pm 0,4$ mSv, em Menongue [Sal20a], são inferiores às registadas nas moradias unifamiliares na cidade de Lubango.

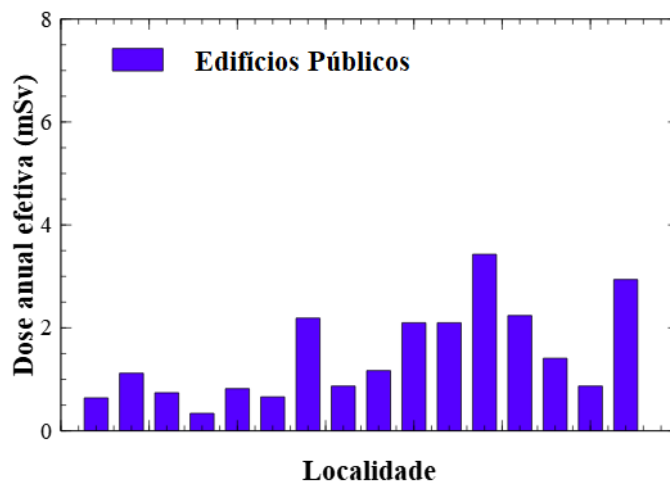


Figura 6.5: Dose anual efetiva em edifícios públicos

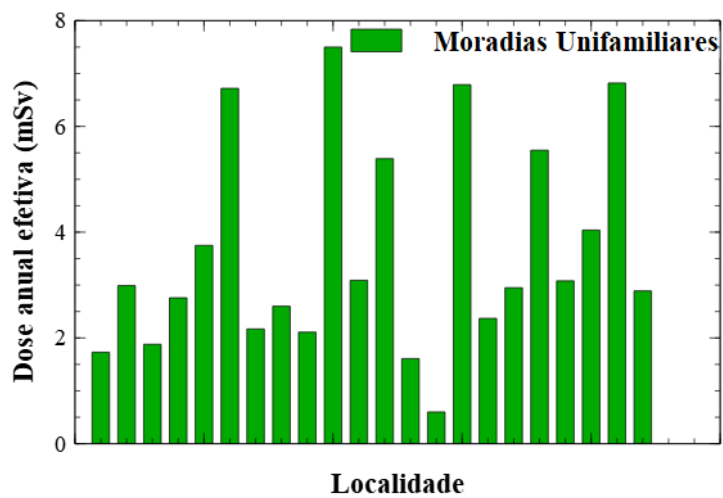


Figura 6.6: Dose anual efetiva em edifícios moradias unifamiliares

6.4 Mapeamento da concentração de radão habitacional

Um dos principais objetivos deste trabalho consistiu na elaboração de um mapa de risco relacionado com a exposição ao radão em edifícios no município do Lubango. Dada a vasta extensão deste município, optou-se por um estudo piloto no qual foram selecionadas apenas as zonas onde há maior densidade populacional. Para a georreferenciação foi utilizado o Sistema de Informação Geográfica, SIG, que permite perceber quais as zonas com maiores e menores concentrações de radão. O mapa que serviu de base para aplicação do SIG foi elaborado com base na tabela que consta do anexo A3, cujos valores de z correspondem à concentração de radão.

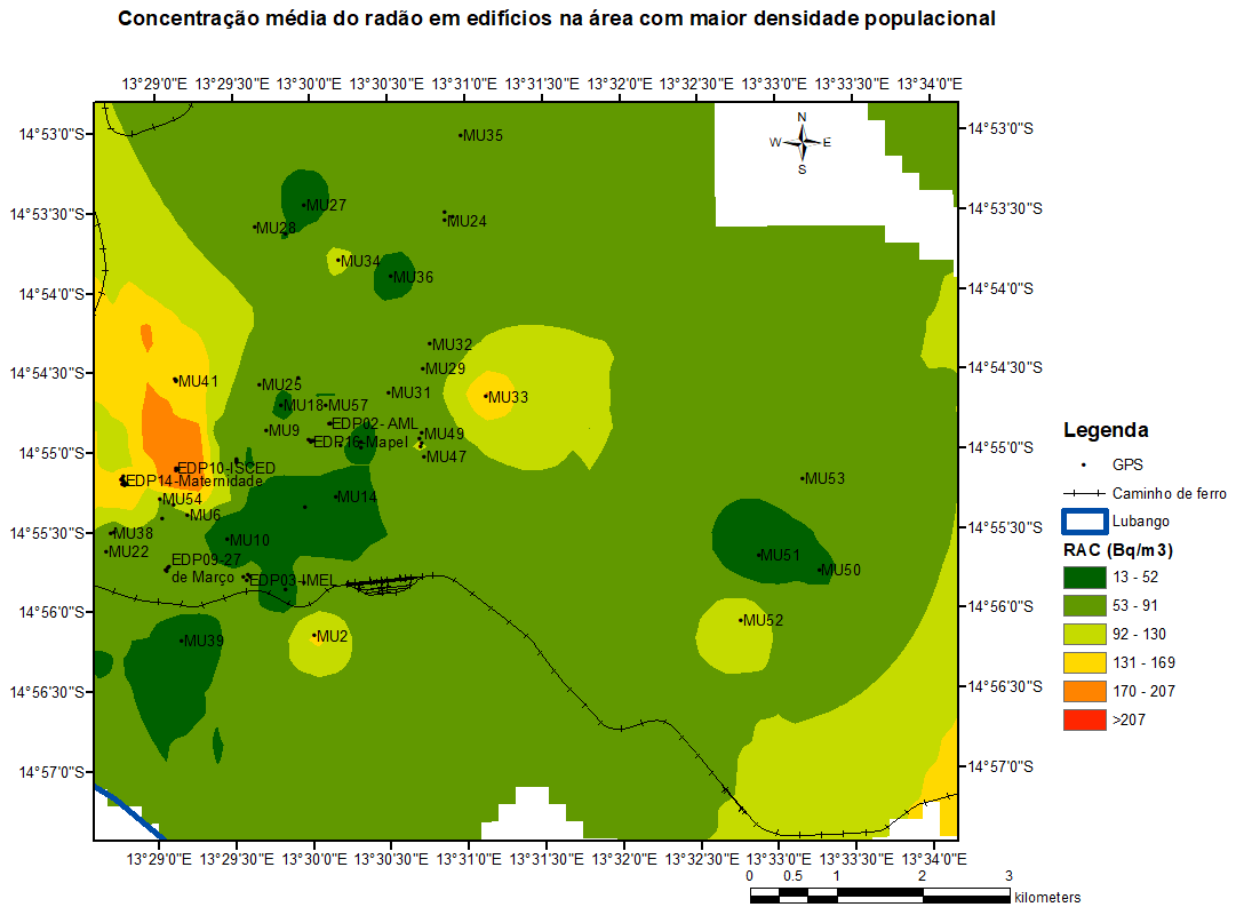


Figura 6.7: Mapa relativo a concentração de radão no município do Lubango, usando ArcMap10.3 [ESR18, ESR20a] e o mapa base adaptado da ESRI [ESR20b].

6.4.1 Sistema de Informação Geográfico

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são tecnologias que reúnem informação geográfica (localização geográfica) e informação descritiva, permitindo visualizar, manipular, analisar, transformar e disponibilizar essa informação. Os SIG são, portanto, ferramentas que permitem visualizar a informação geográfica digital dentro de um ambiente virtual. Neste capítulo serão retratados os aspetos gerais dos SIG, nomeadamente, os seus componentes, a sua estrutura, as principais funcionalidades e os *softwares*.

6.4.2 Componentes e estrutura

A evolução dos SIG permite atualmente, manipular a informação geográfica através de *desktops* de SIG e servidores de mapas com recurso a internet através da interoperabilidade dos dados espaciais [Tso08]. Contudo, apesar de serem ferramentas de análise espacial poderosas, a sua eficácia exige algum conhecimento básico dos seus programas [Goo08]. De acordo com [Lon08], os componentes de um SIG são o *hardware*, o *software*, o utilizador, dados, os métodos e a *network*. O *hardware* consiste em elementos físicos que dão suporte ao funcionamento do sistema, como servidores e computadores. Ao passo que o *software* é o elemento que permite manipular as ferramentas e funções para gerar a informação geográfica; ou seja, o *software* é uma sequência de instruções escritas, as quais são interpretadas por intermédio de um *hardware*, com a finalidade de executar determinadas tarefas. No entanto, nem o *hardware*, nem o *software* são funcionais sem a interação homem-máquina, pelo que é imperioso a formação contínua e permanente de um terceiro componente, o homem (utilizador). O quarto componente são os dados. Estes representam um dos elementos mais importantes dos SIG, pelo conjunto de valores que lhes são integrados; sendo que, para visualizar a informação geográfica é preciso um conjunto de procedimentos, a partir dos quais se pode manusear os dados espaciais. Contudo, os cartógrafos não estão mais limitados a produzir mapas estáticos como uma única representação gráfica do meio ambiente [Kimo8] e para tal, a internet tem-se destacado pela variedade de ferramentas que permitem disponibilizar e interligar dados de várias fontes com base em mapas digitais online, os chamados WebSIG [Foo98]. Os dados deixaram de ser armazenados num mesmo computador e restringindo o acesso aos utilizadores, caso não tivessem o computador fisicamente, para um sistema onde podem ser fisicamente distribuídos em diferentes lugares e onde os utilizadores podem aceder facilmente através da internet [Che14], correspondendo ao sexto elemento.

Quanto à sua estrutura, os Sistemas de Informação Geográfica, caracterizam-se pelos objetos geográficos numa mesma base espaço-dimensional e de projeção, sendo a sua estrutura convencionalmente organizada através de uma estrutura de dados denominada por *layers* ou camadas vetoriais e *raster*. Apesar de terem objetivos diferentes, têm como finalidade representar visualmente características do mundo real [Gal06]. Os modelos vetoriais são particularmente úteis para representar e armazenar recursos discretos, tais como edifícios, tubos ou limites de fronteiras. Os vetores podem ser pontos (pares de coordenadas (x,y)), linhas (conjuntos de coordenadas que definem uma forma), ou polígonos (conjuntos de coordenadas definindo fronteiras que delimitam áreas) [Boo01]. Por outro lado, podemos também verificar que os próprios polígonos podem ser construídos com base em pontos e linhas, sendo as coordenadas na maioria das vezes pares (x, y) ou tripletos (x, y, z) , onde z representa um valor como elevação.

A Rede Irregular Triangulada (TIN) é uma forma de representar os fenómenos espaciais a partir de triângulos, apresentando-se muito compacta em determinadas tolerâncias de precisão [Chro8]. Os vértices dos triângulos formam nós irregularmente espaçados, permitindo informações agrupadas em áreas complexas e informações disseminadas em áreas mais simples ou mais homogéneas [Smi18]. O conjunto de dados TIN inclui relações

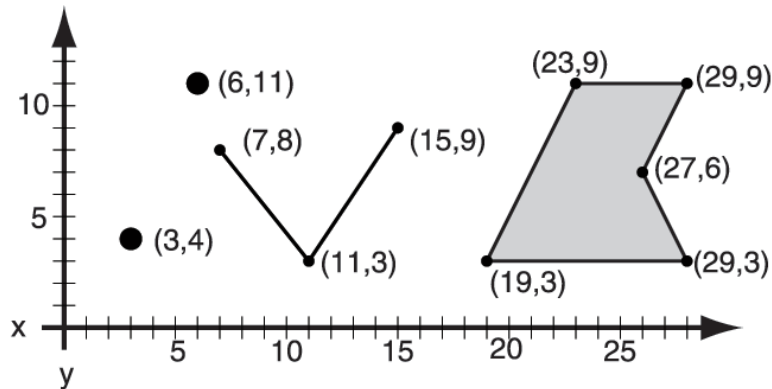


Figura 6.8: Modelos Vetoriais [Booo1].

topológicas entre pontos e os seus triângulos vizinhos, onde cada ponto da amostra possui uma coordenada (X,Y) e uma superfície ou valor Z. Esses pontos são conectados por ângulos para formar um conjunto de triângulos não sobrepostos para representar a superfície [Smi18]. Contudo, o GeoPackag é um formato aberto e padronizado para informações geoespaciais, portátil, autoexplicativo e compacto para transferência de informações. Com extensão gpkg e tabelas relacionais, o arquivo de base de dados SQLite GeoPackage enquadra-se em duas categorias: tabelas de dados definidos pelo utilizador e tabelas de metadados, sendo esta última obrigatoriamente gpkg_contents e gpkg_spatial_ref_sys. Por outro lado, os dados *raster* representam um objeto gráfico com um padrão de pontos. Trata-se de dados contínuos representados por pixels, onde cada pixel é um recurso capaz de conservar propriedades e atributos [Galo6]. Os arquivos *raster* são muitas das vezes utilizados para representações digitais de fotografias aéreas, imagens de satélites, mapas em papel digitalizados, Modelos Digitais de Terreno (MDT) ou outras aplicações que contenham imagens muito detalhadas. Para além disso, estes são também utilizados quando os custos precisam de ser mantidos baixos, quando o mapa não requer uma análise dos recursos individuais, e quando os mapas “fundo” são necessários [Fazo8]. As coordenadas (x,y) de todos os limites de um *raster* são conhecidas, podendo ser localizado no espaço geográfico (figura 6.9).

Para além dos *layers*, com formatos de arquivos vetoriais, existe também o CAD (com formatos vetoriais dwg,dgn, dxf).

6.4.3 Funcionalidades do SIG

Os Sistemas de Informação Geográfica têm como finalidade elaborar mapas digitais ou físicos através de um conjunto de técnicas específicas. Oferecem, portanto, uma variedade de funcionalidades das quais podemos destacar as seguintes: gerir uma base dados de fenómenos que ocorrem a diferentes escalas usando modelos de dados; representar graficamente informações de natureza espacial, associadas a estes gráficos; representar informações gráficas sob a forma de vetores e/ou *rasters*; limitar o acesso e controlar a entrada de dados; oferecer recursos para a visualização dos dados geográficos na tela do

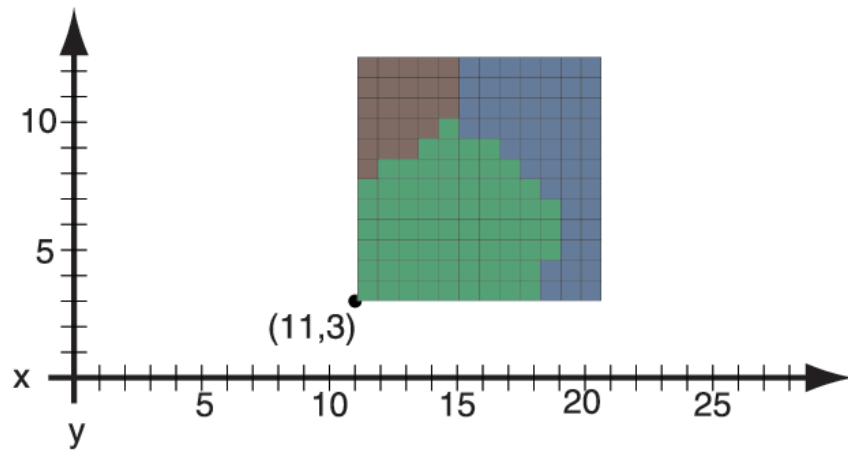


Figura 6.9: Localização geográfica de um raster no espaço [Boo01].

computador, utilizando para isto uma variedade de cores; interagir com o utilizador através de uma interface amigável (geralmente gráfica); recuperar de forma ágil as informações geográficas; possibilitar a importação e exportação de dados de/para outros sistemas semelhantes, ou para outros *softwares* geográficos; oferecer recursos para a entrada e manutenção de dados, oferecer recursos para a composição de saídas e geração de resultados sob a forma de mapas, gráficos e tabelas; manipular os dados espaciais com recurso a servidores na internet.

Quanto aos *softwares*, o SIG fornece as funções e as ferramentas necessárias para armazenar, analisar e exibir informações geográficas. O *software* disponível pode ser considerado como sendo específico da aplicação. Todos os *softwares* SIG geralmente atendem a todos estes requisitos, no entanto, a sua aparência na tela (interface do utilizador) pode ser diferente. Dos *softwares* do SIG destacam-se o ARCGIS, Bentley Map, GEOMEDIA, GRASS, gvSIG, Mapinfo, MapWindow, NETtool, QGIS, SPRING, SAGAGIS, TerraView, Transcad e VisualSIG [Wik20a].

Capítulo 7

Construção de um protótipo para a deteção do radão no ar

No presente trabalho, pretende-se reproduzir e melhorar um protótipo de deteção de gás radão no ar inicialmente desenvolvido na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa por Soraia Elísio, no âmbito da sua dissertação de mestrado [Elí19]. O detetor então construído operava como contador de pulsos permitindo a monitorização e medição do gás radão no ar, em tempo real, sem a necessidade de um sistema de bombeamento de gás. O protótipo desenvolvido pela Soraia Elísio é de baixo custo, facilmente reproduzível, usando componentes que são facilmente adquiridos no mercado. Relativamente ao protótipo já existente, procurou-se melhorar o desenho da placa de circuito impresso, que foi desenhada com o auxílio da aplicação EasyEDA disponibilizada pelo fabricante de placas de circuito impresso.

O protótipo tem como objetivo auxiliar projetos futuros em Angola. O país tem uma vasta extensão territorial, para a qual não existe, até agora, um mapa da distribuição da concentração média de radão na atmosfera. A nível de materiais de construção e da sua exalação em termos de radão, existe também um vasto trabalho a ser realizado. Estes aspetos serviram de estímulo ao trabalho que iremos apresentar neste capítulo e no próximo.

7.1 Descrição geral do protótipo

O protótipo desenvolvido tem como objetivo efetuar a monitorização do radão proveniente de fontes radioativas, num sistema fechado. Para tal, foi necessário um sistema eletrónico que consiste num fotodíodo de silício, sensível a radiação alfa. O elemento sensível do protótipo é um fotodíodo da série SLCD-61N5, sendo que o sinal de corrente gerado no sensor pode ser amplificado por um amplificador de transimpedância e convertido num sinal em tensão de pulsos, que poderá ser lido por um Arduino. Pelo facto de o sensor ser sensível à luz, foi colocado numa caixa juntamente com os demais componentes, cujo fundo é opaco, a fim de evitar qualquer reflexo de luz. O circuito possui um discriminador de sinais de entrada, temporizadores e acoplamento, cujas descrições serão detalhadas em pormenor nos pontos seguintes. A simplicidade do sistema permitirá usar este sensor em aplicações de monitorização de radão em regiões do território angolano e não só.

7.1.1 Circuito amplificador

O circuito, utilizado para fazer a monitorização do radão no ar, é subdividido em três partes: o sensor, a cadeia do circuito eletrónico de amplificação e discriminação do sinal e o sistema de aquisição de dados para contagem de pulsos (figura 7.1).

A placa do circuito impresso foi desenhada usando a aplicação EasyEDA, que é uma plataforma online de criação de circuitos e de placas eletrónicas, cujo *output* é apresentado

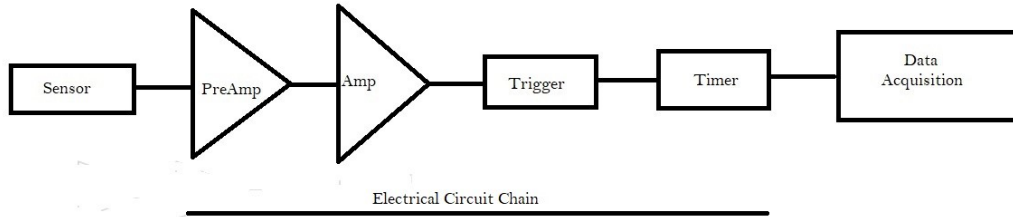


Figura 7.1: Diagrama esquemático do sistema eletrônico do protótipo para a detecção de radão.

na figura 7.2 onde se dividiu o circuito por blocos funcionais.

O bloco 1 é constituído pelo sensor, um fotodíodo de silício PIN SLCD-61N5 da Silonex com as seguintes características: face quadrada de 10,2 mm de lado e área fotosensível de 93,6 mm², conforme mostra a figura 7.3. A face de trás do fotodíodo contém o cátodo. Tanto o ânodo como o cátodo foram soldados a uma base que permite a sua conexão à placa de circuito impresso. A espessura da camada de silício sensível é aproximadamente de 0,1 µm [Sor20].

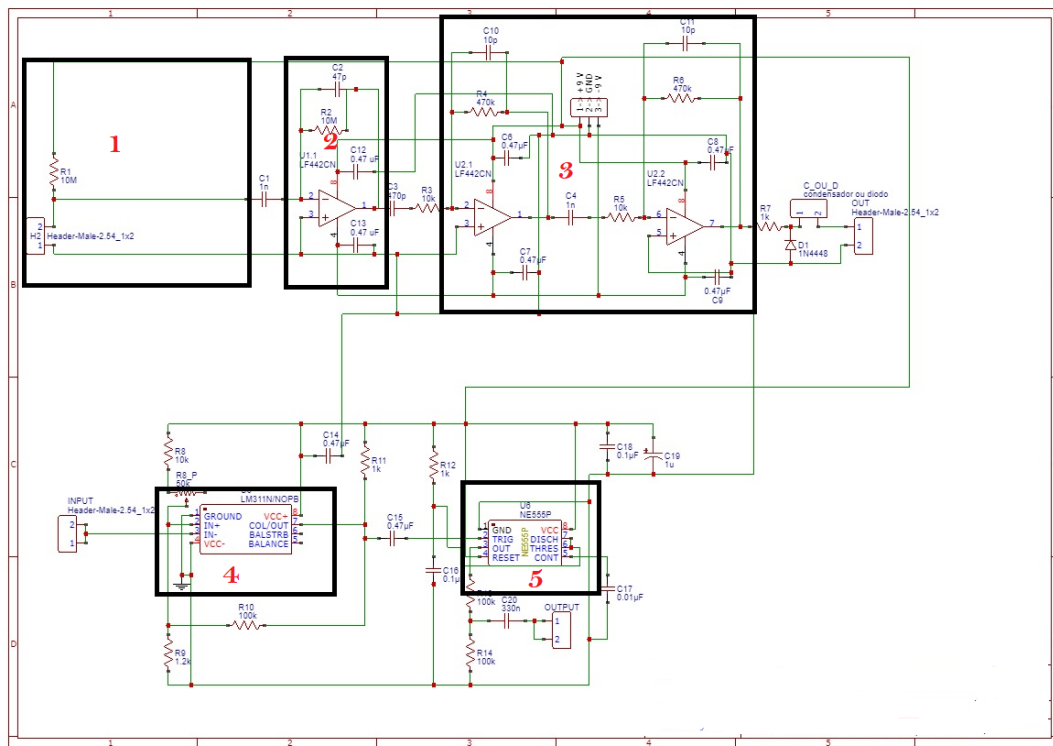


Figura 7.2: Esquema do circuito.

O fotodíodo foi polarizado com uma tensão inversa de -9 V. Assim, o ânodo do sensor ficou negativo em relação ao cátodo. Quando as partículas alfa atingem a superfície do detetor, uma corrente elétrica é gerada com uma magnitude proporcional à energia depositada. A corrente elétrica é convertida em tensão através de um amplificador de transimpedância. Com objetivo da existência de conversões de sinal sem degradação significativa da razão sinal/ruído, o pré amplificador deve ser colocado próximo do sensor, e o amplificador operacional deve apresentar uma alta impedância de entrada e correntes de

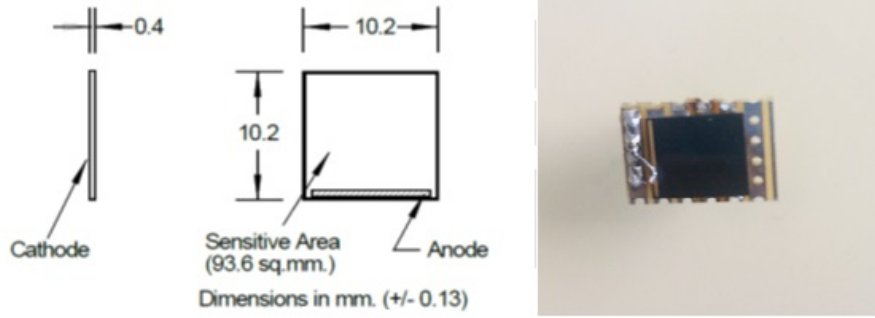


Figura 7.3: Esquema com dimensões do Silonex SLCD-61N5 [Opt16] e fotografia de uma vista superior, exemplificando a face sensível do detetor.

fuga desprezáveis o que se consegue com um amplificador operacional com um transistor de efeito de campo à entrada.

Para o presente projeto utilizou-se para o pré-amplificador e para o amplificador (blocos 2 e 3) o integrado LF442, que possui 2 amplificadores em cada integrado.

A tensão de saída do pré-amplificador pode ser calculada a partir da integração da carga produzida no fotodiodo no condensador da malha de realimentação do circuito pré-amplificador. Assim à saída a amplitude V_0 relaciona-se com a carga Q_D através da relação:

$$V_0 = \frac{Q_D}{C_f} \quad (7.1)$$

onde C_f é a capacidade do condensador de realimentação (C2 no esquema da figura 7.2). O sinal de saída terá um tempo de queda τ_f que é dado pela constante de descarga do circuito RC da malha de realimentação:

$$\tau_f = R_f C_f \quad (7.2)$$

com $R_f = R_2$.

A carga liberada pelo detetor é uma função da energia das partículas alfa, podendo ser calculada a partir da equação:

$$Q_D = (E e \times 10^6) / \varepsilon \quad (7.3)$$

onde E é a energia da partícula incidente, em MeV, e o valor do módulo da carga do eletrão ($1,602 \times 10^{-19}$ C), 10^6 é a conversão de MeV para eV e $\varepsilon = 3,62$ eV é o valor médio da energia necessária para criação dos pares eletrões-lacunas em silício [ORT15].

Quando o sensor detetar os descendentes diretos do radão, o ^{214}Po e o ^{218}Po , que libertam partículas alfa de 7,69 MeV e 6 MeV, respetivamente, se a capacidade C_f for de 47 pF, o sinal de saída será da ordem de 7 mV.

Para aumentar a amplitude desse sinal da faixa dos mV para a faixa de 1 a 10 V foram

implementados dois andares de amplificação. O bloco 3 da figura 7.2 mostra o circuito amplificador implementado no presente trabalho. Cada andar tem um ganho aproximado de 50, o que permite ao conjunto dos dois andares um ganho aproximado de 2500. O acoplamento entre amplificadores é feito por condensadores, evitando a amplificação de componentes contínuas [Elí19].

O bloco 4 é constituído pelo andar de discriminação do sinal. Por forma a isolar eletricamente o bloco 3 do bloco 4, diminuindo as interferências parasitas entre os dois blocos, o acoplamento, entre estes blocos, foi feito através de acoplamento ótico tendo-se usado o integrado EL817C, figura 7.4.

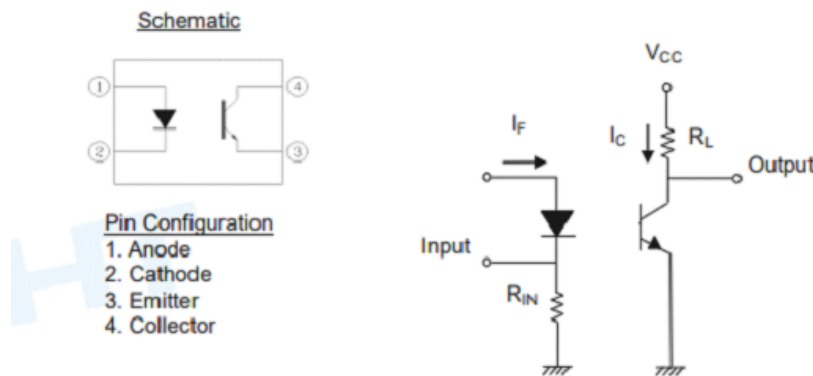


Figura 7.4: Esquema do acoplador ótico EL817C [Eve10] usado no acoplamento entre o sinal à saída do andar de amplificação e o andar de discriminação.

De um modo geral, o discriminador (bloco 4) responde, exclusivamente, aos sinais de entrada que têm uma altura de pulso maior do que um determinado limiar. Neste aparato experimental, utilizou-se como discriminador, o comparador integrado LM311 (figura 7.2, bloco 4). O limiar de discriminação foi ajustado com a resistência variável R_8 . À saída, o comparador fornece um sinal retangular, que é introduzido num circuito temporizador de forma a ser fornecido, ao Arduino, um sinal de largura adequada. Como temporizador utilizou-se o integrado LM555 (bloco 5).

7.2 Montagem e teste do circuito

A figura 7.5 mostra o desenho da placa de circuito impresso na fase inicial de montagem das bases do pré-amplificador, amplificador, discriminador e timer.

Após a montagem, de todos os componentes do circuito, na placa eletrónica, passou-se para a fase dos testes apresentada na figura 7.6. Esta montagem experimental de teste consiste numa fonte de alimentação (1), um osciloscópio (2), uma caixa de testes opaca (3), uma fonte radioativa de ^{241}Am , emissora de partículas alfa (4) e a placa do circuito eletrónico (5). A necessidade de utilizar acoplamento ótico, entre o amplificador e o discriminador, foi detetada já depois da placa de circuito impresso, ter sido fabricada, pelo que, nesta fase de testes, o circuito de acoplamento ótico foi implementado numa placa de breadboard (6).

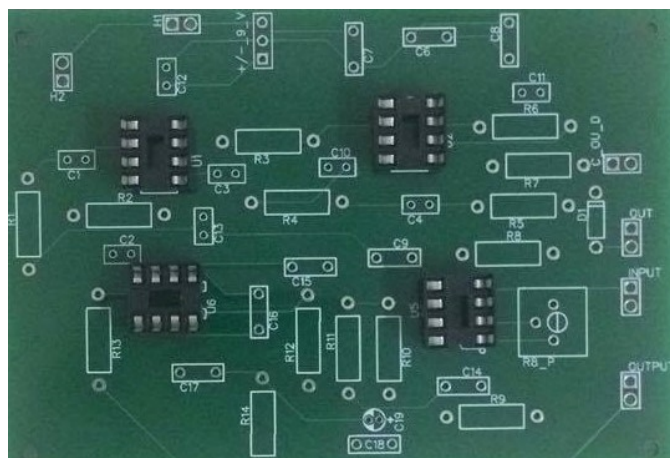


Figura 7.5: Placa do circuito impresso do protótipo com as bases dos integrados já soldadas.

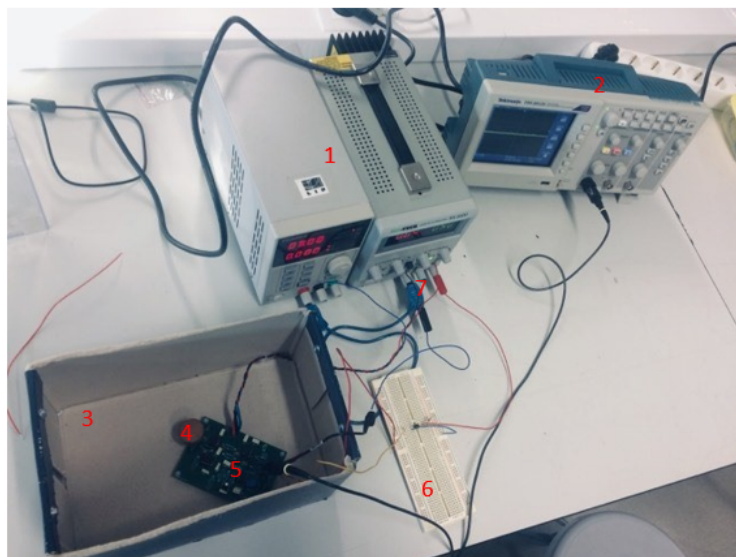


Figura 7.6: Montagem experimental de testes de circuito do protótipo: (1) fontes alimentação, (2) osciloscópio, (3) caixa de testes opaca, (4) fonte radioativa de ^{241}Am , (5) circuito impresso, (6) acoplamento ótico.

Os sinais obtidos à saída do amplificador e do timer, foram visualizados como o osciloscópio (2), quando se coloca uma fonte de amerício, ^{241}Am (4). Como o fotodíodo é sensível à luz, durante os testes tem de se manter a caixa de testes (3) tapada. Estes testes, com a fonte de amerício, serviram, por um lado, para fazer a regulação do limiar de discriminação, colocado de forma a permitir o disparo com sinais devidos à deteção de partículas alfa da fonte e, por outro lado, para ser seleccionada como uma fonte radioativa com energia próxima à do radão 5,59 MeV. Isto porque a energia típica ^{241}Am , no processo de decaimento é 5,48 MeV (com 85.2% de probabilidade) seguida de 5,4 MeV (com 12,8 % de probabilidade) [Ser95].

7.3 Fonte de alimentação do protótipo

O esquema da fonte de alimentação construída para o protótipo é apresentado na figura 7.7. O transformador que foi utilizado para fazer a fonte de alimentação (referência 44235 [Faro3]) tem uma entrada de 230 V e tem dois enrolamentos separados cada um deles para 12 volt. A estabilização da tensão à saída da fonte é conseguida utilizando reguladores de tensão integrados LM317 [Tex00] para a saída positiva e LM337 [Tex13] para a saída negativa. A malha de realimentação dos reguladores foi ajustada de forma a que, à saída, se obtenham as tensões de +9 V e -9 V, respetivamente, para a saída positiva e negativa.

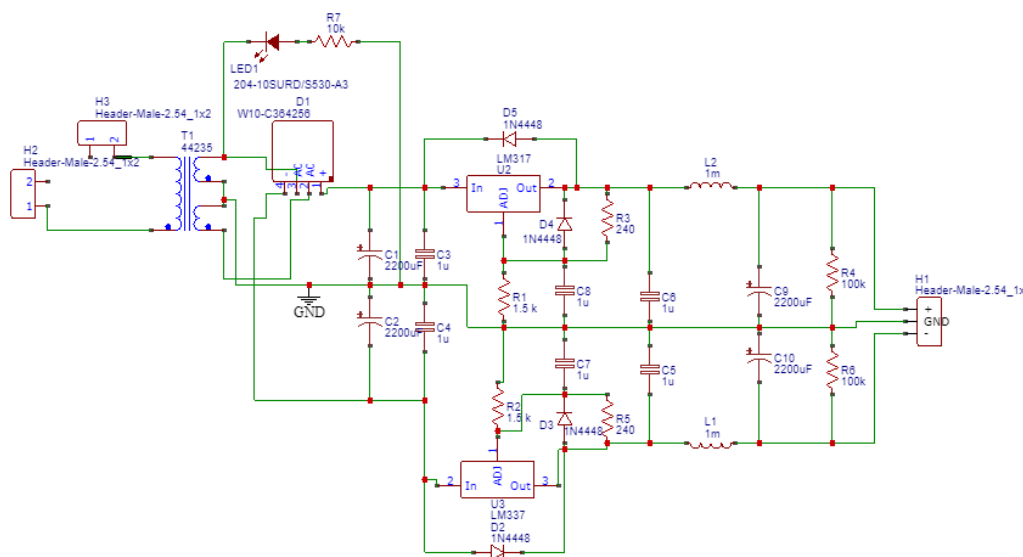


Figura 7.7: Esquema do circuito da fonte de alimentação do protótipo.

7.4 Testes do protótipo

Depois dos pré- testes, o circuito foi montado, juntamente com o Arduino, numa caixa de alumínio cujo interior foi pintado de cor preta, para evitar que o fotodíodo tivesse algum contacto com a luz.

Na figura 7.9 pode também ver-se já um pequeno circuito impresso onde foi montado o acoplador ótico. No lado esquerdo da caixa encontra-se o Arduino UNO (2) que tem como

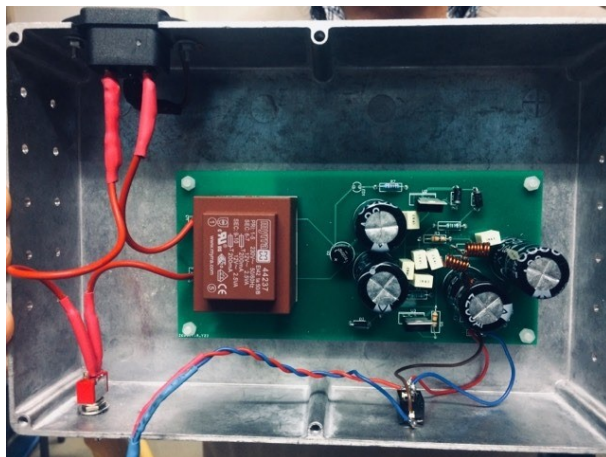


Figura 7.8: Fotografia da fonte de alimentação após ter sido montada numa caixa de alumínio.

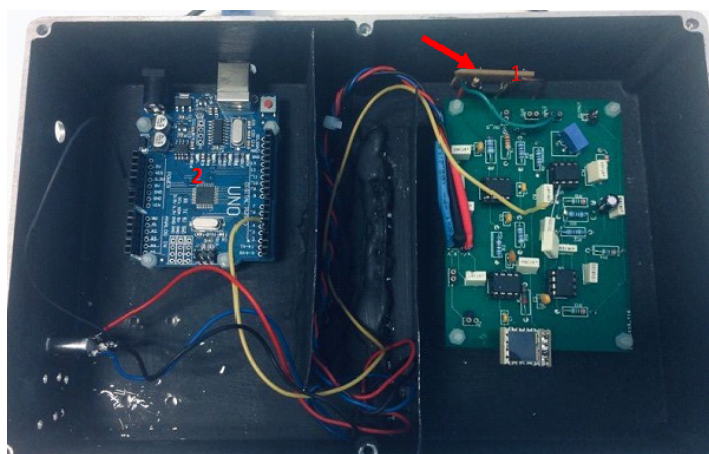


Figura 7.9: Caixa metálica contendo o circuito eletrónico (1) e o Arduino (2).

função contar os pulsos lógicos à saída do timer. O Arduino é conectado a um computador para enviar e guardar os dados adquiridos.

Seguidamente efetuaram-se testes de aquisição com este protótipo colocando-o num ambiente rico em radão. Na figura 7.10 vemos duas caixas de acrílico que estão conectadas por intermédio de um tubo amarelo, que permite a difusão do ar. A caixa (1) que tem tijolos de chumbo à volta, contém, no seu interior, rochas com teores de urânio e constitui o gerador de radão. Em cima desta caixa encontra-se um Arduino Uno (2) ligado a um sensor BME280 que faz a monitorização da pressão, da temperatura e da humidade. A caixa (1) de acrílico que contém as rochas no seu interior, possui uma torneira que pode ser aberta e fechada, permitindo assim a comunicação do radão, por difusão, para uma outra caixa de testes (3), onde será feita a monitorização do radão e dos seus descendentes, por intermédio do protótipo. Por sua vez, a caixa de acrílico (3) também é conectada com uma nova caixa metálica (5) que contém um fotodíodo de Silício PIN S3590-09 da Hamamatsu, de alta resolução, para permitir a comparação dos valores de contagens adquiridos com os valores obtidos com o protótipo que está no interior da caixa de testes (4). Para medir a concentração de radão no ar, em alguns casos, utiliza-se o método de recolha eletrostática dos descendentes do ^{222}Rn , combinados com a medição de energia das partículas alfa dos descendentes dos núcleos que decaem. Esta medição de energia é realizada utilizando um fotodíodo PIN. Estudos similares mostram que 90% dos isótopos produzidos no decaimento radão são iões positivos. Por conseguinte, podem ser coletados num fotodíodo de silício PIN quando se aplica uma tensão negativa [Pro18a, Kot81]. Contudo para o presente protótipo, dado que utiliza uma tensão de polarização pequena, o efeito de coleção eletrostática é pequeno, como está demonstrado no artigo de Soraia et al. [Sor20].



Figura 7.10: Dispositivo experimental para testes do protótipo num ambiente rico em radão. (1) fonte de radão - caixa com rochas, (2) Arduino ligado ao sensor BME280, (3) caixa de acrílico contendo (4) protótipo, (5) detetor S3590-09, (6,8,9) fontes de alimentação, (9) Pré-amplificador.

O detetor S3590-09 da Hamamatsu tem a capacidade de medir a energia das partículas alfa que sobre ele incidem, permitindo, desta forma, escolher qual o nuclídeo descendente do radão que se pretende analisar. Na figura 7.11 está representado um espectro de energia

típico, obtido com este detetor. Neste espectro podem ser observados os picos (2 e 3) devidos ao decaimento do ^{218}Po e ^{214}Po cujos átomos aderiram à superfície do detetor. Na figura também é visível o pico 1 devido à contaminação do detetor por ^{210}Po resultante do decaimento do ^{210}Pb acumulado no detetor ao longo do seu período de operação. A região contínua do espectro, à esquerda do pico 1, é devida à deteção de partículas alfa resultantes do decaimento do ^{222}Rn , ^{218}Po e ^{214}Po aéreos (ie não estando junto à superfície do detetor) pelo que essas partículas alfa perdem energia ao atravessar a camada de ar até atingirem o detetor. Esse contínuo será objeto de estudo na simulação Monte Carlo apresentada na secção 7.5.

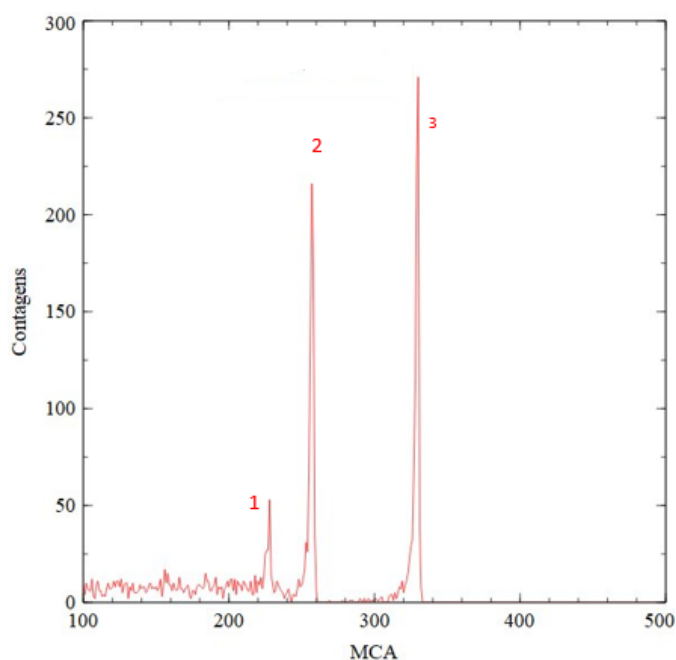


Figura 7.11: Espectro de energia de partículas alfa, obtido com o detetor S3590-09 da Hamamatsu. São observáveis 3 picos: (1) ^{210}Po – contaminação do detetor, (2) ^{218}Po , (3) ^{214}Po .

Ao contrário do detetor S3590-09, o protótipo desenvolvido, fornece apenas a indicação do número de toques no detetor, funcionando como um contador, cujos impulsos estão acima do limiar estabelecido no discriminador e que são adquiridos pelo Arduino. Esses dados são escritos num ficheiro guardado no computador com a ajuda do *software* Putty.

A aquisição de dados, dos dois detetores, foi realizada durante seis dias. No caso do detetor S3590-09 consideram-se apenas as contagens devidas ao pico de energia do ^{218}Po , por ser o descendente direto do radão. Na figura 7.12 apresenta-se o resultado das contagens de cada um dos detetores integradas durante um período de 1 hora, ao longo de vários dias. Embora a taxa de contagem seja diferente, de um detetor para o outro, pelo facto do detetor S3590-09 ser mais sensível a partícula alfa do que o do protótipo, verifica-se que existe uma semelhança de comportamento das duas curvas. A subida inicial das duas curvas deve-se à acumulação de radão na caixa de acrílico (e na caixa do detetor S3590-09).

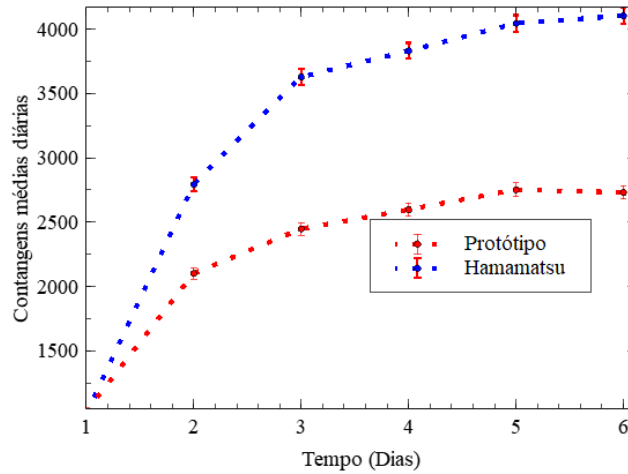


Figura 7.12: Contagens do protótipo e do detector S3590-09 da Hamamatsu, integradas durante uma hora em função da hora em que foi feita a aquisição.

O gráfico da figura 7.13 representa o número de contagens do protótipo em função das contagens do detector S3590-09 onde se pode verificar que existe uma clara correlação linear entre as duas ($R^2 = 0,996$). Dos pontos representados no gráfico da fig 7.13 Hamamatsu vs protótipo traçou-se uma reta de calibração. A partir desta reta pode-se prever as contagens do protótipo quando é conhecida a contagem do detector S3590-09 da Hamamatsu.

Fez-se também a estimativa da concentração de radão na caixa de acrílico, utilizando o método descrito por Soraia et al.[Sor20], que utiliza as contagens obtidas com um detector de NaI(Tl) colocado junto à caixa de acrílico. Nos testes realizados estimou-se uma concentração de radão dentro da caixa de acrílico da ordem de 10 a 100 kBq m⁻³, na região de patamar das contagens da figura 7.12. A monitorização da temperatura, pressão e humidade relativa (figura 7.14) teve início no dia 22 de janeiro de 2020 de forma contínua, até à data do fim dos testes do protótipo de monitorização do gás radão, proveniente da caixa contendo as rochas com teores de urânio. Nota-se uma monitorização mais longa em relação ao teste com o protótipo, pelo facto do Arduino estar a fazer há alguns dias, a monitorização da pressão, temperatura e a humidade, de várias experiências, incluindo o protótipo em estudo em ambiente laboratorial. Para o protótipo a monitorização foi feita a partir do 15º dia, verificaram-se flutuações dos parâmetros condicionados pelas influências sazonais que podem ter tido influência na estimativa da concentração de radão na caixa de testes [Bal20]. De salientar que os parâmetros não relacionam as contagens feitas pelos detetores mas sim podem influenciar a concentração de radão na caixa de testes.

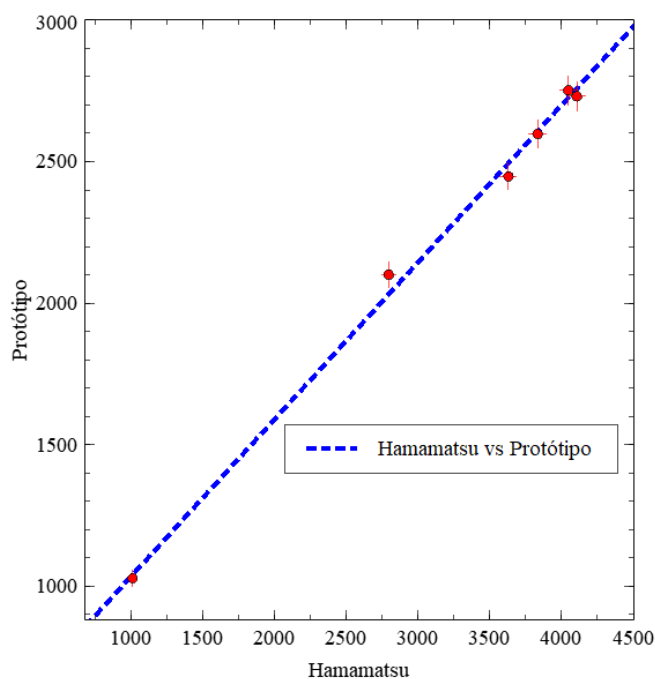


Figura 7.13: Contagens do protótipo versus contagens do detetor S3590-09 da Hamamatsu. Foi obtido um coeficiente $R^2 = 0,996$ para a correlação linear entre as duas variáveis.

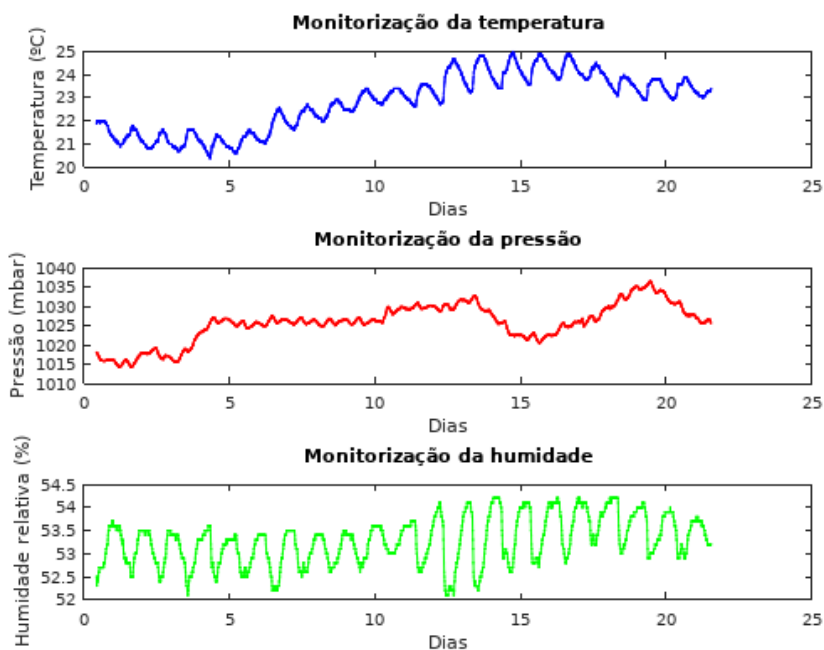


Figura 7.14: Monitorização da temperatura, pressão e Humidade relativa

7.5 Simulação Monte Carlo da deposição direta de partículas alfa no detetor

Os descendentes sólidos do radão, ^{218}Po e ^{214}Po , podem fixar-se na superfície do detetor de silício. Se ao decaírem, as partículas alfa resultantes, forem emitidas na direção do detetor, não têm de atravessar uma camada de ar, pelo que, toda a sua energia pode ser medida. Este não é, contudo, o caso das partículas alfa originadas no decaimento do ^{222}Rn , que em geral têm de atravessar uma certa camada de ar antes de chegarem ao detetor. Desta forma nem toda a sua energia é contabilizada no detetor, pelo que não dá origem a picos. Assim será de esperar que partículas alfa com esta origem deem uma contribuição para a zona de distribuição contínua no espectro de energia. Decidiu-se então investigar se o contínuo, à esquerda dos picos, observado no espectro de energia, apresentado na figura 7.11, pode ser explicado através da deteção de partículas alfa com origem no decaimento direto do ^{222}Rn . A interação da radiação com a matéria pode ser estudada utilizando o método de simulação Monte Carlo (MC), descrito como um método estatístico cuja característica principal é a utilização de técnicas de amostragem para se chegar à solução de um determinado problema físico.

Numa simulação MC deve ser fornecido um conjunto de dados de entrada (tipo de partícula, energia, posição, etc) e definida a geometria do dispositivo a simular. As partículas alfa são transportadas ao longo de pequenos passos, sendo a perda de energia para o meio em questão, determinada a partir do poder de paragem.

Neste trabalho foi utilizado o código AlfaMC [Per14] para simular a interação de partículas alfa, emitidas pelo radão, com um detetor. O AlfaMC é capaz de simular corpos geométricos complexos e fontes de partículas alfa distribuídas espacialmente. O programa possui ainda um sofisticado conjunto de rotinas de contabilização e histogramação dos resultados. Este programa usa exclusivamente o modelo CSDA (*Continuos Slowing Down Aproximation*), ou seja, as partículas perdem energia sempre de forma contínua e jamais de forma brusca (como é, por exemplo, o que acontece na emissão de raios delta). O AlfaMC usa as bases de dados ASTAR do NIST [Per14], onde estão disponíveis os poderes de paragem de partículas alfa em 74 materiais (26 elementos e 48 compostos e misturas).

O programa foi então usado para calcular qual a contribuição das partículas alfa, originadas no decaimento do ^{222}Rn , para o espectro alfa. Para tal considerou-se uma caixa de dimensões idênticas à caixa onde se encontra o detetor S3590-09 da Hamamatsu, preenchida com ar à pressão atmosférica. Um conjunto de emissores de partículas alfa com energia igual a 5590 keV (^{222}Rn) foi uniformemente distribuído dentro da caixa. As partículas alfa são emitidas isotropicamente. Na simulação, o detetor foi considerado como sendo um quadrado de silício de 10 mm de lado e 300 μm de espessura.

Na figura 7.15 é apresentado o espectro de energia simulado sobreposto (depois de devidamente normalizado) a um espectro alfa adquirido com o detetor S3590-09 numa atmosfera rica em radão. A característica mais relevante do espectro simulado é a sua forma contínua, com um limiar idêntico à energia das partículas alfa simuladas (5,59 MeV). A forma da curva reflete o facto de que, partículas alfa que tenham a sua origem mais

afastada do detetor, sejam detetadas com menor energia. A concordância obtida com os dados experimentais é bastante razoável (o declive médio das curvas é semelhante). Verifica-se, contudo, que a tendência de subida do número de contagens, para baixas energias, ocorre, nos dados experimentais, para energias da ordem de 1 MeV e para cerca de 0,5 MeV. Este efeito pode ser devido à deteção de eletrões (provenientes dos decaimentos do ^{214}Pb e ^{214}Bi) e que não foram incluídos nesta simulação. Nos dados observa-se também uma variação (decréscimo) de contagens por volta dos 4 MeV, variação esta que não se encontra na simulação. Uma possível explicação pode estar no facto de apenas se ter simulado partículas alfa originárias do decaimento do ^{222}Rn , não tendo incluído na simulação, a contribuição das partículas alfa originárias dos decaimentos do ^{218}Po e ^{214}Po existentes, em suspensão, nos aerossóis dentro da caixa.

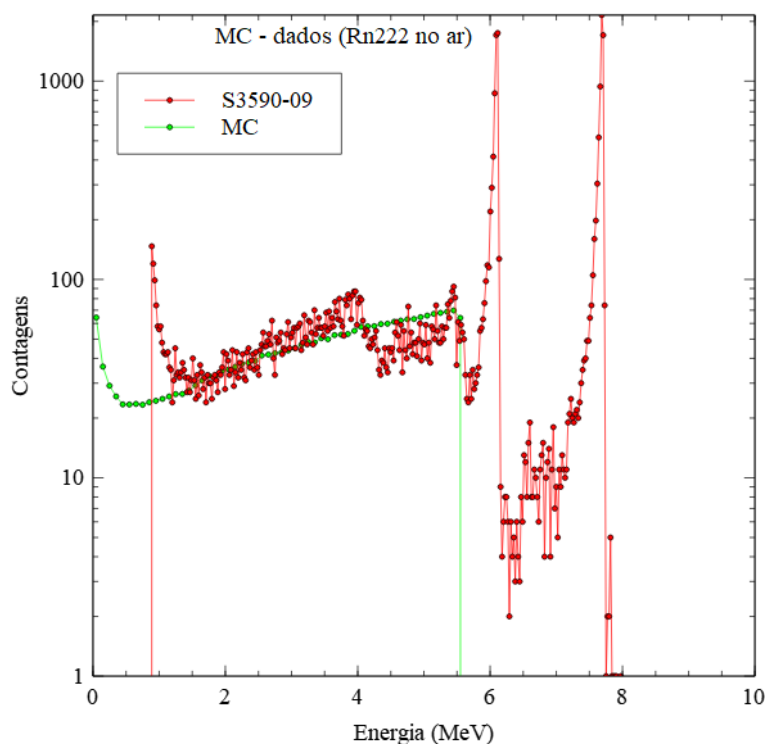


Figura 7.15: Espectro simulado da sobreposição da energia depositada num detetor Si-PIN, por partículas alfa de 5,59 MeV, emitidas por ^{222}Rn em ar, com os dados experimentais adquiridos com o detetor S3590-09.

Na figura 7.16 é apresentada a distribuição da distância que partículas alfa, de 5,59 MeV, percorrem em ar. Do gráfico concluímos que o alcance destas partículas em ar é aproximadamente de 4,2 cm, valor que se encontra em boa concordância com o valor de 4,3 cm tabelado no site do NIST.

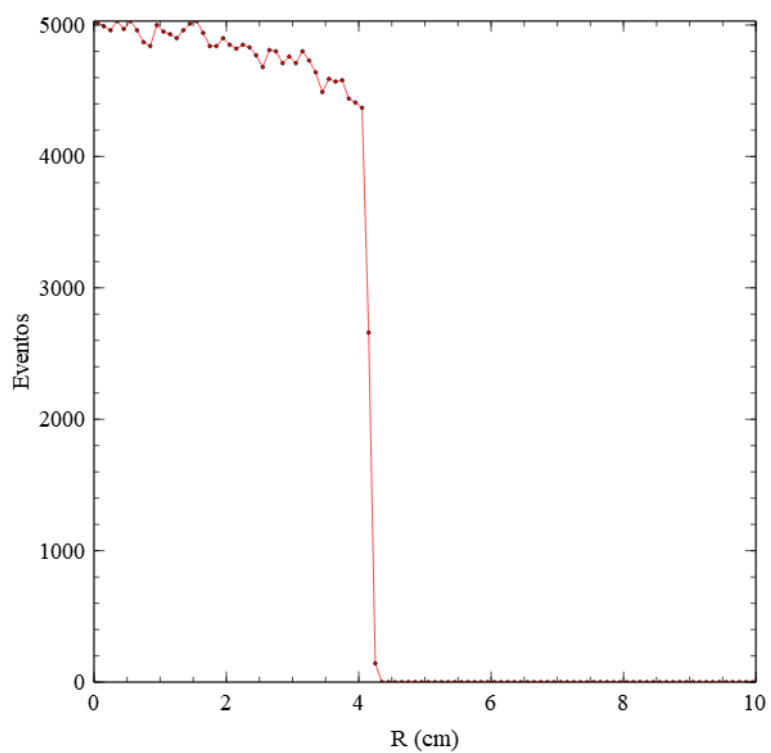


Figura 7.16: Distribuição da distância percorrida por partículas alfa de 5,59 MeV emitidas por ^{222}Rn em ar.

Capítulo 8

Estudo da exalação de radão por materiais de construção

A raça humana esteve sempre exposta a radiações ionizantes de origem natural, que podem ser encontradas nos solos, em algumas rochas e na água. A partir dos finais do século XIX, a chamada radiação artificial foi adicionada a esta radiação de fundo. Cerca de 80% da radiação de fundo provém de fontes naturais, nas quais podemos incluir os materiais radioativos naturais (NORM) presentes na crosta terrestre [Sha13, Viv17], em diferentes tipos de alimentos, bebidas e em alguns materiais de construção. Esta radiação deve-se, em grande parte, aos radionuclídeos primordiais da série radioativa natural de ^{232}Th e aos isótopos de urânio ^{238}U ; ^{235}U e aos seus descendentes. Uma contribuição considerável é também dada pelo radioisótopo ^{40}K .

Em termos de efeitos na saúde humana e ambientais, o radionuclídeo com maior interesse radiológico é o radão ^{222}Rn [Org09]. A concentração de radão pode atingir níveis elevados em habitações, dependendo não só da exalação do solo, mas também do material de construção utilizado como, por exemplo, o betão, os tijolos, o fosfogesso ou o granito [Sha16b]. Em geral, para melhorar a impermeabilidade ou o desempenho em interiores, nomeadamente o conforto e a desagregação da pedra natural, limitando a perda de partículas, alguns revestimentos são, normalmente, utilizados sobre pedra natural. Estes revestimentos podem também ser utilizados como forma de impermeabilização à exalação do radão.

Existem vários parâmetros para avaliar, de forma satisfatória, os níveis de radão transportado pelo ar, provenientes do solo da casa ou de materiais de construção. A taxa de exalação mássica de radão é um destes parâmetros, geralmente utilizado para avaliar o nível de radão interior libertado, quer de materiais de construção, quer de materiais ornamentais. A taxa de exalação mássica do radão, de materiais utilizados na construção, é calculada conhecendo o valor da concentração de radão. Por isso, pode afirmar-se que são usadas as técnicas habituais de medição da concentração de radão no ar utilizando detetores passivos ou detetores ativos.

Neste capítulo apresenta-se o trabalho de avaliação e comparação da taxa de exalação mássica de radão, de algumas amostras de granito utilizado em edifícios, recorrendo a dois métodos diferentes de medição da concentração de radão.

8.1 Métodos de medição das taxas de exalação mássica de radão

No interior dos edifícios as concentrações de radão podem variar com a temperatura, humidade, ventilação, materiais de construção e ainda com a tipologia da construção. A concentração de radão exalada pelos materiais de construção pode ser medida utilizando detetores passivos ou ativos. Neste trabalho, foram determinadas as taxas de exalação

mássica de radão para 12 amostras de granito (figura 8.1), com e sem revestimento usando uma técnica de medição passiva e uma técnica de medição ativa. O verniz, o hidrorrepelente e o silicone líquido, foram os revestimentos selecionados por serem os normalmente utilizados sobre pedra natural.



Figura 8.1: Exemplo das amostras de granito utilizadas no estudo.

8.1.1 Detetores de integração

As técnicas de medição realizadas utilizam o método *Closed-Can* [Sam90, Tufoo]. Neste método, a amostra a ser medida é colocada dentro de uma câmara selada com o objetivo de que todo o radão, exalado da amostra, permaneça dentro da câmara (assumindo que não haja fugas).

Se $N(t)$ for o número de átomos de radão dentro da caixa de volume V , num determinado instante t , a concentração de radão $c(t)$ é [And99, Abo14]:

$$c(t) = \frac{\lambda N(t)}{V} (\text{Bq m}^{-3}) \quad (8.1)$$

Onde $\lambda = 2,098 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ é a constante decaimento do radão. Considerando uma amostra de massa M , que exala radão a uma taxa cuja contribuição para a quantidade de concentração de radão na câmara é $E_R (\text{Bq kg}^{-1} \text{ s}^{-1}) \times M (\text{kg})$, a evolução temporal da concentração de radão no interior da câmara é dada por [UNSooa, Orgo9]:

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{E_R M}{V} - \lambda c(t) \quad (8.2)$$

Assumindo que não há atividade inicial na câmara, $c(0) = 0$, a solução da equação 8.2 é:

$$c(t) = \frac{E_R M}{V \lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (8.3)$$

Se o gás radão estiver uniformemente distribuído dentro da câmara, o número de traços por unidade de tempo, na superfície de um detetor, é proporcional à concentração de radão:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \varepsilon c(t) \quad (8.4)$$

onde $h(t)$ é o número de traços registados no instante t e ε é a eficiência total de deteção. Ao integrar esta equação ao longo de um tempo de exposição T , obtém-se o número total de toques no detetor:

$$h(T) = \frac{\varepsilon E_R M}{\lambda V} \left[T - \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda T}) \right] \quad (8.5)$$

O conjunto de grandezas que se encontram entre parênteses retos é frequentemente designado tempo de exposição efetivo, isto é:

$$T_{eff} = \left[T - \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda T}) \right] \quad (8.6)$$

Re-escrevendo a equação 8.5 em função de E_R e usando o valor T_{eff} obtém-se a seguinte equação:

$$E_R = \frac{\lambda V h(T)}{\varepsilon M T_{eff}} \quad (8.7)$$

A razão $h(T)/\varepsilon$ representa a concentração integrada de radão durante o tempo de exposição T e sendo $C_R = h(T)/\varepsilon T$ a concentração média de radão, obtida experimentalmente, a taxa de exalação mássica é então dada por:

$$E_R = \frac{\lambda V C_R T}{M T_{eff}} (\text{Bq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}) \quad (8.8)$$

Se a concentração de radão não for zero quando a câmara é fechada então deve ser adicionado um termo extra à equação 8.3, que descreva o decaimento do radão ambiental pré-existente na câmara.

$$C(t) = \frac{E_R M}{V \lambda} (1 - e^{-\lambda t}) + C_0 e^{-\lambda t} \quad (8.9)$$

onde C_0 é a concentração de radão existente no instante $t = 0$.

O número total de traços é então dado por:

$$h(T) = \frac{\varepsilon E_R M T_{eff}}{\lambda V} + \frac{\varepsilon C_0 (1 - e^{-\lambda T})}{\lambda} \quad (8.10)$$

Ou ainda, sabendo que $h(T) = \varepsilon C_R T$ e re-arranjando a equação 8.10:

$$E_R = \frac{\lambda V [C_R T - C_0/\lambda (1 - e^{-\lambda t})]}{M T_{eff}} \quad (8.11)$$

Estas câmaras de exalação não são completamente herméticas e, tendo em conta o que é afirmado por vários autores [Raj15, Saho7], a câmara pode vazar algum radão para fora. Este efeito tem de ser tido em consideração e, neste caso, é então necessário efetuar uma modificação na constante de decaimento λ [Saho7] incorporando um termo de fuga λ_{leak} de tal forma que:

$$\lambda = \lambda_{222Rn} + \lambda_{leak} \quad (8.12)$$

8.1.2 Avaliação de fugas na câmara

A fim de avaliar a fuga de radão, foi preparada uma câmara para medir a concentração de radão em tempo real.

Foram realizados dois ensaios. Um ensaio utilizando uma rocha de minério de urânio e um segundo ensaio colocando três das amostras analisadas na câmara. Em cada ensaio, o detetor ativo RadonEye [FTL20] foi introduzido no interior da câmara onde foram colocadas as fontes de radão. Foi tomado especial cuidado para evitar a fuga de radão através do orifício do cabo de alimentação do detetor, selando-o com adesivo UHU Patafix®. Permitiu-se, então, o aumento da concentração de radão na câmara por vários dias.

As curvas medidas (figura 8.2) foram ajustadas com a função: $C(t) = C_{max} (1 - e^{-\lambda t}) + C_0$. Os valores obtidos para a constante de decaimento total e para a constante de decaimento devido à fuga estão apresentados na tabela 8.1.

Tabela 8.1: Constante de decaimento total e para a constante de decaimento devido à fuga

$\lambda \text{ (h}^{-1}\text{)}$	$\lambda_{leak} \text{ (h}^{-1}\text{)}$
$0,0161 \pm 0,0002 \text{ } (\chi^2/V=0,72)$	$0,0085 \pm 0,0002$
$0,0120 \pm 0,0003 \text{ } (\chi^2/V=0,58)$	$0,0044 \pm 0,0003$

A partir destes resultados, conclui-se que as fugas dependem do gradiente da concentração de radão entre a câmara e o exterior, pelo que é expectável que a fuga seja menor para menores concentrações de radão.

O segundo ensaio foi realizado colocando três das amostras dentro da câmara, escolhendo-se, para limite superior desta análise, o valor $\lambda_{leak} = 0,0044 \pm 0,0003 \text{ h}^{-1}$, por ser o mais próximo do valor obtido em cada caso.

A existência de fugas tem ainda outro efeito secundário. Se for considerada uma câmara vazia, devido às trocas de radão com o exterior, a evolução da concentração do radão, no seu interior, não irá decrescer exponencialmente. Assim, sob o ponto de vista experimental é mais fácil obter a concentração de fundo integrada C_{BGD} e subtraí-la do valor obtido para

uma determinada amostra. Tendo isto em consideração, a equação 8.11 da taxa de exalação mássica de radão, pode ser escrita da seguinte forma:

$$E_R = \frac{\lambda V (C_R - C_{BGD}) T}{M T_{eff}} \quad (8.13)$$

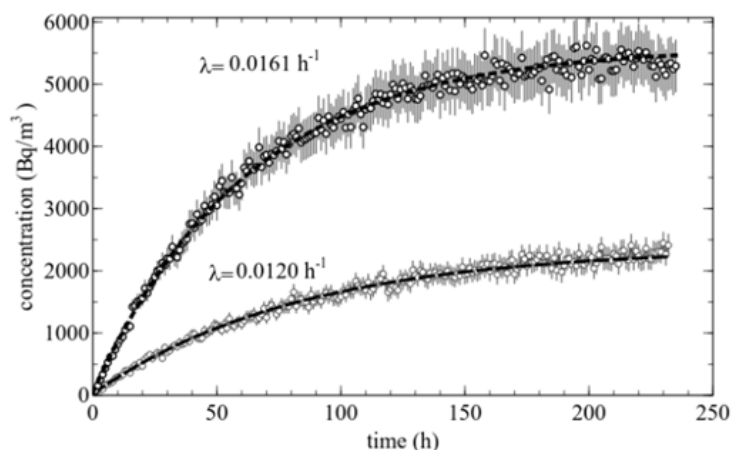


Figura 8.2: Acumulação de radão dentro da câmara durante dez dias para duas fontes de radão diferentes (uma rocha e três amostras). É obtida uma constante de fuga mais elevada para a fonte de maior taxa de exalação (rocha). As linhas tracejadas são ajustes aos dados. É apresentado no gráfico o valor da constante de decaimento ajustado.

8.1.3 Detetores diferenciais

Os detetores ativos têm a capacidade de fornecer valores de concentração de radão em tempo real, isto é, integrados em intervalos de tempo muito menores do que o tempo de meia-vida do radão. Daí que, a quantidade assim medida representa a concentração de radão dada pela equação 8.9, num instante t e considerando que λ é a constante de decaimento total incluindo as fugas. Resolvendo a equação para E_R e assumindo uma concentração de fundo C_{BGD} , no instante em que é feita a medição, para a câmara com fugas, para um tempo de aquisição $t=T$ obtém-se:

$$E_R = \frac{\lambda V (C_R(T) - C_{BGD})}{M (1 - e^{-\lambda T})} \quad (8.14)$$

8.1.4 Método de detecção passiva

Esta técnica consiste em colocar a amostra de granito dentro de uma câmara de acrílico juntamente com o detetor passivo. A câmara é então vedada e selada com silicone. Para medir a concentração de radão, foram utilizados os detetores plásticos CR-39. Como se pode ver na figura 8.3, cada câmara de difusão, contendo o detetor CR-39, foi fixada, com fita adesiva, no centro da tampa da câmara.

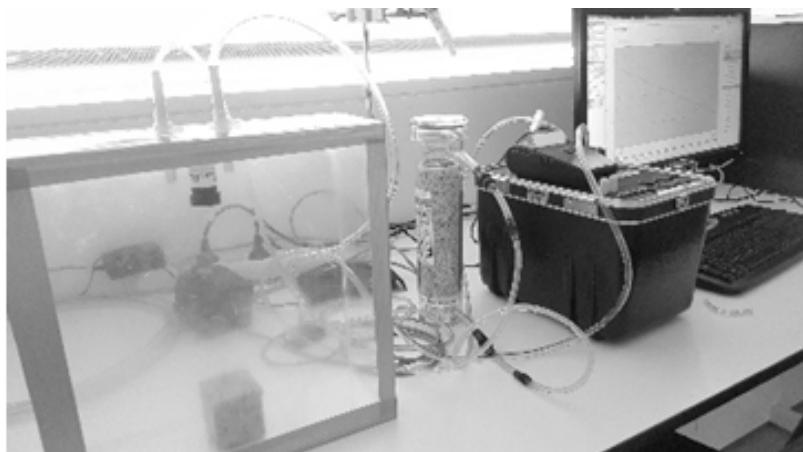


Figura 8.3: Técnica de *sealed-can* para medir o radão exalado de amostras de granito com um detetor CR-39.

Após um período de exposição de uma semana, os detetores CR-39 foram removidos da câmara e revelados numa solução de NaOH a 6,25 M. A solução química permite ampliar os traços deixados pelas partículas alfa nos detetores de forma a poderem ser visualizados e contados automaticamente. O sistema de contagem foi efetuado utilizando o Microscópio Radosys NanoReader.

A taxa de exalação mássica de radão, E_R , foi calculada usando a equação 8.13 depois de se ter determinado a concentração de radão dentro da câmara. Nesta equação, o volume, V , é a diferença entre o volume da câmara e o volume da amostra. É assumido que o radão também preenche a câmara de difusão do detetor CR-39. A avaliação do fundo, foi feita medindo a concentração de radão com a câmara vazia, mantendo o procedimento seguido no caso das amostras das pedras.

8.1.5 Método de deteção ativa

Neste método a concentração de radão foi medida com um detetor RAD7 [Dur20] já descrito no capítulo 5. O sistema de deteção deste dispositivo consiste num detetor alfa (um fotodíodo Si-PIN) que mede os sinais dos radionuclídeos resultantes do decaimento do radão, nomeadamente, os isótopos ^{218}Po e ^{214}Po . As taxas de exalação por unidade de massa, das amostras analisadas, foram medidas colocando-as numa câmara, ligada ao detetor RAD7 por dois tubos flexíveis de PVC, como se pode ver nas figuras 8.3 e 8.4.

Quer o volume da câmara, quer o tempo de exposição T , foram iguais aos do método passivo e a taxa de exalação mássica de radão calculada com a equação 8.14. A concentração de fundo foi obtida medindo a concentração de radão dentro da câmara vazia, logo que esta foi fechada e durante o mesmo tempo T utilizado para as medições com as amostras.

8.2 Resultados obtidos

As amostras de granito que foram analisadas foram cortadas em cubos de 5,0 cm de lado e possuíam uma massa média de 0,330 kg. Na tabela 8.2 estão indicadas as características destas amostras e os valores da concentração de radão no interior da câmara, após uma

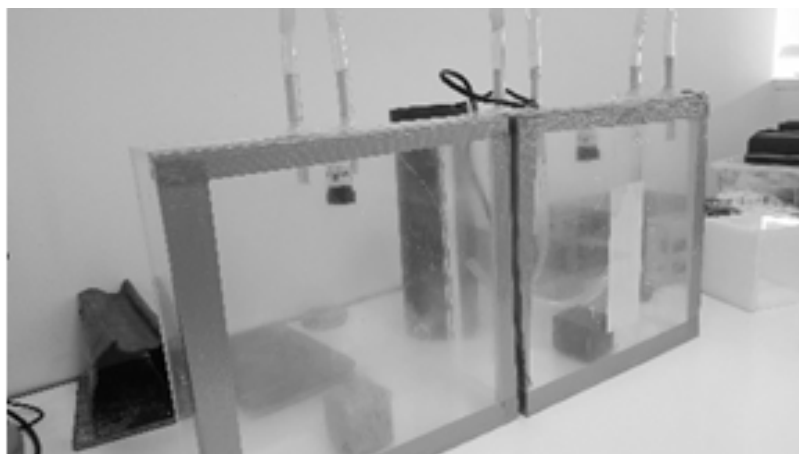


Figura 8.4: Detetor RAD7 usado para medir a concentração de radão das amostras de granito.

semana de exposição, obtidos com os dois métodos estudados, o passivo, com o detetor CR39 e o ativo, com o detetor RAD7.

Tabela 8.2: Concentração de radão medida para as amostras analisadas

Amostras	Revestimento	Método passivo Concentração (Bq/m ³)	Método activo Concentração (Bq/m ³)
1	Sem	85 ± 13	76 ± 11
2	Sem	33 ± 5	29 ± 4
3	Sem	25 ± 4	20 ± 3
4	Sem	30 ± 5	24 ± 4
5	Sem	32 ± 5	28 ± 4
6	Sem	61 ± 9	59 ± 9
7	Sem	48 ± 7	44 ± 7
8	Sem	40 ± 6	34 ± 5
9	Sem	50 ± 8	48 ± 7
10	Verniz	25 ± 4	21 ± 3
11	Silicone líquido	22 ± 3	21 ± 3
12	Hidrorepelente	23 ± 4	22 ± 3

A taxa de exalação mássica de radão foi calculada tendo em consideração cada um dos métodos, depois de se determinar a concentração de radão. Os valores obtidos estão representados no gráfico da figura 8.5. Estes resultados preliminares, mostram que a taxa de exalação mássica de radão, das amostras graníticas analisadas têm, em geral, valores relativamente baixos. De forma aleatória, foi escolhida a rocha S1 para se comparar a taxa de exalação mássica no caso da amostra não estar revestida, com a taxa de exalação mássica, da mesma amostra revestida com três revestimentos diferentes.

Dos resultados obtidos com o método passivo, o valor mais elevado foi de 44,5 mBq kg⁻¹ h⁻¹, para a amostra S1 não revestida e de 13,1, 11,1 e 11,5 mBq kg⁻¹ h⁻¹, respetivamente, quando esta é revestida com verniz, silicone líquido e hidrorepelente, observando-se um fator de 4 entre a taxa de exalação mais alta e a mais baixa. No caso do método ativo, o valor mais elevado encontrado foi de 26,2 mBq kg⁻¹ h⁻¹, para a amostra S1 sem revestimento e, para as amostras revestidas os valores de 7,3; 7,1 e 7,3 mBq kg⁻¹ h⁻¹, respetivamente, para verniz, silicone líquido e hidrorepelente.

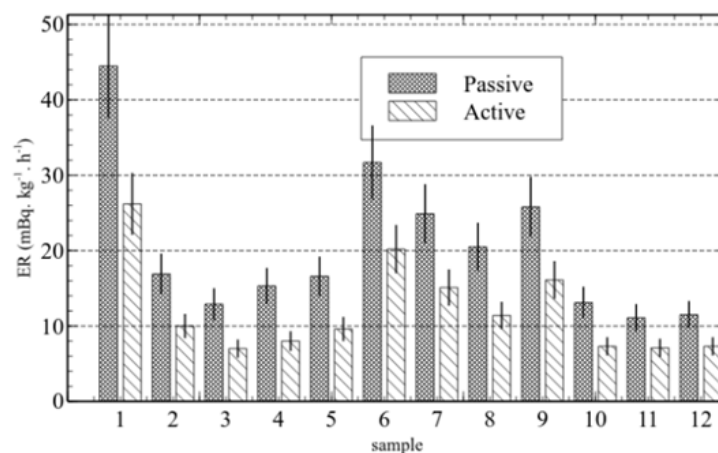


Figura 8.5: Comparação entre a taxa de exalação mássica de radão determinada pelos métodos passivo e ativo, para as 12 amostras de granito estudadas.

Os resultados obtidos mostram, sistematicamente, valores mais elevados para o método passivo, o que está de acordo com o descrito por outros autores [Raj15]. Podemos pensar que uma das possíveis causas pode ser a presença de gás torção, ^{220}Rn que, ao contrário do que acontece com os detetores ativos, neste tipo de detetor, não é separado do ^{222}Rn , resultando numa acumulação de valores. É evidente que as condições de medição são de extrema importância e devem ser melhoradas, nomeadamente o tipo de câmara utilizada, o seu isolamento e as suas dimensões físicas. Outro fator importante prende-se com o tempo de aquisição que, nesta experiência, foi apenas de uma semana, muito curto no caso dos detetores passivos, principalmente devido à sua baixa eficiência de deteção. É, portanto, fundamental estabelecer um tempo de aquisição mais longo, de forma a aumentar a significância estatística dos resultados. Outro aspeto importante que resultou da realização deste trabalho foi a preocupação com o efeito de fuga do radão. Pois, apesar de se ter tomado um cuidado considerável para evitar fugas, verificou-se que, ainda assim, uma fração considerável de radão escapava da câmara.

A nossa avaliação é que a conceção da câmara deve ser cuidadosamente revista. Os materiais usados devem ser testados mais minuciosamente, em particular qualquer material utilizado nas juntas. A medição da acumulação de concentração de radão no interior da câmara, utilizando um detetor ativo de aquisição em tempo real, é de suma importância para avaliar a fuga de radão da câmara. Ao fazer-se a medição com detetores passivos é também importante utilizar pelo menos dois detetores: um na parte inferior e outro na parte superior do contentor. Desta forma, qualquer eventual gradiente de concentração de radão pode ser avaliado e um valor médio é obtido. Finalmente, a amostra não deve estar em contacto com qualquer superfície do recipiente, mas sim suspensa. Desta forma, a exalação é equivalente de qualquer uma das faces da amostra. Mais amostras de diferentes materiais serão analisadas no futuro e a comparação entre os dois métodos feitos para outros materiais.

Conclusão

A distribuição espacial de radão, no Município do Lubango, é heterogénea, apresentando valores relativamente mais elevados na região noroeste em comparação com o observado na região sudeste. Verificou-se que, nesta região do território angolano, as concentrações de radão, medidas no inverno com detetores CR-39, se encontram entre 7 e 491 Bq m⁻³. A concentração média de gás radão, media na cidade do Lubango, foi de 108 Bq m⁻³, tendo-se verificado que mais de 26% das habitações apresentavam valores de concentração acima de 100 Bq m⁻³ [Orgo9]. Por outro lado, as concentrações médias de radão na Administração Comunal da Arimba e nas moradias familiares do bairro Helder Neto apresentaram valores mais elevados do que a média, (259 ± 9) e (159 ± 4), respetivamente. Tendo em conta que estes resultados estão um pouco acima do valor máximo recomendado pela OMS [Orgo9] e, não esquecendo os possíveis efeitos nocivos deste gás na saúde das populações, será necessário implementar medidas de divulgação adequadas, de forma a sensibilizar as pessoas em relação ao potencial risco de exposição ao radão, nas residências e nos edifícios públicos, para que possam ser adotadas medidas de melhoria, no que diz respeito à ventilação dos espaços fechados e à aplicação de sistemas de despressurização e filtração, em situações específicas.

Os valores encontrados estão em consonância com a geologia típica e predominante em Angola, em particular na cidade do Lubango, que é constituída por rochas da idade Paleoproterozóica, representadas por unidades vulcânicas e graníticas, umas localizadas na região norte do Lubango, na comuna do Hoque onde, em alguns casos típicos, a configuração ou modo destas rochas, traduz a predominância de chaminés vulcânicas. Essa estrutura geológica estende-se não só na região norte, mas também em quase todo o território do Lubango, inclusive em rios que atravessam a cidade. Apesar dos resultados não serem totalmente conclusivos, uma vez que, dada a extensão da cidade, o número de locais estudados representa apenas uma pequena amostragem, tratando-se de um primeiro estudo pode afirmar-se que este trabalho foi de extrema importância. Em trabalhos futuros, far-se-á, progressivamente, uma seleção maior de habitações e de edifícios públicos, com o objetivo de se avaliar, de forma mais abrangente, a potencial exposição ao radão, da população do município do Lubango.

No que concerne ao cálculo da dose anual efetiva, estimaram-se valores de (0,34 ± 0,01) a (7,48 ± 0,11) mSv. Estes resultados, que foram obtidos para a dose anual efetiva, são superiores aos valores, que se encontram descritos na bibliografia para alguns locais na Namíbia, país vizinho.

Tendo em conta a extensão territorial de Angola, o desenvolvimento e a reprodução de protótipos, permitirá a monitorização de gás radão em múltiplas regiões, principalmente para fins didáticos e pedagógicos. Baseado no protótipo desenvolvido no âmbito de uma tese de mestrado por Soraia Elisio [Sor20], construiu-se um detetor que permite fazer a monitorização de radão em tempo em real. Este protótipo é de baixo custo e não requer software e hardware onerosos.

O protótipo desenvolvido e reproduzido no presente trabalho, usa um fotodíodo de Silício da

série SLCD-61N5, sensível a radiação alfa. Comparam-se os dados de aquisição do protótipo com o fotodíodo SLCD-61N5, com os dados adquiridos com o fotodíodo PIN S3590-09 da Hamamatsu, de alta resolução. Verificou-se que o sensor da Hamamatsu teve a capacidade de medir a energia das partículas alfa, permitindo escolher o nuclídeo descendente do radão que se pretende analisar, enquanto o detetor SLCD-61N5 fornece apenas a indicação do número de toques no detetor. Neste caso o protótipo não discrimina a energia, dá apenas informação em relação ao número de partículas que chegam ao detetor. Comparou-se a taxa de aquisição obtida com os dois sensores e, pese embora a taxa de contagem seja diferente de um detetor para outro, existe uma clara correlação entre os dados adquiridos pelos dois fotodíodos.

Um dos aspetos que se considera relevante e que se prende com um estudo que se pretende explorar num futuro próximo, diz respeito à estimativa da exalação de radão de materiais radioativos de origem natural. Assim, ainda no desenvolvimento desta tese, para se avaliar a exalação mássica de radão, a partir de materiais graníticos, comumente utilizados na construção civil, foram selecionadas 12 amostras, cortadas em cubos, de 5 cm de lado e 0,330 kg massa. Destas 12 amostras, 9 correspondem a materiais graníticos de diferentes proveniências. Para a medição da concentração de radão usou-se o método de deteção passiva e o método de deteção ativa. Para o método passivo, o valor mais elevado, estimado para a exalação mássica de radão, foi encontrado para a amostra S1, $44,5 \text{ mBq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$. De forma a avaliar-se a capacidade impermeabilizadora ao radão estudaram-se três revestimentos diferentes, silicone líquido e hidropelente. Nesta situação, os valores da taxa de exalação mássica de radão, das amostras revestidas, foram, respetivamente, $13,1 \text{ mBq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$; $11,1 \text{ mBq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$; e $11,5 \text{ mBq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Em relação ao método ativo, o valor mais alto encontrado foi $26,2 \text{ mBq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Para as amostras revestidas foram obtidos valores de $7,3 \text{ mBq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$, $7,1 \text{ mBq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ e $7,3 \text{ mBq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$, respetivamente. Dos resultados obtidos pode concluir-se que a taxa de exalação mássica de radão, para as amostras revestidas, foi reduzida por um factor entre 3 e 4.

Ainda no que diz respeito à estimativa da taxa de exalação mássica de radão teve-se, ainda, em atenção a avaliação do efeito de fuga da câmara de exalação. Com base na constante de decaimento total do radão, foram obtidos os seguintes valores para a constante de fuga, correspondentes aos dois ensaios já descritos no capítulo 8: $\lambda_{leak} = 0,0085 \pm 0,0002 \text{ h}^{-1}$ e $\lambda_{leak} = 0,0044 \pm 0,0003 \text{ h}^{-1}$. Destes resultados conclui-se que as fugas têm uma dependência no gradiente de concentração de radão entre a câmara de exalação e o exterior.

Os resultados obtidos permitem-nos concluir que os valores mais elevados são observados com métodos de deteção passiva o que, segundo vários autores [Raj15], é devido à dificuldade de discriminação entre o radão e o torão, embora os detetores da Radosys utilizados são construídos de forma a minimizarem a entrada do gás torão. Por outro lado, o tempo de exposição foi relativamente curto, pelo que, em futuras experiências os detetores deverão ser expostos por um período de tempo relativamente superior. Em relação ao efeito de fuga, a câmara de exalação deve ser criteriosamente revista, em particular, no que se refere ao tipo e à qualidade isoladora do material utilizado como vedante. Ainda um ponto importante a referir é que, no caso do método passivo, é fundamental a colocação de pelo menos dois

detetores, um na base da câmara de exalação e outro no topo, garantindo, desta forma, que qualquer gradiente de concentração de radão possa ser avaliado.

Bibliografia

- [Abo14] Abo-Elmagd, M. *Radon exhalation rates corrected for leakage and back diffusion – Evaluation of radon chambers and radon sources with application to ceramic tile. J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, 7(4):390–398, 2014. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrras.2014.07.001>. 91
- [Ama17] Amaral, Acácio Manuel Raposo. *Electrónica Analógica ,Princípios, Análise e Projectos*, ISBN 9789726188773. 2017. 52, 53, 54, 56
- [Amg03] Amgarou, Khalil. *Long-term measurements of indoor Radon and its progeny in the presence of Thoron using nuclear track detectors a novel approach*. Universitat Autònoma de Barcelona, jan 2003. Available from: <http://www.tdx.cat/handle/10803/3339>. 44
- [And99] Claus E Andersen. *Radon-222 Exhalation from Danish Building Materials : H + H Industri A / S Results*, volume 1135. 1999. 91
- [APA20] APA. Agência portuguesa do ambiente, proteção radiológica e segurança nuclear, <https://apambiente.pt/index.php?ref=17&subref=1544&sub2ref=1548&sub3ref=1609>, 2020. xiii, xiv, 29, 33
- [ARS15] Robert Shannon Andrew W. Nelson, Eric S. Eitrheim, Andrew W. Knight, Dustin May, Marinea A. Mehrhoff, Robert Litman, 5 William C. Burnett, Tori Z. Forbes, and Michael K. Schultz. *Understanding the Radioactive Ingrowth and Decay of Naturally Occurring Radioactive Materials in the Environment: An Analysis of Produced Fluids from the Marcellus Shale*, <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/pdf/10.1289/ehp.1408855>. *Environ. Health Perspect.*, 123(7):689–696, 2015. xiii, 30
- [Ask19] Askari, Masoomah and Hassanvand, Mohammad Sadegh and Naddafi, Kazem and Zarei, Ahmad and Yousefi, Mahmood and Alimohammadi, Mahmood. *Assessment of indoor radon concentration in residential homes and public places in south of Tehran, Iran*, 2019. 64
- [Atto4] Frank Herbet Attix. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*, ISBN-13: 978-0-471-01 146-0, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim All. pages 160–164, 2004. xiii, 22, 23, 25, 26
- [Axe15] Axelsson, Gösta and Andersson, Eva M. and Barregard, Lars. *Lung cancer risk from radon exposure in dwellings in Sweden: how many cases can be prevented if radon levels are lowered?*, [10.1007/s10552-015-0531-6](https://doi.org/10.1007/s10552-015-0531-6). *Cancer Causes Control*, 26(4):541–547, 2015. 28
- [Bal20] Baltrenas, Pranas and Grubliauskas, Raimondas and Danila, Vaidotas. *Seasonal variation of indoor radon concentration levels in different premises of a university building. Sustain.*, 12(15), 2020. 85

- [Bap16] Baptista, Edson ; Pereira, Alcides ; Neves, L. Concentração do gás radão em águas subterrâneas da região do Lubango (Angola), <https://drive.google.com/file/d/0B1cx9Lc2SgvebUw3UGwxRUJyWlU/view>. 2016. 2
- [Bas16] Baskaran, Mark. *Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies*. 2016. 43, 44
- [Ber12] Beringer, J., Arguin J., Barnett R.M, Copic K., et al. *Review of particle physics*, pp.325, <https://journals.aps.org/prd/pdf/10.1103/PhysRevD.86.010001> . 86, 2012. 27
- [Boc89] Bochicchio, F.; Risica, S. *Active radon and radon daughter monitors*, https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:23049379 , 1989. 46
- [Boc14] Bochicchio, F. Protection from radon exposure at home and at work in the directive 2013/59/Euratom. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 160(1-3):8–13, 2014. 28, 38
- [Boo01] Booth, Bob and Mitchell, Andy. *Getting Started with ArcGIS, ESRI, USA*, volume 30. 2001. Available from: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en{%&}btnG=Search{%&}q=intitle:Getting+Started+with+ArcGIS.+GIS+by+ESRI{%#}0>. xiv, 73, 74, 75
- [Boyo8] Boylestad, Robert and Nashelsky, Louis. *Electronic Devices and Theory Circuit, Seventh Edition* , [https://doi.org/10.1016/S0026-2692\(98\)90008-8](https://doi.org/10.1016/S0026-2692(98)90008-8), 29(8):574, 2008. 53
- [Bre94] Brenner, D. J. *Protection against radon-222 at home and at work. ICRP publication 65. Int. J. Radiat. Biol.*, 66(4):413–413, 1994. 40, 70
- [Bus79] Busigin, Anthony and Van Der Vooren, Antoon W. and Phillips, Colin R. *Interpretation of the response of continuous radon monitors to transient radon concentrations*, DOI: 10.1097/00004032-197911000-00003, , 1979. 45
- [Car78] Cartwright, B. G. and Shirk, E. K. and Price, P. B. *A nuclear-track-recording polymer of unique sensitivity and resolution*, [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(78\)90989-8](https://doi.org/10.1016/0029-554X(78)90989-8). *Nucl. Instruments Methods*, 153(2-3):457–460, 1978. 50, 51
- [Cas78] Cassou, R. M E.V. Benton. *Proprieties and aplications of CR39 polymeric nuclear track detector -Nuclear tracks detection, Vol.2, pp.173-179*, [https://doi.org/10.1016/0145-224X\(78\)90021-2](https://doi.org/10.1016/0145-224X(78)90021-2). page 173, 1978. xiv, 50
- [Cem09] Cember, Herman and Johnson, Thomas. *Introduction to Health Physics*, volume 117. 2009. 15
- [CES05] CESO. Estudo Sobre as rochas Ornamentais em Angola, <https://www.ceso.pt/pdfs/RochasOrnamentaisAngola.pdf>. pages 1–130, 2005. 60

- [Che14] Chen, Xiannian ; Ye, Xinyue ; Carroll, Michael C. ; Li, Yingru. *Online flood information system: REST-based web service*, 2014. 73
- [Cho13] Choppin, Gregory and Liljenzin, Jan-Olov and Rydberg, Jan and Ekberg, Christian. Unstable Nuclei and Radioactive Decay. In *Radiochem. Nucl. Chem.*, pages 85–123. Elsevier, jan 2013. 9
- [Chro8] N. Chrisman. *Geoparsing. Encyclopedia of geographic information science/editor, Karen K. Kemp. The Kohala Center, Waimea, Hawai'i.* 2008. 73
- [Cla16] Claus Grupen, Mark Rodgers. *Radioactivity and radiation protection, Springer International Publishing Switzerland, pp.17.* 2016. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02683421>. 10
- [Col63] Collinson, A J L and Haque, A K M M. *A scintillation counter for the measurement of radon concentration in air, doi = 10.1088/0950-7671/40/11/304.* 40:521–523, 1963. 46
- [Cur48] Curran, S.C and Baker, W.R. *Photoelectric Alpha-Particle Detector, https://doi.org/10.1063/1.1741210.* (October 1947):1947–1949, 1948. 45
- [Dam52] Damon, Paul E. ; Hyde, Howard I. *Scintillation Tube for the Measurement of Radioactive Gases, https://doi.org/10.1063/1.1746163.* *Rev. Sci. Instrum.*, 23(12):766–766, 1952. 45
- [Dur84] Durrani, S. A. and Green, P. F. *The effect of etching conditions on the response of LR115, doi:10.1016/0735-245X(84)90048-6,* 1984. 50
- [Dur20] Durridge. *RAD 7 Electronic Radon Detector*, volume 37. 2020. Available from: <https://www.durridge.com/documentation/RAD7Manual.pdf>. xiv, 57, 58, 95
- [ECH59] ECH Silk, RS Barnes. *Examination of fission fragment tracks with an electron microscope, doi:10.1080/14786435908238273,* 1959. 48
- [Eff02] Eff-Darwich, A. and Martín-Luis, C. and Quesada, M. and de la Nuez, J. and Coello, J. Variations on the concentration of ²²²Rn in the subsurface of the volcanic island of Tenerife, Canary Islands. *Geophys. Res. Lett.*, 29(22):22–25, 2002. 58
- [Elí19] Soraia Elísio. *Development of an active detector for radon detection in air, http://hdl.handle.net/10451/39062.* 2019. 76, 79
- [Eng80] Enge, W. *Introduction to plastic nuclear track detectors, https://inis.iaea.org/search/search.aspx?origf_}q=RN:12625339,* 1980. 50
- [ESR18] ESRI. *A quick tour of ArcMap, https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/main/get-started/a-quick-tour-of-arcmap.htm,* 2018. xiv, 61, 72
- [ESR20a] ESRI. *ArcGIS Desktop, https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/,* 2020. xiv, 61, 72

- [ESR20b] ESRI. *Basemaps and Imagery ,Digital Map Solutions*,<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/location-services/services/basemaps>, 2020. xiv, 72
- [Eve10] Everlight. *4 PIN DIP PHOTOTRANSISTOR Phototransistor Photocoupler EL817-G Series*,<https://www.everlight.com/file/ProductFile/EL817-G.pdf>. pages 1–14, 2010. xiv, 79
- [Faro3] Farnell. www.farnell.com/datasheets/41164.pdf?_ga=2.110824972.84453419.1583569429-1059868306.1576676828, 2003. 81
- [Faz08] Fazal, Shahab. *GIS Basics (2008)*, New Age International Publishers, ISBN (13) : 978-81-224-2639-7. 2008. Available from: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title{#}0>. 74
- [Fero6] Ferreira, Miguel Jorge Monteiro de Magalhães. O radão nos Edifícios – minimização da perigosidade,<https://bdigital.ufp.pt/bitstream/10284/1885/1/70-91.pdf>. 2006. 34
- [Fle98] Fleischer, Robert L. *Tracks to Innovation Nuclear Tracks in Science and Technology*, Springer-Verlag New York, Inc, ISBN 9781461287759. 1998. 48, 49
- [Foo98] Foote, Kenneth E. and Kirvan, Anthony P. *WebGIS*; http://ncgia.ucsb.edu/units/u133/u133_f.html, 1998. 73
- [Fra71] Francisco Sousa do Vale, Margarida Cardoso Simões. Carta Geológica: folha nº 336 - Sá da Bandeira - 1:100.000,<http://memoria-africa.ua.pt/Catalog/ShowRecord.aspx?MFN=12080>, 1971. Available from: <http://memoria-africa.ua.pt/Catalog/ShowRecord.aspx?MFN=341778%5Cnhttp://memoria-africa.ua.pt/Catalog/ShowRecord.aspx?MFN=29068>. 62, 63
- [Fra10] Franklin, Kirsten and Muir, Paul and Scott, Terry and Wilcocks, Lara and Yates, Paul. *Introduction to Biological Physics and Physics for the Life Sciences*. Number 1. 2010. 15
- [Fri10] Friske, P.W.B.and Ford, K.L.and Kettles, I.M. and McCurdy, M.W. and McNeil, R.J. and Harvey, B.A. *North American Soil Geochemical Landscapes Project:Canadian Field Protocols For Collecting Mineral Soils And Measuring Soil Gas Radon And Natural Radioactivity*,pp.81, http://ftp.geogratis.gc.ca/pub/nrcan_rncan/publications/ess_sst/261/261633/of_6282.pd. Elements, page 175 p., 2010. xiv, 34
- [FTL20] Radon FTLab. *RadonEye Plus2 (BLE & Wi-Fi)*, <http://radonftlab.com/radon-sensor-product/radon-detector/new-rd200p-radon-detector/>, 2020. 93

- [Galo6] Galati, Stephen R. *Geographic Information Systems Demystified*, Artech House, Inc. 685 Canton Street. Norwood, MA 02062. Boston, London. 2006. 73, 74
- [Geb07] Gebeshuber, Ille C. *The origin of the elements*, www.ille.com – Vienna, pp.96. (March), 2007. 31
- [Ger91] Gerald, R.Lynch ; Dahl, Orin I. *Approximations to multiple Coulomb scattering, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, doi: 10.1016/0168-583X(91)95671-Y, 1991. 27
- [GMD08] Simon Gray, Alastair ; Read, Paul McGale, and Sarah Darby. *Lung cancer deaths from indoor radon and the cost effectiveness and potential of policies to reduce them*, DOI: 10.1136/bmj.a3110, 2008. xiv, 33
- [Goo08] Goodchild, F.M. *Geographic Information Systems (GIS). Encyclopedia of geographic information science/editor, Karen K. Kemp, pp.190-193. The Kohala Center, Waimea, Hawai'i.* 2008. 73
- [Gor19] Gordana Pantelić ; Igor Čeliković and Miloš Živanović and Ivana Vukanac ; Jelena Krneta Nikolić ; Giorgia Cinelli ; Valeria Gruber. "Qualitative overview of indoor radon surveys in Europe". *Journal of Environmental Radioactivity*, 204:163 – 174, 2019. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X19302759>. 42
- [Grd19] Grdina, David J. Ionizing Radiation. (February 2017), 2019. 4, 5
- [Gri08] Griffin, R H and Le, H and Jack, D T and Kochermin, A and Tarr, N G. Radon Monitor using Custom α -detecting MOS IC. pages 906–909, 2008. 59
- [Gri16] Griffiths, Alan D. and Chambers, Scott D. and Williams, Alastair G. and Werczynski, Sylvester. Increasing the accuracy and temporal resolution of two-filter radon-222 measurements by correcting for the instrument response. *Atmos. Meas. Tech.*, 9(6):2689–2707, jun 2016. Available from: <https://amt.copernicus.org/articles/9/2689/2016/>. 47
- [Gro11] Grossi, C. and Vargas, A. and Camacho, A. and López-Coto, I. and Bolívar, J. P. and Xia, Yu and Conen, F. Inter-comparison of different direct and indirect methods to determine radon flux from soil. *Radiat. Meas.*, 46(1):112–118, jan 2011. 47
- [Gui18] Guimarães, Diana and Monteiro, Catarina and Peralta, Luis and Barbosa, Susana. Performance comparison between scintillating polymer optical fibers and a Si-Pin detector for radon monitoring. Technical report, 2018. 59
- [HAR51] HARLEY, J. H. and JETTER, E. and EISENBUD, M. *A method of obtaining reproducible breath radon samples*, 1951. 44
- [Has96] Hasan, Fakhri. *Indoor Radon Concentration Measurements At Hebron University Campus :A Case Study Fakhri L Hasan.* 4(10), 1996. 64

- [Hig73] Higberg, S A Christer and Gustavsson, John E. *An Ionization Chamber for ^{222}Rn Measurements*, [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(73\)90752-0](https://doi.org/10.1016/0029-554X(73)90752-0). *Nucl. instruments methods*, 3:583–588, 1973. 44
- [Hun19] Huntley, Brian J. and Ferrand, Nuno. *Angolan biodiversity: Towards a modern synthesis*, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-03083-4>. 2019. 60
- [Hus08] Hussein, A.S. *Radon in Environment: Friend or Foe? Proceedings of the 3rd Environmental Physics Conference, 19-23 Feb, Aswan, Egypt. Physics (College. Park. Md).*, pages 43–52, 2008. 1
- [ICR71] ICRU. *International Commission on Radiation Units and Measurement, Report 19, Washington, U.S.A.*, 1971. 4, 15
- [ICR90] ICRP International Commission on Radiological Protection. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Pergamon Press. Ann. ICRP*, 1990. xvii, 14
- [ICR93] ICRP International Commission on Radiological Protection. *Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP, Publication 65, Pergamon. Ann. ICRP*, 1993. xvii, 14
- [ICR94] ICRP. “Protection against radon-222 at home and at work”, ICRP Report 65, Pergamon Press, Oxford, UK. *Annals of the ICRP*, 6(1):1, 1994. xvii, 43
- [ICR07a] ICRP International Commission on Radiological Protection. *Annals of the ICRP, Publication 103, Elsevier, pp.272*. 2007. xvii, 13, 14
- [ICR07b] ICRP International Commission on Radiological Protection. *Annals of the ICRP, Publication 103, Elsevier, pp275-290*. 2007. xvii, 14
- [I.E07] I.E.A. *International Atomic Energy Agency, Dosimetry in Diagnostic Radiology : An International Code of Practice, Technical Reports Series n^o457, Vienna, pp.20*. 2007. 11, 12
- [Iid97] Iida, T. and Nurishi, R. and Okamoto, K. *Passive integrating ^{222}Rn and ^{220}Rn CUP monitors with CR-39 detectors*, [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(96\)00166-3](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(96)00166-3), 1997. 64
- [IKU73] S. Israelsson, E. Knudsen, and E. Ungethüm. *Simultaneous measurements of radon ($\text{Rn } 222$) and thoron ($\text{Rn } 220$) in the atmospheric surface layer*, <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3402/tellusa.v25i3.9662>. *Tellus*, 25(3):281–290, 1973. 44
- [Ili90] Ilic, R. *Damage track detectors for alpha particle registration-track formation and detector processing*, https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q = RN : 23049380, 1990. 49, 50

- [ISO12] ISO. *International Standard 11665-4*, <https://www.iso.org/standard/76009.html>. 2012. 65
- [Jam07] James E. Turner. *Atoms, Radiation, and Radiation Protection, 2007*, volume 2. 2007. 21
- [Jr.86] Jr. M. Hans, Joseph ; Lyon J., Robert. *Seasonal variations of radon and radon decay product concentration in single family homes*, <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/91004KBY.PDF?Dockey=91004KBY.PDF>. *United States Environ. Prot. Agency*, 1986. 42
- [Kad20] Nada Farhan Kadhim. *Detection and Measurement of Radiation*, https://www.researchgate.net/publication/340771081_Radiation_Detectors.pages226-274, 2020. *xvii*, 41
- [Kalo5] Kalsi, P C and Ramaswami, A ; Manchanda, V K. *Solid State Nuclear Track Detectors and their applications*. 2005. 50
- [Ken13] Kennedy, Michael. *Introducing Geographic Information Systems with ArcGIS*, ISBN 978-1-118-15980-4. 2013. 66
- [Kes11] Keskin, Merve. *Comparison of interpolation methods for meteorological data*. (May), 2011. 66
- [Kes20] Kessongo, Joaquim and Bahu, Yoenls and Inácio, Margarida and Peralta, Luis and Soares, Sandra. *Radon concentration potential in Bibala municipality water: Consequences for public consumption*, 2020. 2
- [Kha13] Kharisov, Boris I. - *Main Ionizing Radiation Types and Their Interaction with Matter*. *Radiat. Synth. Mater. Compd.*, pages 20–47, 2013. 17, 18
- [Kha14] Gibbons P. John Khan M. Faiz. *The Physics of Radiation Therapy, 5^a Edition*, ISBN 978-1-4511-8245-3, pp.70. 2014. 15
- [Kiko01] Kiko, J. *Detector for 222Rn measurements in air at the 1 mBq/m³ level*. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 460(2-3):272–277, mar 2001. 58
- [Kimo08] Kimerling, A.J. *Cartography. Encyclopedia of geographic information science*/editor, Karen K. Kemp, pp.21-28. *The Kohala Center, Waimea, Hawai'i*. 2008. 73
- [Kim17] Kim, Jae-Hak and Yun, Sung-Ha and Kim, Gyu-Sik. *A study on a Wi-Fi system for radon monitoring*. *IJISSET-International J. Innov. Sci. Eng. Technol.*, 4(2):25–28, 2017. 5
- [Kno10] Knoll, Glenn F. *Radiation Detection and Measurement, Fourth Edition*, <http://dpnc.unige.ch/~bravar/LaboIII/Knoll.pdf>. 2010. 51

- [Koc18] Koc, P. and Ekinçi, N. and Cinan, E. and Kavaz, E. *Determination of Radon Concentration by Using CR-39 Plastic Track Detectors in Dwellings of Bingöl and Mus Provinces of Turkey. Asian J. Chem.*, 30(18):2424–2430, 2018. 64
- [Kot81] Y. S. Kotrappa, P.; Dua, S. K.; Gupta, P. C.; Mayya. *Electret - A New Tool for Measuring Concentrations of Radon*, 1981. 83
- [Kra87] Kenneth S. Krane. *Introductory Nuclear Physics, John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-85914-1, New York, pp.161-165.*, 1987. 7
- [Lau06] Laughlin, James Mc ; Bochicchio, Francesco. *In Focus: Radon and lung cancer.* pages 199–210, 2006. 28
- [LB04] Landolt-Bornstein. *Radiological Protection, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology New, Springer, New York, pp.106.* 2004. 13, 43
- [Lee05] Lee, Jai-ki. *Construction of an Environmental Radon Monitoring System Using Cr-39 Nuclear Track Detectors. Nucl. Eng. Technol.*, 37(4):395–400, 2005. 64
- [Lee20] Lee, Moo Hyun. *Radioassay and Purification for Experiments at Y2L and Yemilab in Korea.* 2020. 59
- [Len96] Lenzen, M. and Neugebauer, H. J. *A theoretical investigation in the Lucas cell, doi:10.1016/0168-9002(95)00681-8*, 1996. 46
- [Leo94] Leo William R. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Second Revised Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, ISBN 978-3-540-57280-0 ISBN 978-3-642-57920-2 (eBook), DOI 10.1007/978-3-642-57920-2.* 1994. 22, 24
- [Lero4] Leroy Claude , Pier-Giorgio Rancoita. *Principles of Radiation Interaction in Matter and detection, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapura, pp.563.* 2004. 10
- [L.G99] L.G.Heyde, Kris. *Basic ideas and concepts in nuclear physics, an introductory approach*, 1999. 9
- [Lido5] Lide, David R and Baysinger, Grace. *CRC Handbook of Chemistry and Physics, pp.4-25, https://ilib.eu/book/550307/8b32f1?regionChanged=&redirect=17561755.*, volume 127. 2005. 31
- [Lilo1] Lilley, John. *Nuclear Physics principles and applications*, 2001. 8
- [Lono8] Longley, P.A. *Geography Markup Language (GML). Encyclopedia of geographic information science/editor, Karen K. Kemp, pp.194. The Kohala Center, Waimea, Hawai'i.* 2008. 73

- [Lou12] Louro, Alina ; Ferreira, Luís ; Peralta, Luís ; Pereira, Alcides ; Soares, Sandra ; Cunha, Gilda. Artigo de Revisão / Review Article Exposição ao Radão Habitacional em Doentes Oncológicos do Foro Respiratório na Região da Guarda Exposure to Residential Radon in Oncological Patients of the Respiratory System in the Region of Guarda, *Acta Radiológica Por.* XXIV(95):63–68, 2012. 28
- [Lou13] Louro, Rosa A. . Da Temática do Radão na região da Guarda à construção de um modelo microdosimétrico-Caso particular do Acino pulmonar humano, pp.44, <https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/3684/1/Tese-Alina%20Louro.pdf>. *Univ. da Beira Inter. Covilhã*, (Março), 2013. 43, 44, 47, 48
- [Luc57] Lucas, H.L. *Improved Low Level Alpha Scintillation Counter for Radon*, <https://doi.org/10.1063/1.1715975>, 1957. 46
- [Mam10] Mamont-Cieśla, Kalina ; Stawarz, Olga ; Karpińska, Maria and Kapała, Jacek and Kozak, Krzysztof ; Grzadziel, Dominik ; Chałupnik, Stanisław ; Chmielewska, Izabela ; Olszewski, Jerzy and Przylibski, Tadeusz A. ; Zebrowski, Adam. *Intercomparison of radon CR-39 detector systems conducted in CLOR's calibration chamber. Nukleonika*, 55(4):589–593, 2010. 1
- [Mar02] Martin-Luis, C. and Quesada, M. L. and Eff-Darwich, A. and De La Nuez, J. and Coello, J. and Ahijado, A. and Casillas, R. and Soler, V. A new strategy to measure radon in an active volcanic island (Tenerife, Canary Islands). *Environ. Geol.*, 43(1-2):72–78, 2002. 58
- [Mar06] Martín-Martín, A. and Gutiérrez-Villanueva, J. L. and Muñoz, J. M. and García-Talavera, M. and Adamiec, G. and Íñiguez, M. P. Radon measurements with a PIN photodiode. *Appl. Radiat. Isot.*, 64(10-11):1287–1290, 2006. 58
- [Mas12] Mascarenhas, Adlete A A and Tilve, S G and Nadkarni, V S. *Designed Monomers and Polymers Designing novel polymers for solid-state nuclear track detection (SSNTD), I : novel homo- and co-polymers with allyl diglycol carbonate from N-allyloxycarbonyl diethanolamine- bis (allylcarbonate)*. 5551, 2012. 47
- [McC13] McCourt, S. and Armstrong, R. A. and Jelsma, H. and Mapeo, R. B.M. *New U-Pb SHRIMP ages from the Lubango region, SW Angola: Insights into the Palaeoproterozoic evolution of the Angolan Shield, southern Congo Craton, Africa*, <https://doi.org/10.1144/jgs2012-059>. *J. Geol. Soc. London.*, 170(2):353–363, 2013. xiv, 37, 63
- [Mey67] Meyerhof, Walter E. *Elements of Nuclear Physics*, 1967. 10
- [Mil87] Millman, Jacob ; Gabrel, Arvin. *Microelectronica*, ISBN 978-0070423305, 1987. 53

- [Mun18] Munyaradzi, Zivuku and Anna, Kgabi Nnenedi and Makondelele, Tshivhase Victor. *Excess lifetime cancer risk due to natural radioactivity in soils: Case of Karibib town in Namibia. African Rev. Phys.*, 13:71–78, 2018. 70
- [Nam15] Namvaran, Mojtaba and Negarestani, Ali. Noise Reduction in Radon Monitoring Data Using Kalman Filter and Application of Results in Earthquake Precursory Process Research. *Acta Geophys.*, 63(2):329–351, 2015. 59
- [NCR88] NCRP REPORT No. 97. *Measurements of radon and radon daughters in air, recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements, ISBN : ISBN 0-913392-97-9.* Number 15. 1988. 42, 45
- [Niko04] Nikezic, D ; Yu, K N. *Formation and growth of tracks in nuclear track materials.* 46:51–123, 2004. xiv, 49
- [Opt16] Optoelectronics. *SLCD-61N5 Solderable Planar Photodiode*, <http://www.farnell.com/datasheets/125183.pdf>. (805):4–5, 2016. xiv, 78
- [Org09] World Health Organization. *Who Handbook on Indoor radon , a public health perspective*, ISBN 978 92 4 154767 3. 2009. xvii, 28, 31, 35, 38, 47, 90, 91, 98
- [ORT15] ORTEC, AMETEK. *Preamplifier Introduction*, <https://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/other/preamplifier-introduction.pdf?la=en>. *Office*, pages 1–6, 2015. 78
- [Ott92] Otton, James K. *The Geology of radon.* 1992. 29
- [Pel21] Pelczar, K and Zuzel, G and Wójcik, M and Pocar, A and Ianni, An. An online radon monitor for low-background detector assembly facilities. *Eur. Phys. J. C*, 81:86, 2021. Available from: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-08793-z>. 59
- [Per10] Peralta, Luis. *Introdução aos métodos de simulação Monte Carlo no transporte de radiação.* 2010. 27
- [Per11] Pereira, E. and Tassinari, C. C.G. and Rodrigues, J. F. and Van-Dúnem, M. V. *New data on the deposition age of the volcano-sedimentary chela group and its eburnean basement: Implications to post-Eburnean crustal evolution of the SW of Angola. Comun. Geol.*, 98(1):29–40, 2011. xiv, 63
- [Per14] Peralta, Luis ; Louro, Alina. *AlfaMC: A fast alpha particle transport Monte Carlo code. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 737:163–169, 2014. 87
- [PKGR12] M. Pfützner, M. Karny, L. V. Grigorenko, and K. Riisager. Radioactive decays at limits of nuclear stability. *Rev. Mod. Phys.*, 84(2):567–619, 2012. 17
- [PRE15] Physics and Radio-Electronics. *Depletion region-Physics and Radio-Electronics* <https://www.physics-and-radio-electronics>.

com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/depletion-region.html, 2015. xiv, 55, 56

- [Pro18a] Pronost, G. and Ikeda, M. and Nakamura, T. and Sekiya, H. and Tasaka, S. Development of new radon monitoring systems in the Kamioka mine. *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 2018(9):1–21, 2018. 83
- [PRO18b] PROTECTION, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL and ICRP. Summary of ICRP Recommendations on Radon. *Int. Comm. Radiol. Prot. ICRP*, pages 3–8, 2018. 39, 67
- [Qui03] Quindos-Poncela, L. S. and Fernandez, P. L. and Sainz, C. and Arteché, J. and Arozamena, J. G. and George, A. C. An improved scintillation cell for radon measurements. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 512(3):606–609, oct 2003. 58
- [RAD13] RADOSYS. RADOSYS User Manual, <https://manualzz.com/doc/7321648/1-introduction-to-the-radosys-system>. 2013. 65
- [Raj15] Raj Menon, Sreeja ; Sahoo, B. K. and Balasundar, S. and Gaware, J. J. and Jose, M. T. and Venkatraman, B. and Mayya, Y. S. *A comparative study between the dynamic method and passive can technique of radon exhalation measurements from samples*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.02.004>, 2015. 93, 97, 99
- [Ran04] Rancoita, Claude Leroy. Pier-Giorgio. *Principles of Radiation Interaction in Matter and detection*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapura, pp.563. 2004. 18, 19, 21
- [Res14] Researchgate.net. *What is the deep difference between emanation and exhalation of radon*, https://www.researchgate.net/post/what_is_the_deep_difference_between_emanation_and_exhalation_of_radonn, 2014. xiv, 29, 30
- [Rob91] Roberto de Paulo, Sérgio. Dosimetria Ambiental de Rn-222 e filhos: medida da eficiência absoluta do CR-39 levando-se em conta os efeitos do Plate-Out e fatores ambientais, <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/278016>, 1991. 46, 48, 49, 50, 51
- [Sah07] Sahoo, B. K. and Nathwani, Dipen and Eappen, K. P. and Ramachandran, T. V. and Gaware, J. J. and Mayya, Y. S. *Estimation of radon emanation factor in Indian building materials*, <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.04.002>, 2007. 93
- [Sah14] Sahu, Patitapaban ; Panigrahi, Durga Charan ; Mishra, Devi Prasad. *SOURCES OF RADON AND ITS MEASUREMENT TECHNIQUES IN UNDERGROUND URANIUM MINES – AN OVERVIEW*, <http://dx.doi.org/10.7424/jsm140303>. *J. Sustain. Min.*, 13(3):11–18, 2014. 29

- [sak11] *A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash*, author=Sakoda, Akihiro and Ishimori, Yuu ; Yamaoka, Kiyonori. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(10):1422–1435, 2011. 29
- [Sal20a] Salupeto-Dembo, Judith ; Szabó-Krausz, Zsuzsanna ; Völgyesi, Péter ; Szabó, Csaba. *Radon and thoron radiation exposure of the Angolan population living in adobe houses*, <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07215-4>. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, (0123456789), 2020. 2, 69, 70
- [Sal20b] Salupeto-Dembo, Judith and Szabó-Krausz, Zsuzsanna and Völgyesi, Péter and Kis, Zoltán and Szabó, Csaba. External radiation exposure of the Angolan population living in adobe houses. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 323(1):353–364, 2020. Available from: <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06920-z>. 2
- [Sam90] Samuelsson, Christer. *The closed-can exhalation method for measuring radon*. *J Res Natl Inst Stand Technol.*, 1990. 91
- [San18] Sani, Junaidah Md ; Alias, Nuramirah and Ahmad, Nazree ; Saat, Ahmad. *The assessment of indoor Radon-222 concentration and emanation rate at Gua Penyau, Pahang*. *Malaysian J. Anal. Sci.*, 22(3):483–490, 2018. 64
- [Ser95] Series, National Low-Level Waste Management Program Radionuclide Report. Americium-241. (September), 1995. 81
- [Shao1] Shani Gad. *Radiation Dosimetry, Instrumentation and Methods, Second Edition*, CRC Press, pp.1-2. 2001. xiii, 11
- [Shao8] Shashi Shekhar, Hui Xiong. *Encyclopedia of GIS*, ISBN: 978-0-387-35973-1. 2008. Available from: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en{%&}btnG=Search{%&}q=intitle:No+Title{%#}0>. 66
- [Sha13] Shahbazi-Gahrouei, Daryoush and Setayandeh, Samaneh and Gholami, Mehrdad. *A review on natural background radiation*, <https://doi.org/10.4103/2277-9175.115821>. *Adv. Biomed. Res.*, 2(1):65, 2013. 90
- [Sha16a] Shakir, Anfal Ali and Kadhim, Inaam Hani and Almayyalin, Ali O Muhsen and Majeed, Fouad A. *Measurement of radon concentration in some of cosmetics by using Nuclear Track Detector (CR-39)*. *Int. J. PharmTech Res.*, 9(09):(231–235), 2016. 64
- [Sha16b] Sharma, Nisha ; Singh, Jaspal ; Esakki, S. Chinna ; Tripathi, R.M. *A study of the natural radioactivity and radon exhalation rate in some cements used in India and its radiological significance*, <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.09.001>, 2016. 90
- [SHE68] SHEPARD D. *Two- dimensional interpolation function for irregularly- spaced data*, DOI:10.1145/800186.810616. *Proc 23rd Nat Conf*, pages 517–524, 1968. 66

- [SHRD12] U.S. DEPARTMENT OF HEALTH Service, HUMAN SERVICES Public Health, Agency for Toxic Substances Registry, and Disease. Toxicological profile for radon, pp.109-110, <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp145.pdf>. 2012. xvii, 32
- [Sig06] Peter Sigmund. *Particle penetration and radiation effects, general aspects and stopping of swift point charges*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany. 2006. 26
- [SIL05] SILVA, ANTERO FERREIRA DA. A Geologia da República de Angola desde o Paleoarcaico ao Paleozóico Inferior, <http://repositorio.lneg.pt/handle/10400.9/2619>. *Repositório do LNEG /GEOCIÊNCIAS /Geologia e Cartogr. Geológica - GCG /GCG - Work. Pap.*, 2005. 63
- [Smi18] Smith, Michael .J. ; Michael, Goodchild ; Longley, A. Paul; Associates,. *Geospatial Analysis, A Comprehensive Guide to Principles Techniques and Software Tools. 6th edition*. 2018. 73, 74
- [Soa11] Soares, Paulo. Determinação da Concentração de Radão num Estabelecimento de Ensino Público, <https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/2849/1/>. *Univ. da Beira Inter. Covilhã*, (Outubro), 2011. 44
- [Som73] Somogyi, G. ; Szalay, S.A. Track-diameter kinetics in solid state nuclear track detectors, https://www.researchgate.net/publication/255417374_Track-diameter_kinetics_in_solid_state_nuclear_track_detectors. *Nucl. INSTRUMENTS METHODS*, (January 1972):211–232, 1973. 49
- [Sor20] Soraia, Elísio ; Peralta, Luís. *Development of a low-cost monitor for radon detection in air*, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1907/1907.08143.pdf>. 2020. 59, 77, 83, 85, 98
- [Spi05] Spieler, Helmuth. *Semiconductor Detection Systems*. page 506, 2005. xiv, 58, 59
- [Sto11] Stojanovska, Zdenka ; Januseski, Jovan ; Bossew, Peter ; Zunic, Zora S ; Tollefsen, Tore ; Ristova, Mimoza. *Seasonal indoor radon concentration in FYR of Macedonia. Radiat. Meas.*, 46(6):602–610, 2011. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135044871100148X>. 67
- [Tag01] Tagishi, Yoshihiro. Detection of alpha particles emitted from the daughter nuclei of radon, 2001. Available from: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_{ }q=RN:33045368. 59
- [Tak99] Takeuchi, Y. and Okumura, K. and Kajita, T. and Tasaka, S. and Hori, H. and Nemoto, M. and Okazawa, H. Development of high sensitivity radon detectors. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, 421(1-2):334–341, jan 1999. 58, 59

- [Tau13] Prinzio R. Antonieta Tauahata Luiz; Salati Ivan; Prinzio Di Renato. Radioproteção e Dosimetria : Fundamentos, 9^a Revisão, Rio de Janeiro, pp.103. *Ird/Cnen*, 2013. xiii, 25
- [Tex00] Texas Instruments. *LMx17HV High Voltage Three-Terminal Adjustable Regulator With Overload Protection*. 2000. Available from: <http://www.ti.com/product/lm317hv/>. 81
- [Tex13] Texas Instruments. *LM137 / LM337-N 3-Terminal Adjustable Negative Regulators*. (April):1–12, 2013. 81
- [Tipo8a] Tipler, Paul A. and Llewellyn, Ralph A. *Modern Physics, Fifth Edition*, ISBN-13: 978-0-7167-7550-8, ISBN-10:0-7167-7550-6, W. H. Freeman and Company, New York, pp.493. 2008. 6
- [Tipo8b] Tipler, Paul A. and Llewellyn, Ralph A. *Modern Physics, Fifth Edition*, ISBN-13: 978-0-7167-7550-8, ISBN-10:0-7167-7550-6, W. H. Freeman and Company, New York, pp.492. 2008. 6, 7
- [Tir10] Tirmarche, M. and Harrison, J. D. and Laurier, D. and Paquet, F. and Blanchardon, E. and Marsh, J. W. *Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon*, *Annals of the ICRP*, ICRP Publication 115, Elsevier, <http://dx.doi.org/10.1016/j.icrp.2011.08.011>. 2010. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.icrp.2011.08.011>. 28
- [Tobo4] Tobler, Waldo. On the First Law of Geography: A Reply. *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, 94(2):304–310, jun 2004. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1111/j.1467-8306.2004.09402009.x>. 66
- [Tom73] Tommasino, Luigi and Armellini, C. *A new etching technique for damage track detectors*, DOI: 10.1080/00337577308232292, 1973. 49
- [Tsc06] Tschiersch, Jochen and Haninger, Thomas. *Comments on “Adjusting Lung Cancer Risks for Temporal and Spatial Variations in Radon Concentrations in Dwellings in Gansu Province, China” by Lubin et al. (Radiat. Res. 163, 571–579, 2005)*. *Radiat. Res. Soc.*, 166(1):120–120, 2006. Available from: <http://www.bioone.org/doi/10.1667/RR3566.1>. 28
- [Tso95] Tsoulfanidis, Nicholas. *Measurement and Detection of radiation*. *Taylor Fr.*, (5):153, 1995. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0584854797833599>. 18
- [Tso08] Tsou, M.H. *Distributed GIS. Encyclopedia of geographic information science*/editor, Karen K. Kemp. *The Kohala Center, Waimea, Hawai’i*. 2008. 73
- [Tufo0] Tufail, M. and Mirza, Sikander M. and Mahmood, Arif and Qureshi, A. A. and Arfat, Yasir and Khan, H. A. Application of a “closed-can” technique for measuring

radon exhalation from mine samples of Punjab, Pakistan. *J. Environ. Radioact.*, 50(3):267–275, sep 2000. 91

- [Uni98] Washington United States National Academy of Sciences, National Research Council. National Academy Press. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR VI). *Health Effects of Exposure to Radon*, 1998. 39
- [Uni10] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). *2008 Report to the General Assembly: Annex B Exposures of the Public and Workers from Various Sources of Radiation*, url = http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_Annex_B.pdf, volume I. 2010. xiii, 29
- [UNS88] UNSCEAR. *United Nations Scientific Committee on the Effects of Ionising Radiation (UNSCEAR), Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly*. 1988. xvii, 39, 70
- [UNSooa] UNSCEAR. *2000-Sources and Effects of Ionizing Radiation: Volume I*, ISBN 92-1-142238-8, New York, volume I. 2000. Available from: http://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_{ }2000_{ }Report_{ }Vol.I.pdf. 28, 91
- [UNSoob] UNSCEAR. *SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, pp.107-108, ISBN 92-1-142238-8, volume I. 2000. 39, 67, 70
- [UNSooc] UNSCEAR. *SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, pp.103, isbn = 9789211422740, volume I. 2000. 29
- [URR36] URRY, W.D. *Determination of the Radium Content of Rocks*, <https://doi.org/10.1063/1.1749745>. *J.Chem.Phys.*, 4(1), 1936. 44
- [U.S92] U.S. Environmental Protection Agency Office of Air and Radiation Indoor Environments Division (6609J). *Radon-A Physician ' s Guide : The Health Threat With A Simple Solution*, <https://idph.iowa.gov/Portals/1/Files/Radon/A{ }20Physicians{ }20Guide{ }20to{ }20Radon.pdf>. 1992. 31
- [Van55] D H Van Dilla, M A ; Taysum. *Scintillation Counter for Assay of Radon Gas*, <https://www.semanticscholar.org/paper/SCINTILLATION-COUNTER-FOR-ASSAY-OF-RADON-GAS-Dilla-Taysum/4e21bcb6c0bb468230ca3c0da9c54cda42c1d16f>, 1955. 46
- [Vas13] Vasilescu, Angela. *CR-39 sampling of indoor radon in Southern Romania*. *Rom. Reports Phys.*, 58(SUPPL.):311–319, 2013. 64
- [Viv17] Vives i Batlle, Jordi and Ulanovsky, Alexander and Copplestone, David. *A method for assessing exposure of terrestrial wildlife to environmental radon (222Rn) and thoron (220Rn)*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.154>., 2017. 90

- [W.96] S. Whittlestone W. Zahorowski. A Fast Portable Emanometer for Field Measurement of Radon and Thoron Flux, 1996. 47
- [Wat69] Waters, J. R. and Howard, B. Y. *Calibration of instrument for measurement of radon concentrations in mine atmospheres*, <https://www.osti.gov/biblio/4816742>, 1969. 44
- [Wik20a] Wikipédia. Lista de softwares sig-wikipédia, a enciclopédia livre, https://pt.wikipedia.org/wiki/Lista_de_softwares_SIG, 2020. xiv, 60, 61, 75
- [Wik20b] Wikipedia.org. Radiação não ionizante – Wikipédia, a enciclopédia livre, 2020. 6
- [Wor10] World Health Organization. Indoor Radon a Public Health Perspective. *Int. J. Environ. Stud.*, 67(1):108, 2010. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207230903556771>. 38
- [Wrio8] Wrixon, A. D. New ICRP recommendations. *J. Radiol. Prot.*, 28(2):161–168, 2008. 38
- [Xia10] Xia, Y. and Sartorius, H. and Schlosser, C. and Stöhlker, U. and Conen, F. and Zahorowski, W. Comparison of one and two filter detectors for atmospheric ²²²Rn measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, 3(3):723–731, jun 2010. Available from: <https://amt.copernicus.org/articles/3/723/2010/>. 47
- [You58] Young, D. A. Etching of radiation damage in lithium fluoride, [doi:10.1038/182375a0](https://doi.org/10.1038/182375a0), 1958. 48
- [Zap16] Zappa, Cecilia ; Mousa, Shaker A. *Non-small cell lung cancer_ current treatment and future advances*, [doi: 10.21037/tlcr.2016.06.07](https://doi.org/10.21037/tlcr.2016.06.07), 2016. 31
- [Zen18] Zeng, Zhi and Cheng, J G and Li, Junli. *Measurements of Radon Concentrations Using CR - 39 Detectors in China JinPing Underground Laboratory (2015-2016).* 2018. 64

Apêndice A

Anexos

A.1 Características da tipologia dos edifícios

n	Tipologia do edifício	Piso	Tipologia de Divisão	Materiais de construção
1	MU1	Rés do chão	Quarto	Adobe
2	MU2	Rés do chão	Quarto	Adobe
3	MU3	Rés do chão	Sala	Adobe
4			Quarto 1	
5	MU4	Rés do chão	Quarto 2	Tijolo
6			Sala	
7			Escritório	
8	MU5	Rés do chão	Quarto	Tijolo
9	MU6	Rés do chão	Quarto	Tijolo
10	MU7	Rés do chão	Quarto	Tijolo
11	MU8	Rés do chão	Quarto	Adobe
12	MU9	Rés do chão	Quarto	Tijolo
13	MU10	Rés do chão	Quarto	Tijolo
14	MU11	Rés do chão	Quarto	Adobe
15	MU12	Rés do chão	Quarto	Tijolo
16	MU13	Rés do chão	Quarto	Tijolo
17	MU14	Rés do chão	Quarto	Tijolo
18	MU15	Rés do chão	Quarto	Adobe
19	MU16	3 andares	Quarto	Tijolo
20			Quarto	
21	MU17	1 andar	Quarto	Tijolo
22			Quarto	
23			Quarto	
24	MU18	1 andar	Sala	Adobe
25	MU19	Rés do chão	Quarto	Tijolo
26	MU20	1 andar	Quarto	Adobe
27	MU21	Rés do chão	Quarto	Adobe
28	MU22	Rés do chão	Quarto	Tijolo
29	MU23	Rés do chão	Quarto	Adobe
30	MU24	Rés do chão	Quarto	Adobe
31	MU25	Rés do chão	Quarto	Adobe

A.1 continuação

n	Tipologia do edifício	Pisos	Tipologia de Divisão	Materiais de construção
32	MU26	Rés do chão	Quarto	Adobe
33	MU27	Rés do chão	Quarto	Adobe
34	MU28	Rés do chão	Quarto	Adobe
35	MU29	Rés do chão	Quarto	Tijolo
36	MU30	Rés do chão	Sala	Tijolo
37			Quarto	
38	MU31	Rés do chão	Quarto	Tijolo
39	MU32	1 andar	Quarto	Adobe
40	MU33	Rés do chão	Quarto	Tijolo
41	MU34	Rés do chão	Sala	Adobe
42	MU35	Rés do Chão	Quarto	Adobe
43	MU36	Rés do chão	Quarto	Tijolo
44	MU37	Rés do Chão	Quarto	Adobe
45	MU38	Rés do Chão	Quarto	Adobe
46	MU39	Rés do Chão	Quarto	Adobe
47	MU40	Rés do Chão	Quarto	Adobe
48	MU41	1 andar	Sala	Tijolo
49			Quarto1	
50			Quarto2	
51			Quarto3	
52	MU42	Rés do chão	Sala	Tijolo
53	MU43	Rés do chão	Quarto1	Tijolo
54	MU44	Rés do chão	Quarto2	Tijolo
55	MU45	Rés do chão	Quarto	Tijolo
56	MU46	1 andar	Sala	Adobe
57	MU47	Rés do chão	Quarto	Adobe
58	MU48	Rés do Chão	Quarto	Adobe
59	MU49	1 andar	Sala	Tijolo
60	MU50	Rés do chão	Quarto	Tijolo
61	MU51	Rés do chão	Sala	Tijolo
62	MU52	Rés do chão	Quarto	Tijolo
63	MU53	Rés do chão	Quarto	Tijolo
64	MU54	Rés do chão	Sala	Tijolo
65	MU55	Rés do chão	Quarto	Tijolo
66	MU56	Rés do chão	Quarto	Adobe
67	MU57	Rés do chão	Quarto	Tijolo
68	MU58	Rés do chão	Sala	Adobe
69	EDPo1-Ademar Damião	1 andar	Escritório 1	Tijolo
70			Escritório 2	
71			Escritório 3	
72			Escritório 4	
73	EDPo2- AML	1 andar	Tesouraria	Tijolo
74			Recursos Humanos	
75			Secretaria Geral	
76			Secretaria do Chefe	

A.1 continuação

n	Tipologia do edifício	Pisos	Tipologia de Divisão	Materiais de construção
77			Cantina Escolar	
78	EDPo3-IMEL	2 andares	Gabinete Electrónico	Tijolo
79			Sala de Professores	
80			Secretaria Geral	
81	EDPo4-ISPH	1 andar	Sala de Professores	Tijolo
82			Secretaria Académica	
83			Gabinete da Directora	
84	EDPo5-EPL	1 andar	Secretaria Geral	Tijolo
85			Sala de Professores	
86			Biblioteca	
87			Secretaria Administrativa	
88	EDPo6-ESEC do Lubango	1 andar	Secretaria Pedagógica	Tijolo
89			Gabinete	
90			Sala de Professores	
91			TAC	
92	EDPo7-HCL	8 andares	Ecografia	Tijolo
93			Raios X	
94			Ressonância Magnética	
95			Gabinete	
96	EDPo8-14 de Abril	1 andar	Gabinete da Directora	Tijolo
97			Secretaria	
98			Sala de Professores	
99			Secretaria	
100	EDPo9-27 de Março	1 andar	Biblioteca	Tijolo
101			Sala de Professores	
102			Gabinete do Director	
103			Repografia 1	
104			Repografia 2	
105			Arquivo Morto 1	
106			Arquivo Morto 2	
107			Arquivo Morto 3	
108	EDP10-ISCED	2 andares	Arquivo Morto 4	Tijolo
109			Armazem do lar 1	
110			Armazem do lar 2	
111			Armazem do lar 3	
112			Armazem do lar 4	
113			Armazem do lar 5	
114			Secretaria Geral	
115			Sala de Espera	
116			Sala de reuniões 1	
117			Sala de reuniões 2	
118	EDP11-ACHO	Rés do chão	Sala do Chefe de Secretaria	Tijolo
119			Secretaria Geral	
120			Área Psicopedagógica	
121			Secretaria Geral	

A.1 continuação

n	Tipologia do edifício	Pisos	Tipologia de Divisão	Materiais de construção
122			Sala de Professores	
123			Gabinete do Director	
124			Secretaria Geral	
125			Corredor do Secretário	
126			Gabinete	
127			Casa de Banho	
128			Gabinete de Enfermaria	
129			Gabinete do Médico	
130			Laboratório 1	
131	EDP12-ACHLA	Rés do chão	Tratamento DDA	Tijolo
132			Puricultiura	
133			Laboratório 2	
134			Casa de Banho	
135			Sala de Professores	
136			Sala de Professores	
137			Sala de reuniões	
138			Sala de reuniões	
139			Sala de reuniões	
140			secretaria geral	
141	EDP13-ACA	Rés do chão	Gabinete do Chefe	Tijolo
142			Gabinete do Director	
143			Contabilidade	
144			Contabilidade	
145			Recursos Humanos	
146			Director Administrativo	
147	EDP14-Maternidade	Rés do chão	Armazem 1	Tijolo
148			Armazem 2	
149			Armazem 1	
150			Área Psicopedagógica	
151			Armazem 3	
152			Secretaria da Maternidade	
153			Secetaria Geral	
154			Sala de Professores	
155	EDP15-ESA	Rés do chão	Laboratório de Química	Tijolo
156			Laboratório de Informática	
157			Sala de Arquivos	
158			Ginásio da Escola	
159			Armazem 1	
160			Setor de óleo 1	
161	EDP16-Mapel	Rés do chão	Setor de óleo 2	Tijolo
162			Armazem 3	
163			Mapel Escritório	
164			Armazem 2	

A.2 Tratamento dos dados dos 75 edifícios

Tabela A.2: Tratamento dos dados dos 75 edifícios

TH	ID	Coloc	Reco	texp	n_g	\bar{n}_b	Área	T_D	T_{D0}	F_C	Exp	C_{Rn}
MU1	225314	3/6/17	1/9/17	2160	967	453	258,57	1,99	0,3	43,52	73,46	34,01
MU2	223353	3/6/17	1/9/17	2160	2396	453	258,57	7,51	0,3	43,52	313,98	145,36
MU3	223540	3/6/17	1/9/17	2160	1613	453	258,57	4,49	0,3	43,52	182,19	84,35
MU4	223443	4/6/17	2/9/17	2160	2264	453	258,57	7,00	0,3	43,52	291,76	135,07
	223415	4/6/17	2/9/17	2160	1576	453	258,57	4,34	0,3	43,52	175,96	81,46
	223439	4/6/17	2/9/17	2160	3742	453	258,57	12,72	0,3	43,52	540,53	250,24
	224709	4/6/17	2/9/17	2160	2797	453	258,57	9,07	0,3	43,52	381,47	176,61
MU5	225233	3/6/17	1/9/17	2160	1281	453	258,57	3,20	0,3	43,52	126,31	58,48
MU6	224025	3/6/17	1/9/17	2160	1241	453	258,57	3,05	0,3	43,52	119,57	55,36
MU7	225053	21/6/19	19/9/19	2160	3076	453	258,57	10,14	0,3	43,52	428,43	198,35
MU8	224005	3/6/17	1/9/17	2160	1044	453	258,57	2,29	0,3	43,52	86,42	40,01
MU9	225158	3/6/17	1/9/17	2160	1407	453	258,57	3,69	0,3	43,52	147,51	68,29
MU10	225011	3/6/17	1/9/17	2160	735	453	258,57	1,09	0,3	43,52	34,41	15,93
MU11	225204	3/6/17	1/9/17	2160	679	453	258,57	0,87	0,3	43,52	24,98	11,57
MU12	225005	3/6/17	1/9/17	2160	670	453	258,57	0,84	0,3	43,52	23,47	10,86
MU13	223929	3/6/17	1/9/17	2160	628	453	258,57	0,68	0,3	43,52	16,40	7,59
MU14	223343	3/6/17	1/9/17	2160	972	453	258,57	2,01	0,3	43,52	74,30	34,40
MU15	224039	3/6/17	1/9/17	2160	1265	453	258,57	3,14	0,3	43,52	123,61	57,23
MU16	224015	3/6/17	1/9/17	2160	1119	453	258,57	2,58	0,3	43,52	99,04	45,85
	224014	4/6/17	2/9/17	2160	951	453	258,57	1,93	0,3	43,52	70,76	32,76
	224714	4/6/17	2/9/17	2160	4933	453	258,57	17,33	0,3	43,52	740,99	343,05
	223864	4/6/17	2/9/17	2160	1035	453	258,57	2,25	0,3	43,52	84,90	39,31
MU17	223861	4/6/17	2/9/17	2160	1164	453	258,57	2,75	0,3	43,52	106,61	49,36
	223894	3/6/17	1/9/17	2160	953	453	258,57	1,93	0,3	43,52	71,10	32,92
MU18	223894	3/6/17	1/9/17	2160	953	453	258,57	1,93	0,3	43,52	71,10	32,92
MU19	223437	3/6/17	1/9/17	2160	1566	453	258,57	4,30	0,3	43,52	174,28	80,68
MU20	225408	3/6/17	1/9/17	2160	1466	453	258,57	3,92	0,3	43,52	157,44	72,89
MU21	223508	3/6/17	1/9/17	2160	1350	453	258,57	3,47	0,3	43,52	137,92	63,85
MU22	223923	3/6/17	1/9/17	2160	1322	453	258,57	3,36	0,3	43,52	133,21	61,67
MU23	224943	3/6/17	1/9/17	2160	1686	453	258,57	4,77	0,3	43,52	194,47	90,03
MU24	225208	3/6/17	1/9/17	2160	924	453	258,57	1,82	0,3	43,52	66,22	30,66
MU25	223879	3/6/17	1/9/17	2160	1513	453	258,57	4,10	0,3	43,52	165,36	76,55
MU26	223871	3/6/17	1/9/17	2160	1175	453	258,57	2,79	0,3	43,52	108,47	50,22
MU27	223593	3/6/17	1/9/17	2160	1009	453	258,57	2,15	0,3	43,52	80,53	37,28
MU28	225201	3/6/17	1/9/17	2160	1523	453	258,57	4,14	0,3	43,52	167,04	77,33
MU29	223924	3/6/17	1/9/17	2160	1689	453	258,57	4,78	0,3	43,52	194,98	90,27

AV. POTEN. EXPO. RAD. EDIF. MUN. LUBANGO

Tabela A.2: Tratamento dos dados dos 75 edifícios

TH	ID	Coloc	Reco	texp	n_g	\bar{n}_b	Área	T_D	T_{D0}	F_C	Exp	C_{Rn}
MU30	223403	4/6/17	2/9/17	2160	1722	453	258,57	4,91	0,3	43,52	200,53	92,84
	223558	4/6/17	2/9/17	2160	1081	453	258,57	2,43	0,3	43,52	92,64	42,89
MU31	225303	3/6/17	1/9/17	2160	1582	453	258,57	4,37	0,3	43,52	176,97	81,93
MU32	225299	3/6/17	1/9/17	2160	1277	453	258,57	3,19	0,3	43,52	125,63	58,16
MU33	223404	3/6/17	1/9/17	2160	2746	453	258,57	8,87	0,3	43,52	372,89	172,63
MU34	225125	3/6/17	1/9/17	2160	1869	453	258,57	5,48	0,3	43,52	225,28	104,29
MU35	223342	3/6/17	1/9/17	2160	1528	453	258,57	4,16	0,3	43,52	167,88	77,72
MU36	223332	3/6/17	1/9/17	2160	981	453	258,57	2,04	0,3	43,52	75,81	35,10
MU37	225228	3/6/17	1/9/17	2160	1280	453	258,57	3,20	0,3	43,52	126,14	58,40
MU38	225207	3/6/17	1/9/17	2160	1419	453	258,57	3,74	0,3	43,52	149,53	69,23
MU39	225223	3/6/17	1/9/17	2160	719	453	258,57	1,03	0,3	43,52	31,72	14,68
MU40	225334	3/6/17	1/9/17	2160	884	453	258,57	1,67	0,3	43,52	59,49	27,54
	224061	3/6/17	1/9/17	2160	2731	453	258,57	8,81	0,3	43,52	370,36	171,46
MU41	223858	3/6/17	1/9/17	2160	2994	453	258,57	9,83	0,3	43,52	414,63	191,96
	223890	3/6/17	1/9/17	2160	2255	453	258,57	6,97	0,3	43,52	290,24	134,37
	224899	3/6/17	1/9/17	2160	2327	453	258,57	7,25	0,3	43,52	302,36	139,98
MU42	225018	3/6/17	1/9/17	2160	1894	453	258,57	5,57	0,3	43,52	229,48	106,24
MU43	223569	3/6/17	1/9/17	2160	1648	453	258,57	4,62	0,3	43,52	188,08	87,07
MU44	224041	3/6/17	1/9/17	2160	1839	453	258,57	5,36	0,3	43,52	220,23	101,96
MU45	225139	3/6/17	1/9/17	2160	1821	453	258,57	5,29	0,3	43,52	217,20	100,55
MU46	225055	21/6/19	19/9/19	2160	1673	453	258,57	4,72	0,3	43,52	192,29	89,02
MU47	225305	3/6/17	1/9/17	2160	1227	453	258,57	2,99	0,3	43,52	117,22	54,27
MU48	223306	3/6/17	1/9/17	2160	1640	453	258,57	4,59	0,3	43,52	186,73	86,45
MU49	223910	3/6/17	1/9/17	2160	1422	453	258,57	3,75	0,3	43,52	150,04	69,46
MU50	224632	3/6/17	1/9/17	2160	1171	453	258,57	2,78	0,3	43,52	107,79	49,90
MU51	224051	3/6/17	1/9/17	2160	799	453	258,57	1,34	0,3	43,52	45,18	20,92
MU52	223851	3/6/17	1/9/17	2160	1971	453	258,57	5,87	0,3	43,52	242,44	112,24
MU53	225169	21/6/19	19/9/19	2160	1321	453	258,57	3,36	0,3	43,52	133,04	61,59
MU54	225326	3/6/17	1/9/17	2160	1349	453	258,57	3,47	0,3	43,52	137,75	63,77
MU55	225342	3/6/17	1/9/17	2160	3054	453	258,57	10,06	0,3	43,52	424,73	196,63
MU56	224924	3/6/17	1/9/17	2160	1490	453	258,57	4,01	0,3	43,52	161,48	74,76
MU57	225098	3/6/17	1/9/17	2160	725	453	258,57	1,05	0,3	43,52	32,73	15,15
MU58	223862	3/6/17	1/9/17	2160	2029	453	258,57	6,10	0,3	43,52	252,21	116,76
	225095	20/6/19	18/9/19	2160	615	453	258,57	0,63	0,3	43,52	14,21	6,58
EDP1	224729	20/6/19	18/9/19	2160	1533	453	258,57	4,18	0,3	43,52	168,72	78,11
	224760	20/6/20	18/9/20	2160	1381	453	258,57	3,59	0,3	43,52	143,14	66,27
	225268	8/6/17	6/9/17	2160	1059	453	258,57	2,34	0,3	43,52	88,94	41,18
EDP2	223416	5/6/17	3/9/17	2160	1654	453	258,57	4,64	0,3	43,52	189,09	87,54
	224090	5/6/17	3/9/17	2160	1214	453	258,57	2,94	0,3	43,52	115,03	53,25
	224640	5/6/17	3/9/17	2160	1877	453	258,57	5,51	0,3	43,52	226,62	104,92
	224740	5/6/17	3/9/17	2160	1668	453	258,57	4,70	0,3	43,52	191,44	88,63
EDP3	224034	5/6/17	3/9/17	2160	1267	453	258,57	3,15	0,3	43,52	123,95	57,38
	224778	5/6/17	3/9/17	2160	1174	453	258,57	2,79	0,3	43,52	108,30	50,14
	223859	5/6/17	3/9/17	2160	1233	453	258,57	3,02	0,3	43,52	118,23	54,74
	224087	5/6/17	3/9/17	2160	1274	453	258,57	3,18	0,3	43,52	125,13	57,93

Tabela A.2: Tratamento dos dados dos 75 edifícios

TH	ID	Coloc	Reco	texp	n_g	\bar{n}_b	Área	T_D	T_{D0}	F_C	Exp	C_{Rn}
EDP4	223299	3/6/17	1/9/17	2160	888	453	258,57	1,68	0,3	43,52	60,16	27,85
	224058	3/6/17	1/9/17	2160	820	453	258,57	1,42	0,3	43,52	48,71	22,55
	224002	5/6/17	3/9/17	2160	1671	453	258,57	4,71	0,3	43,52	191,95	88,87
EDP5	223337	5/6/17	3/9/17	2160	1017	453	258,57	2,18	0,3	43,52	81,87	37,90
	224776	5/6/17	3/9/17	2160	1196	453	258,57	2,87	0,3	43,52	112,00	51,85
	223334	5/6/17	3/9/17	2160	1385	453	258,57	3,60	0,3	43,52	143,81	66,58
	223860	8/6/17	6/9/17	2160	1552	453	258,57	4,25	0,3	43,52	171,92	79,59
EDP6	223315	8/6/17	6/9/17	2160	997	453	258,57	2,10	0,3	43,52	78,51	36,35
	223427	8/6/17	6/9/17	2160	1312	453	258,57	3,32	0,3	43,52	131,52	60,89
	223420	8/6/17	6/9/17	2160	804	453	258,57	1,36	0,3	43,52	46,02	21,31
	223582	8/6/17	6/9/17	2160	1675	453	258,57	4,73	0,3	43,52	192,62	89,18
EDP7	223887	8/6/17	6/9/17	2160	1464	453	258,57	3,91	0,3	43,52	157,11	72,74
	224067	8/6/17	6/9/17	2160	1830	453	258,57	5,33	0,3	43,52	218,71	101,26
	224954	21/6/19	19/09/19	2160	1031	453	258,57	2,24	0,3	43,52	84,23	38,99
EDP8	225135	7/6/17	5/9/17	2160	1585	453	258,57	4,38	0,3	43,52	177,47	82,16
	224020	7/6/17	5/9/17	2160	1508	453	258,57	4,08	0,3	43,52	164,51	76,16
	224761	7/6/17	5/9/17	2160	912	453	258,57	1,78	0,3	43,52	64,20	29,72
	224900	7/6/17	5/9/17	2160	1441	453	258,57	3,82	0,3	43,52	153,24	70,94
EDP9	223433	2/6/17	31/08/17	2160	1418	453	258,57	3,73	0,3	43,52	149,37	69,15
	223557	2/7/17	31/08/18	2160	1415	453	258,57	3,72	0,3	43,52	148,86	68,92
	223303	2/8/17	31/08/19	2160	1025	453	258,57	2,21	0,3	43,52	83,22	38,53
	223857	2/9/17	31/08/20	2160	2750	453	258,57	8,88	0,3	43,52	373,56	172,94
	225087	10/6/19	8/9/19	2160	727	453	258,57	1,06	0,3	43,52	33,06	15,31
EDP10	224765	10/6/19	8/9/19	2160	4015	453	258,57	13,78	0,3	43,52	586,47	271,52
	225184	10/6/19	8/9/19	2160	1280	453	258,57	3,20	0,3	43,52	126,14	58,40
	224981	10/6/19	8/9/19	2160	763	453	258,57	1,20	0,3	43,52	39,12	18,11
	224736	10/6/19	8/9/19	2160	1547	453	258,57	4,23	0,3	43,52	171,08	79,20
	224992	10/6/19	8/9/19	2160	994	453	258,57	2,09	0,3	43,52	78,00	36,11
	224775	10/6/19	8/9/19	2160	5010	453	258,57	17,62	0,3	43,52	753,95	349,05
	225173	10/6/19	8/9/19	2160	6834	453	258,57	24,68	0,3	43,52	1060,95	491,18
	225166	10/6/19	8/9/19	2160	5946	453	258,57	21,24	0,3	43,52	911,49	421,98
	225093	10/6/19	8/9/19	2160	5116	453	258,57	18,03	0,3	43,52	771,79	357,31
	224727	10/6/19	8/9/19	2160	4531	453	258,57	15,77	0,3	43,52	673,32	311,72
EDP11	224952	17/6/19	15/9/19	2160	1916	453	258,57	5,66	0,3	43,52	233,19	107,96
	225154	17/6/19	15/9/19	2160	2093	453	258,57	6,34	0,3	43,52	262,98	121,75
	225282	17/6/19	15/9/19	2160	1820	453	258,57	5,29	0,3	43,52	217,03	100,48
	224080	17/6/19	15/9/19	2160	3544	453	258,57	11,95	0,3	43,52	507,20	234,81
	224973	17/6/19	15/9/19	2160	3113	453	258,57	10,29	0,3	43,52	434,66	201,23
	225067	17/6/19	15/9/19	2160	899	453	258,57	1,72	0,3	43,52	62,01	28,71
	225355	17/6/19	15/9/19	2160	1943	453	258,57	5,76	0,3	43,52	237,73	110,06
	225191	17/6/19	15/9/19	2160	3248	453	258,57	10,81	0,3	43,52	457,38	211,75
	225284	17/6/19	15/9/19	2160	2517	453	258,57	7,98	0,3	43,52	334,34	154,79
	224705	17/6/19	15/9/19	2160	4188	453	258,57	14,45	0,3	43,52	615,59	285,00
	225079	18/6/19	16/9/19	2160	2088	453	258,57	6,32	0,3	43,52	262,14	121,36
	224971	18/6/19	16/9/19	2160	1615	453	258,57	4,49	0,3	43,52	182,52	84,50

AV. POTEN. EXPO. RAD. EDIF. MUN. LUBANGO

Tabela A.2: Tratamento dos dados dos 75 edifícios

TH	ID	Coloc	Reco	texp	n_g	\bar{n}_b	Área	T_D	T_{D0}	F_C	Exp	C_{Rn}
	225266	18/6/19	16/9/19	2160	3017	453	258,57	9,92	0,3	43,52	418,50	193,75
	225385	18/6/19	16/9/19	2160	3089	453	258,57	10,19	0,3	43,52	430,62	199,36
	224948	18/6/19	16/9/19	2160	4561	453	258,57	15,89	0,3	43,52	678,37	314,06
	224792	18/6/19	16/9/19	2160	1538	453	258,57	4,20	0,3	43,52	169,56	78,50
	224784	18/6/19	16/9/19	2160	2047	453	258,57	6,16	0,3	43,52	255,23	118,16
	224770	18/6/19	16/9/19	2160	1016	453	258,57	2,18	0,3	43,52	81,70	37,83
	225153	18/6/19	16/9/19	2160	2599	453	258,57	8,30	0,3	43,52	348,14	161,18
	224607	18/6/19	16/9/19	2160	2203	453	258,57	6,77	0,3	43,52	281,49	130,32
	224033	18/6/19	16/9/19	2160	1581	453	258,57	4,36	0,3	43,52	176,80	81,85
	224974	18/6/19	16/9/19	2160	3067	453	258,57	10,11	0,3	43,52	426,91	197,65
	225076	18/6/19	16/9/19	2160	1129	453	258,57	2,61	0,3	43,52	100,72	46,63
	225265	18/6/19	16/9/19	2160	2879	453	258,57	9,38	0,3	43,52	395,27	183,00
	225071	18/6/19	16/9/19	2160	2471	453	258,57	7,80	0,3	43,52	326,60	151,20
	224977	18/6/20	16/9/20	2160	5013	453	258,57	17,64	0,3	43,52	754,45	349,28
	224609	20/6/19	18/9/19	2160	5160	453	258,57	18,20	0,3	43,52	779,19	360,74
EDP13	224975	20/6/19	18/9/19	2160	4112	453	258,57	14,15	0,3	43,52	602,80	279,07
	224721	20/6/19	18/9/19	2160	2163	453	258,57	6,61	0,3	43,52	274,76	127,20
	224953	21/6/19	19/9/19	2160	3527	453	258,57	11,89	0,3	43,52	504,34	233,49
	225179	21/6/19	19/9/19	2160	2519	453	258,57	7,99	0,3	43,52	334,68	154,94
	225049	21/6/19	19/9/19	2160	1591	453	258,57	4,40	0,3	43,52	178,48	82,63
	225161	21/6/19	19/9/19	2160	3209	453	258,57	10,66	0,3	43,52	450,81	208,71
EDP14	224645	21/6/19	19/9/19	2160	4572	453	258,57	15,93	0,3	43,52	680,22	314,92
	225258	21/6/19	19/9/19	2160	1783	453	258,57	5,14	0,3	43,52	210,80	97,59
	225367	21/6/19	19/9/19	2160	2322	453	258,57	7,23	0,3	43,52	301,52	139,59
	225088	21/6/19	19/9/19	2160	2545	453	258,57	8,09	0,3	43,52	339,05	156,97
	224785	21/6/19	19/9/19	2160	2555	453	258,57	8,13	0,3	43,52	340,74	157,75
	224637	21/6/19	19/9/19	2160	2139	453	258,57	6,52	0,3	43,52	270,72	125,33
	225280	2/7/19	30/9/19	2160	2589	453	258,57	8,26	0,3	43,52	346,46	160,40
	225057	2/7/19	30/9/19	2160	1837	453	258,57	5,35	0,3	43,52	219,89	101,80
EDP15	225379	2/7/19	30/9/19	2160	709	453	258,57	0,99	0,3	43,52	30,03	13,90
	225375	2/7/19	30/9/19	2160	1120	453	258,57	2,58	0,3	43,52	99,21	45,93
	225257	2/7/19	30/9/19	2160	2922	453	258,57	9,55	0,3	43,52	402,51	186,35
	224757	2/7/19	30/9/19	2160	2113	453	258,57	6,42	0,3	43,52	266,34	123,31
	225084	21/6/19	19/9/19	2160	984	453	258,57	2,05	0,3	43,52	76,32	35,33
	225089	21/6/19	19/9/19	2160	954	453	258,57	1,94	0,3	43,52	71,27	32,99
EDP16	225185	21/6/19	19/9/19	2160	1684	453	258,57	4,76	0,3	43,52	194,14	89,88
	225256	21/6/19	19/9/19	2160	1261	453	258,57	3,12	0,3	43,52	122,94	56,92
	225176	21/6/19	19/9/19	2160	1256	453	258,57	3,11	0,3	43,52	122,10	56,53
	225075	21/6/19	19/9/19	2160	2028	453	258,57	6,09	0,3	43,52	252,04	116,68

A.3 Tabela de base de aplicação em SIG

n	Tipologia da Habitação	Local	Latitude	Longitude	C_{Rn}
1	MU1	Lage	-14,92	13,49	34,01
2	MU2	Sofrio	-14,94	13,5	145,36
3	MU3	Lage	-14,92	13,48	84,35
4		Mapunda	-14,92	13,45	135,07
5		Mapunda	-14,92	13,45	81,46
6	MU4	Mapunda	-14,92	13,45	250,24
7		Mapunda	-14,92	13,45	176,61
8	MU5	Lage	-14,92	13,48	58,48
9	MU6	Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,49	55,36
10	MU7	CDTE Cow Boy	-14,93	13,46	198,35
11	MU8	Arimba	-14,95	13,6	40,01
12	MU9	Minhota	-14,91	13,5	68,29
13	MU10	Lucrécia	-14,93	13,49	15,93
14	MU11	Lucrécia	-14,93	13,5	11,57
15	MU12	Lucrécia	-14,92	13,5	10,86
16	MU13	14 de Abril	-14,92	13,51	7,59
17	MU14	Laureanos	-14,92	13,5	34,4
18	MU15	14 de Abril	-14,92	13,51	57,23
19	MU16	14 de Abril	-14,92	13,5	45,85
20		CDTE Cow Boy	-14,93	13,46	32,76
21		CDTE Cow Boy	-14,93	13,46	343,05
22	MU17	CDTE Cow Boy	-14,93	13,46	39,31
23		CDTE Cow Boy	-14,93	13,46	49,36
24	MU18	Minhota	-14,91	13,5	32,92
25	MU19	Mapunda	-14,92	13,46	80,68
26	MU20	Mitcha	-14,91	13,5	72,89
27	MU21	Nambambi	-14,89	13,52	63,85
28	MU22	CDTE Nzagi	-14,93	13,48	61,67
29	MU23	Nambambi	-14,89	13,51	90,03
30	MU24	Nambambi	-14,89	13,51	30,66
31	MU25	Mitcha	-14,91	13,49	76,55
32	MU26	Mitcha	-14,89	13,5	50,22
33	MU27	Mitcha	-14,89	13,5	37,28
34	MU28	Mitcha	-14,89	13,49	77,33
35	MU29	Lalula	-14,91	13,51	90,27
36		Senhora do Monte	-14,93	13,47	92,84
37	MU30	Senhora do Monte	-14,93	13,47	42,89
38	MU31	Lalula	-14,91	13,51	81,93
39	MU32	João de Almeida	-14,91	13,51	58,16
40	MU33	Lalula	-14,91	13,52	172,63
41	MU34	João de Almeida	-14,9	13,5	104,29
42	MU35	Nambambi	-14,88	13,52	77,72
43	MU36	João de Almeida	-14,9	13,51	35,1
44	MU37	Cdte Nzagi	-14,93	13,47	58,4

A.3 continuação

n	Tipologia da Habitação	Local	Latitude	Longitude	C_{Rn}
45	MU38	Cdte Nzagi	-14,93	13,48	69,23
46	MU39	Cdte Nzagi	-14,94	13,49	14,68
47	MU40	Cdte Nzagi	-14,94	13,48	27,54
48		Helder Neto	-14,91	13,49	171,46
49		Helder Neto	-14,91	13,49	191,96
50	MU41	Helder Neto	-14,91	13,49	134,37
51		Helder Neto	-14,91	13,49	139,98
52	MU42	Senhora do Monte	-14,93	13,47	106,24
53	MU43	Senhora do Monte	-14,94	13,48	87,07
54	MU44	Senhora do Monte	-14,93	13,46	101,96
55	MU45	Benfica	-14,92	13,51	100,55
56	MU46	Benfica	-14,92	13,51	89,02
57	MU47	Benfica	-14,92	13,51	54,27
58	MU48	Benfica	-14,92	13,51	86,45
59	MU49	Benfica	-14,91	13,51	69,46
60	MU50	Tchioco	-14,93	13,55	49,9
61	MU51	Tchioco	-14,93	13,55	20,92
62	MU52	Tchioco	-14,93	13,55	112,24
63	MU53	Tchioco	-14,92	13,55	61,59
64	MU54	Arco íris	-14,92	13,48	63,77
65	MU55	CDTE Cowboy	-14,92	13,47	196,63
66	MU56	Ferrovias	-14,93	13,5	74,76
67	MU57	Ferrovias	-14,91	13,5	15,15
68	MU58	Mutundo	-14,87	13,58	116,76
69		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,49	6,58
70		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,49	78,11
71	EDPo1-Ademar Damião	Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,49	66,27
72		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,49	41,18
73		Comercial	-14,91	13,5	87,54
74		Comercial	-14,91	13,5	53,25
75	EDPo2- AML	Comercial	-14,91	13,5	104,92
76		Comercial	-14,91	13,5	88,63
77		Lucrécia	-14,93	13,49	57,38
78		Lucrécia	-14,93	13,49	50,14
79	EDPo3-IMEL	Lucrécia	-14,93	13,49	54,74
80		Lucrécia	-14,93	13,49	57,93
81		Arimba	-14,94	13,61	27,85
82	EDPo4-ISP	Arimba	-14,94	13,61	22,55
83		Senhora do Monte	-14,93	13,46	88,87
84		Senhora do Monte	-14,93	13,46	37,9
85	EDPo5-EPL	Senhora do Monte	-14,93	13,46	51,85
86		Senhora do Monte	-14,93	13,46	66,58
87		Senhora do Monte	-14,94	13,47	79,59
88		Senhora do Monte	-14,94	13,47	36,35
89	EDPo6-ESEC do Lubango	Senhora do Monte	-14,94	13,47	60,89

A.3 continuação

n	Tipologia da Habitação	Local	Latitude	Longitude	C_{Rn}
90		Senhora do Monte	-14,94	13,47	21,31
91		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,48	89,18
92	EDPo7-HCL	Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,48	72,74
93		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,48	101,26
94		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,48	38,99
95		Senhora do Monte	-14,94	13,47	82,16
96	EDPo8-14 de Abril	Senhora do Monte	-14,94	13,47	76,16
97		Senhora do Monte	-14,94	13,47	29,72
98		Senhora do Monte	-14,94	13,47	70,94
99		Lage	-14,93	13,48	69,15
100	EDPo9-27 de Março	Lage	-14,93	13,48	68,92
101		Lage	-14,93	13,48	38,53
102		Lage	-14,93	13,48	172,94
103		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,49	15,31
104		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,49	271,52
105		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,49	58,4
106		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,49	18,11
107		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,49	79,2
108	EDP10-ISCED	Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,49	36,11
109		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,49	349,05
110		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,49	491,18
111		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,49	421,98
112		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,49	357,31
113		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,49	311,72
114		Comuna do Hoque	-14,66	13,9	107,96
115		Comuna do Hoque	-14,66	13,9	121,75
116		Comuna do Hoque	-14,66	13,9	100,48
117		Comuna do Hoque	-14,66	13,9	234,81
118	EDP11-ACHO	Comuna do Hoque	-14,66	13,9	201,23
119		Comuna do Hoque	-14,66	13,9	28,71
120		Comuna do Hoque	-14,66	13,9	110,06
121		Comuna do Hoque	-14,66	13,9	211,75
122		Comuna do Hoque	-14,66	13,9	154,79
123		Comuna do Hoque	-14,66	13,9	285
124		Comuna da Huíla	-15,05	13,55	121,36
125		Comuna da Huíla	-15,05	13,55	84,5
126		Comuna da Huíla	-15,05	13,55	193,75
127		Comuna da Huíla	-15,05	13,55	199,36
128		Comuna da Huíla	-15,06	13,54	314,06
129		Comuna da Huíla	-15,06	13,54	78,5
130		Comuna da Huíla	-15,06	13,54	118,16
131	EDP12-ACHLA	Comuna da Huíla	-15,06	13,54	37,83
132		Comuna da Huíla	-15,06	13,54	161,18
133		Comuna da Huíla	-15,06	13,54	130,32
134		Comuna da Huíla	-15,05	13,54	81,85

A.3 continuação

n	Tipologia da Habitação	Local	Latitude	Longitude	C_{Rn}
135		Comuna da Huíla	-15,05	13,54	197,65
136		Comuna da Huíla	-15,05	13,54	46,63
137		Comuna da Huíla	-15,05	13,56	183
138		Comuna da Huíla	-15,05	13,54	151,2
139		Comuna da Huíla	-15,05	13,54	349,28
140		Comuna da Arimba	-14,95	13,59	360,74
141	EDP13-ACA	Comuna da Arimba	-14,95	13,59	279,07
142		Comuna da Arimba	-14,95	13,59	127,2
143		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,48	233,49
144		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,48	154,94
145		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,48	82,63
146		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,48	208,71
147	EDP14-Maternidade	Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,48	314,92
148		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,48	97,59
149		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,48	139,59
150		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,48	156,97
151		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,48	157,75
152		Dr António Agostinho Neto	-14,92	13,48	125,33
153		Comuna da Arimba	-14,95	13,6	160,4
154		Comuna da Arimba	-14,95	13,6	101,8
155	EDP15-ESA	Comuna da Arimba	-14,95	13,6	13,9
156		Comuna da Arimba	-14,95	13,6	45,93
157		Comuna da Arimba	-14,95	13,6	186,35
158		Comuna da Arimba	-14,95	13,6	123,31
159		Comercial	-14,92	13,5	35,33
160		Comercial	-14,92	13,5	32,99
161	EDP16-Mapel	Comercial	-14,92	13,5	89,88
162		Comercial	-14,92	13,5	56,92
163		Comercial	-14,92	13,5	56,53
164		Comercial	-14,92	13,5	116,68