



MESTRADO EM ENGENHARIA DE SEGURANÇA E HIGIENE OCUPACIONAIS

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre
Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacionais
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

CARACTERIZAÇÃO DA EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL AO RADÃO EM EDIFÍCIOS COM OCUPAÇÃO POR MEMBROS DO PÚBLICO

André Filipe Pais da Silva

Orientador: Professora Doutora Maria de Lurdes Proença de Amorim Dinis (FEUP/DECG)

Co-orientador: Professora Doutora Ana Sofia Gonçalves Ribeiro Moreira da Silva (FEUP/ESS-IPP)

Arguente: Doutora Maria José Trindade (APA)

Presidente do Júri: Professor Doutor Mário Augusto Pires Vaz (FEUP/DEMec)

2025



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto PORTUGAL

VoIP/SIP: feup@fe.up.pt ISN: 3599*654



Telefone: +351 22 508 14 00



URL: <http://www.fe.up.pt>



Correio Electrónico: feup@fe.up.pt

À minha esposa, o meu mais profundo agradecimento. A tua presença serena, a paciência inesgotável e a confiança que sempre depositaste em mim foram o alicerce silencioso desta caminhada. Abrigo nas horas tardias, âncora nos momentos mais tumultuosos, foste estímulo constante para que cada etapa fosse cumprida com rigor e dignidade. Este trabalho é também teu, porque também nasceu do teu apoio e encorajamento, da tua capacidade de relativizar contratempos e da forma generosa como acolheste as exigências deste projeto no quotidiano da nossa família.

Às minhas filhas, Rita e Clara, peço desculpa pelo tempo “roubado”, pelos serões em falta, pelos fins de semana encurtados e pelas histórias adiadas. Cada minuto ausente pesou-me tanto quanto me motivou a concluir este percurso. Que este exemplo vos mostre que o estudo e o trabalho exigem disciplina, mas que nada é mais importante do que a família, prometo transformar a ausência de hoje em presença redobrada amanhã.

A vocês, que suportaram as minhas ausências com carinho e maturidade, que trouxeram leveza aos dias difíceis e celebraram as pequenas vitórias, deixo o meu reconhecimento sincero. Sem o vosso amor, compreensão e generosidade, esta dissertação não teria sido possível.

É a vós que vos dedico-vos este trabalho, porque ele também é vosso.

Foi o tempo que dedicaste à tua rosa que a fez tão importante.

Antoine de Saint-Exupéry, O Príncipezinho

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Doutora Maria de Lurdes Dinis, expresso a minha mais profunda gratidão pela orientação científica, pela disponibilidade permanente e pelo rigor académico com que acompanhou todas as etapas deste trabalho.

À minha co-orientadora, Doutora Ana Sofia Silva, agradeço o apoio e as sugestões pertinentes e a dedicação demonstrada, que muito contribuíram para o enriquecimento desta investigação.

Ao Laboratório de Radioatividade Natural da Universidade de Coimbra, e em particular ao Professor Alcides Pereira, manifesto o meu reconhecimento pela colaboração e pela disponibilização dos recursos técnicos indispensáveis à concretização deste estudo.

Ao Centro de Recursos Naturais e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (CERENA), agradeço a colaboração científica e institucional fundamentais para a realização desta dissertação.

À Imprensa Nacional Casa da Moeda (INCM), agradeço a oportunidade de desenvolver este estudo nas suas instalações, bem como toda a abertura e apoio logístico disponibilizados.

Finalmente, deixo um agradecimento especial a todos os professores que, ao longo do meu percurso académico, contribuíram para a aquisição de conhecimentos e competências essenciais que culminaram na realização deste trabalho.

DESTAQUES

1. Confirmou-se a relevância do radão como risco ocupacional e de saúde pública, alinhado com a evidência científica internacional.
2. Nos edifícios Goldpark e Livraria, as concentrações de radão ficaram abaixo do valor de referência de 300 Bq/m³, recomendando-se apenas monitorização periódica.
3. Na Contrastaria do Porto, a estimativa da dose efetiva anual foi superior a 1 mSv/ano (estimada em 2,9 mSv/ano), mas inferior a 6 mSv/ano, sendo neste local a exposição deve ser mantida sobre observação. Neste caso, se a monitorização da eficácia das medidas de mitigação, revelarem valores de radão superiores a 300 Bq/m³, os trabalhadores devem ser classificados como “categoria B”, no que diz respeito à exposição radiológica, conforme o n.º 2 do artigo 147 do Decreto Lei 108/2018.
4. Identificou-se a influência determinante dos fatores construtivos, presença de caves e padrões de ventilação na variabilidade da concentração de radão.
5. O estudo contribuiu para apoiar decisões futuras na INCM e reforça a cultura de prevenção e segurança laboral.

HIGHLIGHTS

1. The relevance of radon as an occupational and public health risk was confirmed, in line with international scientific evidence.
2. In the Goldpark and Bookstore buildings, radon concentrations remained below the reference level of 300 Bq/m³, requiring only periodic monitoring.
3. At the Porto Assay Office, the estimated effective annual dose was above 1 mSv/year (estimated in 2.9 mSv/year) but below 6 mSv/year, and exposure at this location should be kept under observation. In this case, if the monitoring of the effectiveness of the mitigation measures reveals radon concentrations exceeding 300 Bq/m³, the workers must be classified as “category B” in relation to radiological exposure, in accordance with paragraph 2 of Article 147 of Decree-Law No. 108/2018.
4. A decisive influence of construction factors, presence of basements, and ventilation patterns on radon concentration variability was identified.
5. The study contributed to support future decisions at INCM and strengthening the culture of prevention and occupational safety.

RESUMO

Introdução

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar a exposição ao radão em edifícios com elevado fator de ocupação, por membros do público e trabalhadores, com foco em locais situados na Área Metropolitana do Porto, identificado no mapa de suscetibilidade ao radão como zonas de suscetibilidade elevada. As áreas onde a concentração de radão excede o nível de referência nacional em pelo menos 10% dos edifícios são consideradas de suscetibilidade elevada de acordo com a Resolução do Conselho de Ministros n.º 150-A/2022 de 29 de dezembro de 2022. O radão, um gás radioativo natural proveniente do decaimento do urânio, representa um perigo significativo para a saúde, estando associado ao aumento do risco de cancro do pulmão. A acumulação deste gás em ambientes interiores, sobretudo em locais com ventilação insuficiente e em contacto direto com o solo, justifica a importância da sua avaliação nos espaços interiores, monitorização e mitigação dos níveis de concentração, caso seja necessário. Este estudo foi conduzido em conformidade com a legislação em vigor, nomeadamente o Decreto-Lei n.º 108/2018, de 3 de dezembro, na sua atual redação.

Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é contribuir para a segurança e saúde dos ocupantes e trabalhadores através da identificação, monitorização e mitigação de concentrações de radão em três edifícios da Imprensa Nacional Casa da Moeda (INCM). Adicionalmente, visa-se contribuir para o cumprimento dos requisitos legais, propor medidas corretivas e sensibilizar para os riscos associados ao radão, promovendo a implementação de boas práticas na gestão da qualidade do ar interior.

Metodologia

O estudo foi desenvolvido em três etapas principais:

- a) Caracterização dos edifícios: avaliação estrutural, localização geográfica e condições de ventilação, identificando zonas críticas com maior suscetibilidade à acumulação de radão.
- b) Monitorização: utilização de detetores ativos para medições de curto prazo (7 dias) em áreas críticas, complementados por detetores passivos para medições de longo prazo (média anual), conforme diretrizes da APA.
- c) Análise de dados e mitigação: os dados recolhidos foram analisados e comparados com o valor de referência nacional. Proposta de algumas medidas de mitigação para os locais com concentrações médias anuais superiores a 300 Bq/m³, que podem passar por simplesmente melhorar as condições de ventilação ou implementar barreiras contra infiltração de radão.

Resultados

Os resultados revelaram que, na Livraria do Porto e no edifício do Goldpark, as concentrações de radão permaneceram abaixo do valor de referência, sendo suficiente a monitorização periódica. Já na Contrastaria do Porto observaram-se valores de dose efetiva devida ao radão acima 1 mSv/ano, embora o valor estimado (2,9 mSv/ano) se tenha mantido abaixo do limiar ocupacional de 6 mSv/ano (Decreto-Lei n.º 108/2018).

Conclusões

Conclui-se que a localização de edifícios em zonas identificadas com elevado índice de suscetibilidade não é suficiente para determinar a presença de radão acima do valor de referência nacional. Além disso, os fatores construtivos, bem como os padrões de ventilação e a forma como os espaços são utilizados, são determinantes na variabilidade das concentrações de radão. Desta forma, apenas a avaliação através da medição integrada no tempo da concentração de radão nos espaços interiores permite avaliar e/ou confirmar se as concentrações do gás radão excedem o nível de referência nacional. Este estudo contribuiu para a consolidação de dados empíricos fundamentais para a INCM, permitindo orientar decisões técnicas e administrativas futuras e reforçando a cultura de prevenção e segurança laboral.

Palavras chave: Radão; Exposição ocupacional; Qualidade do ar interior; Saúde pública; INCM.

ABSTRACT

Introduction

The present study aimed to characterize radon exposure in buildings with a high occupancy factor, involving both members of the public and workers, with a particular focus on sites located in the Porto Metropolitan Area, identified in the radon susceptibility map as areas of high susceptibility. According to Resolution of the Council of Ministers No. 150-A/2022 of 29 December 2022, areas where radon concentrations exceed the national reference level in at least 10% of buildings are classified as high-susceptibility zones.

Radon, a naturally occurring radioactive gas resulting from uranium decay, poses a significant health hazard, being strongly associated with an increased risk of lung cancer. The accumulation of this gas in indoor environments, especially in poorly ventilated spaces with direct contact with the soil, underscores the importance of assessing its presence, monitoring concentrations, and implementing mitigation measures whenever necessary. This study was conducted in accordance with current legislation, namely Decree-Law No. 108/2018 of 3 December, as amended.

Objectives

The main objective of this dissertation is to contribute to the protection of the health and safety of occupants and workers through the identification, monitoring, and mitigation of radon concentrations in three buildings of the Imprensa Nacional Casa da Moeda (INCM). Additionally, it seeks to ensure compliance with legal requirements, propose corrective actions, and raise awareness of the risks associated with radon, thereby fostering the adoption of good practices in indoor air quality management.

Methodology

The study was structured in three main stages:

- a) Building characterization: assessment of structural features, geographical location, and ventilation conditions, with identification of critical zones exhibiting higher susceptibility to radon accumulation.
- b) Monitoring: use of active detectors for short-term measurements (7 days) in critical areas, complemented by passive detectors for long-term monitoring (annual mean), in accordance with APA guidelines.
- c) Data analysis and mitigation: collected data were analyzed and compared against the national reference level. Mitigation measures were proposed for areas with annual average concentrations above 300 Bq/m³, ranging from improvements in ventilation conditions to the implementation of radon-proofing barriers.

Results

The results indicated that, in the Oporto Bookstore and in the Goldpark building, radon concentrations remained below the reference level, thus requiring only periodic monitoring. In contrast, the Oporto Assay Office showed effective dose levels attributable to radon above 1 mSv/year, although the estimated value (2.9 mSv/year) remained below the occupational threshold of 6 mSv/year established in Decree-Law No. 108/2018.

Conclusions

It is concluded that the mere location of buildings within areas classified as having high radon susceptibility is not sufficient to determine concentrations above the national reference level. Constructive factors, ventilation patterns, and the way in which spaces are used play a decisive role in the variability of indoor radon concentrations. Consequently, only integrated time-based monitoring of radon concentrations indoors can accurately determine and/or confirm whether reference levels are exceeded.

This study contributed to the consolidation of essential empirical data for the INCM, supporting future technical and administrative decision-making and reinforcing a culture of occupational safety and prevention.

Keywords: Radon; Occupational exposure; Indoor air quality; Public health; INCM.

GLOSSÁRIO

Becquerel (Bq)	Unidade SI de atividade radioativa; 1 Bq = 1 desintegração por segundo.
Bq/m ³ (Becquerel por metro cúbico)	Unidade para a concentração de radão no ar interior.
CR-39 (detetor de traços nucleares)	Detetor passivo para medições de longo prazo; regista as partículas alfa emitidas pelo ²²² Rn.
Decaimento radioativo	Processo natural pelo qual nuclídeos instáveis se transformam noutros, emitindo radiação.
Decreto-Lei n.º 108/2018	Diploma que transpõe a Diretiva 2013/59/EURATOM para a ordem jurídica portuguesa e estabelece obrigações para a avaliação/mitigação do radão em locais de trabalho.
Diretiva 2013/59/EURATOM	Normas de segurança básicas sobre proteção contra radiações ionizantes; consagra o nível de referência da concentração de radão no ar interior em 300 Bq/m ³ .
Dose efetiva (E):	Medida ponderada do risco biológico da radiação, expressa em sievert (Sv); integra tipo de radiação e sensibilidade tecidual.
Fator de equilíbrio (F)	Razão entre a atividade efetiva dos descendentes do radão e a que existiria em equilíbrio secular com o ²²² Rn; relevante na conversão de concentração em dose.
Humidade relativa (Hr)	Fração (%) de vapor de água no ar; parâmetro ambiental registado conjuntamente com a concentração de radão.
Nível de Referência	Valor de referência para a concentração de radão no ar interior (300 Bq/m ³ em Portugal), estabelecido por regulamentações nacionais e europeias, a partir do qual é necessário tomar medidas adequadas para a sua redução
Monitorização de Curto Prazo	Medição da concentração de radão realizada por períodos breves (tipicamente 7 a 10 dias).
Monitorização de Longo Prazo	Avaliação contínua da concentração de radão ao longo de meses ou anos, sendo representativa da exposição média anual.
PRISMA	Metodologia/diagrama para revisões sistemáticas.
Radiação alfa (α)	Partículas fortemente ionizantes, baixa penetração (bloqueadas pela pele/folha de papel).
Radiação beta (β)	Elétrões de maior penetração que as partículas α ; atenuáveis por uma folha de alumínio.
Radiação gama (γ)	Radiação eletromagnética de alta energia; alta penetração; requer blindagens densas (chumbo).
RadonEye+2	Equipamento digital de medição de radão (método ativo); permite leituras rápidas ao longo do tempo.

Radão (^{222}Rn)	Gás nobre radioativo, incolor e inodoro, proveniente do decaimento do rádio 226 que por sua vez resulta da cadeia de decaimento do urânio 238; reconhecido fator de risco para cancro do pulmão.
Temperatura do ar (Θ , °C)	Parâmetro ambiental registado nos mesmos períodos de monitorização.
Torão (^{220}Rn)	Isótopo do radão com meia-vida muito curta (55,6 segundos); tem origem na cadeia de decaimento do tório 232.
Sistema de Depressão Ativa	Tecnologia que reduz a entrada de radão em edifícios ao criar um diferencial de pressão entre o solo e o ambiente interior.
Sistema de Pressão Positiva	Método de ventilação que introduz ar fresco no interior dos edifícios, criando uma pressão que impede a entrada de radão do solo, através de fissuras.
Ventilação Mecânica	Sistema ativo que utiliza dispositivos, como ventiladores, para renovar o ar interior e reduzir os níveis de radão.
Ventilação Natural	Processo passivo de renovação do ar interior através de aberturas como grelhas de ventilação, útil na redução das concentrações de radão.

ABREVIATURAS

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
CR-39	Detetor passivo de traços nucleares
CPO	Contrastaria do Porto
CSI	Coordenação de Segurança Interna
DL	Decreto-Lei (ex.: DL n.º 108/2018)
DSO	Divisão de Obras e Apoio Geral
EUR	Euro, moeda oficial da zona euro
EURATOM	Comunidade Europeia da Energia Atómica, instituição europeia que regula normas de segurança relacionadas à energia e radiação nuclear
GPK	Goldpark
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
INCM	Imprensa Nacional Casa da Moeda.
LMG	Laboratório de Metais de Gondomar
LMP	Laboratório de Metais do Porto
LPO	Livraria do Porto
MCG	Marcação de Gondomar
OMS / WHO	Organização Mundial da Saúde / World Health Organization
PNRn	Plano Nacional para o Radão
RCM	Resolução do Conselho de Ministros (ex.: RCM n.º 150-A/2022)
Rn	Radão (símbolo químico)
RSG	Receção de Gondomar
RSP	Receção do Porto
Sv / mSv	Sievert / millisievert (unidades de dose efetiva)
UGF	Unidade Gráfica de Segurança
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

INDICE

1	Introdução	1
1.1	Apresentação do tema, do problema e fundamentação	1
1.2	Justificação e relevância do problema	3
1.3	Organização da dissertação	7
1.4	Fundamentação do trabalho e definição dos objetivos.....	8
1.4.1	Apresentação da entidade onde a Dissertação foi realizada	8
1.4.2	Conceitos e Definições	10
1.4.3	Enquadramento Legal e Normativo.....	11
1.4.4	Conhecimento Científico	13
1.4.5	Discussão dos resultados	34
1.4.6	Objetivos da Dissertação	35
2	Metodologia	37
2.1	Local da Avaliação.....	38
2.1.1	Edifício da Contrastaria do Porto	38
2.1.2	Edifício da Livraria do Porto	39
2.1.3	Delegação da Contrastaria de Gondomar	39
2.2	Descrição dos equipamentos	39
2.2.1	Detetor Eletrónico Contínuo — RadonEye+ ²	40
2.2.2	Detetor Passivo de Traços Nucleares — CR-39.....	41
2.3	Procedimentos Experimentais	41
2.3.1	Fase 1 — Caracterização preliminar dos edifícios e monitorização de diagnóstico.....	42
2.3.2	Fase 2 — Monitorização de Longa Duração com Detetores Passivos (CR-39).....	42
2.3.3	Fase 3 — Avaliação de variações sazonais com detetores ativos.....	43
3	RESULTADOS.....	44
3.1	Avaliação preliminar – 1ª Fase.....	44
3.1.1	Análise compartimento a compartimento	46
3.2	Avaliação Detetores Ativos – 2ª Fase	56
3.2.1	Análise compartimento a compartimento	58
3.3	Avaliação Detetores Passivos – 2ª Fase	67
3.4	Cálculo da dose efetiva	68

3.4.1	Dose efetiva devida apenas ao radão 1º fase (RadonEye+ ²).....	68
3.4.2	Dose efetiva devida apenas ao radão 2ª fase (RadonEye+ ²).....	68
3.4.3	Dose efetiva devida apenas ao radão (CR-39).....	69
3.5	Condições Meteorológicas	70
3.6	Variáveis Ambientais	73
4	DISCUSSÃO.....	76
4.1	Caracterização técnica dos edifícios.....	76
4.2	Monitorização ativa de curto prazo	76
4.3	Monitorização passiva de longo prazo e quantificação da dose efetiva	77
4.4	Validação cruzada dos resultados: Radoneye+ ² versus CR-39	79
4.5	Estratégias de mitigação	80
4.6	Plano de monitorização periódica e comunicação de risco	86
4.7	Limitações e vieses.....	87
5	CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS	89
5.1	Conclusões.....	89
5.2	Perspetivas Futuras.....	90
6	BIBLIOGRAFIA.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Cadeia de decaimento do Urânio 238.....	1
Figura 2 - Mapa de suscetibilidade ao radão e localização dos edifícios em estudo.....	2
Figura 3 - Localização dos edifícios em estudo.	2
Figura 4 - Taxa de sobrevivência ao fim de 5 anos, por tipo de cancro, 2010-2014.....	5
Figura 5 - Diagrama de Gestão de Risco de Exposição ao Radão	12
Figura 6 - Principais vias de Entrada Radão.	15
Figura 7 - Detetor CR-39.....	21
Figura 8 - Detetor RadonEye+ ²	22
Figura 9 - Esquema de um sistema de pressurização.	23
Figura 10 - Membrana barreira contra o radão aplicada sobre o revestimento de piso existente.....	24
Figura 11 - Exemplo da instalação de um sistema de despressurização do solo.....	25
Figura 12 - Diagrama de fluxo PRISMA.	27
Figura 13 - Resultados monitorização inicial, Contrastaria do Porto.....	45
Figura 14 - Resultados monitorização inicial, Livraria do Porto.	45
Figura 15 - Resultados monitorização inicial, Goldpark.....	46
Figura 16 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (CPO/UGF).....	46
Figura 17 – Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (CPO/UGF).	47
Figura 18 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (CPO/CSI).....	47
Figura 19 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (CPO/CSI).....	47
Figura 20 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (CPO/LMP).....	48
Figura 21 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (CPO/LMP).....	48
Figura 22 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (CPO/RSP).....	49
Figura 23 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (CPO/RSP).....	49
Figura 24 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (GPK/CSI).	49
Figura 25 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (GPK/CSI).....	50
Figura 26 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (GPK/RSG).....	50
Figura 27 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (GPK/RSG).	51
Figura 28 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (GPK/MCG).	51
Figura 29 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (GPK(MCG).	51
Figura 30 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (GPK/LMG).....	52

Figura 31 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (GPK/LMG).	52
Figura 32 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (GPK/DSO).	53
Figura 33 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (GPK/DSO).	53
Figura 34 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (LPO/Cave).	53
Figura 35 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (LPO/Cave).	54
Figura 36 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (LPO/Público).	54
Figura 37 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (LPO/Público).	55
Figura 38 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (LPO/Não público).	55
Figura 39 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (LPO/Não público).	56
Figura 40 - Monitorização de Longo Prazo - Contrastaria do Porto.	57
Figura 41 - Monitorização de Longo Prazo, Goldpark.	57
Figura 42 - Monitorização de longo prazo, Livraria do Porto.	58
Figura 43 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (CPO/RSP).	58
Figura 44 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (CPO/RSP).	59
Figura 45 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (CPO/LMP).	59
Figura 46 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (CPO/LMP).	59
Figura 47 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (CPO/CSI).	60
Figura 48 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (CPO/CSI).	60
Figura 49 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (CPO/UGF).	61
Figura 50 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (CPO/UGF).	61
Figura 51 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (GPK/RSG).	61
Figura 52 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (GPK/RSG).	62
Figura 53 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (GPK/MCG).	62
Figura 54 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (GPK/MCG).	62
Figura 55 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (GPK/LMG).	63
Figura 56 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (GPK/LMG).	63
Figura 57 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (GPK/CSI).	64
Figura 58 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (GPK/CSI).	64
Figura 59 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (GPK/DSO).	65
Figura 60 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (GPK/DSO).	65

Figura 61 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (LPO/Cave).	65
Figura 62 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (LPO/Cave).	66
Figura 63 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (LPO/Público).	66
Figura 64 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (LPO/Público).	66
Figura 65 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (LPO/Não público).	67
Figura 66 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (LPO/Não público).	67
Figura 67 - Condições meteorológicas registadas durante o mês de dezembro de 2024.	70
Figura 68 - Condições meteorológicas registadas em maio de 2025.	71
Figura 69 - Condições meteorológicas registadas em junho de 2025.	72
Figura 70 - Condições meteorológicas registadas em julho de 2025.	72
Figura 71 - Condições meteorológicas registadas de 16 junho a 1 julho.	73
Figura 72 - Comparação da variação das incertezas, Radoneye+ ² versus CR-39.	79
Figura 73 - Variação horária da atividade de radão entre os dias 2 e 10 junho de 2025.	80
Figura 74 - Variação horária da atividade de radão entre os dias 4 e 11 dezembro de 2024.	81
Figura 75 - Exemplo de variações sazonais da atividade de radão.	81
Figura 76 - Variação horária da Atividade de Radão, no LMP, de 2 a 3 junho de 2025.	82
Figura 77 - Variação horária da atividade de radão, no LMP, de 5 a 6 de dezembro de 2024.	82
Figura 78 - Variação horária da atividade de radão, na UGF, de 2 a 3 junho de 2025.	82
Figura 79 - Variação horária da atividade de radão, na UGF, de 5 a 6 dezembro de 2024.	83
Figura 80 - Variação comparativa dos níveis de radão ao longo do dia, LMP, RSP e UGF.	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização metodológica dos artigos selecionados, contexto geográfico e problemática ..	28
Tabela 2 - População alvo, variáveis em estudo e principais resultados e limitações	30
Tabela 3 - Localização dos locais de estudo	38
Tabela 4 - Identificação dos detetores	40
Tabela 5 - Quadro resumo valores de radão - 1º fase, detetores ativos.	44
Tabela 6 - Quadro resumo de valores de radão - 2ª fase, detetores ativos.	56
Tabela 7 - Valores de Radão, CR-39	68
Tabela 8 - Dose efetiva RadonEye+ ² (mSv/ano), avaliação preliminar.	68
Tabela 9 - Dose efetiva – RadonEye+ ² (mSv/ano), monitorização de longa duração.....	69
Tabela 10 - Dose efetiva - CR-39 (mSv/ano).....	69
Tabela 11 - Resumo das variáveis ambientais registadas - 1ª Fase	74
Tabela 12 - Resumo das variáveis ambientais registadas - 2ª Fase	74
Tabela 13 - Comparação da variação das incertezas, Radoneye+ ² versus CR-39.....	79
Tabela 14 - Técnicas de mitigação para redução da concentração de radão nos edifícios	85

ANEXOS

Tabela 15 - Quadro resumo valores de radão - 1º fase, detetores ativos.	7
Tabela 16 - Quadro resumo valores de radão - 2ª fase, detetores ativos.	7
Tabela 17 - Dose efetiva - CR-39 (mSv/ano).....	7
Tabela 18 - Resumo das variáveis ambientais registadas - 1ª Fase	8
Tabela 19 - Resumo das variáveis ambientais registadas - 2ª Fase	8

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do tema, do problema e fundamentação

A presente dissertação insere-se no domínio da Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacionais, focando-se na caracterização da exposição ao radão em edifícios com elevado fator de ocupação, sendo ocupados essencialmente por trabalhadores.

O radão (^{222}Rn) é um gás nobre radioativo, incolor e inodoro, que resulta da cadeia de decaimento do urânio 238, naturalmente presente no solo e nas rochas (Figura 1). Este gás, ao infiltrar-se nos espaços interiores através de fissuras nas fundações ou em virtude da fraca estanqueidade dos materiais de construção, tende a acumular-se especialmente em zonas subterrâneas ou pouco ventiladas, potenciando riscos graves para a saúde humana (IAEA, 2014; WHO, 2009).

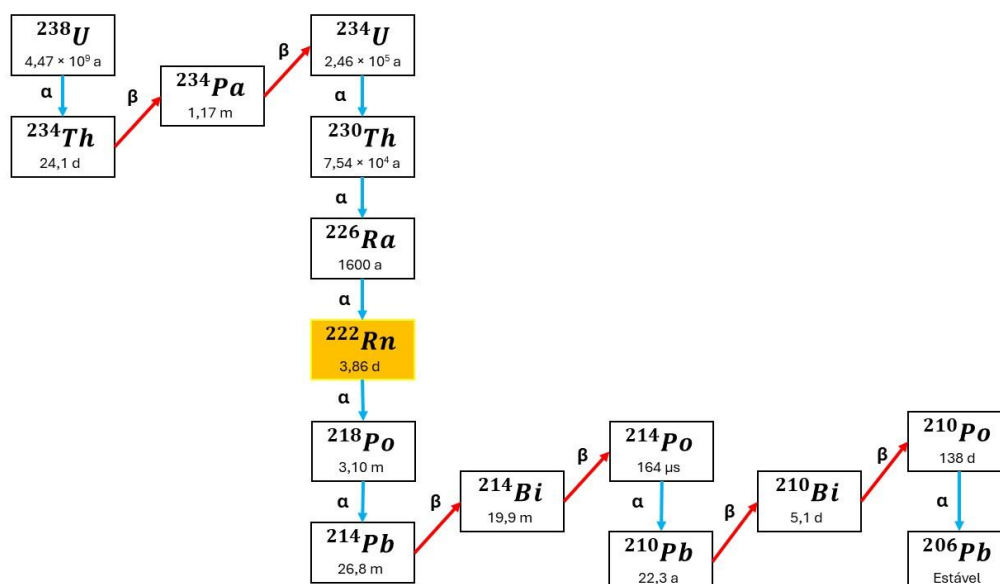


Figura 1 - Cadeia de decaimento do Urânio 238.

Nota: Adaptado de APA

A exposição prolongada a concentrações elevadas de radão constitui a segunda principal causa de cancro do pulmão, depois do tabagismo (Harrison & Marsh, 2019; Richardson et al., 2022). A sua relevância enquanto problema de saúde pública é reconhecida internacionalmente, sendo alvo de regulamentação europeia e nacional, nomeadamente através da Diretiva 2013/59/EURATOM e do Decreto-Lei n.º 108/2018, que fixam o valor de referência para a concentração de radão nos ambientes interiores em 300 Bq/m³.

Esta problemática adquire particular pertinência em edifícios situados em zonas classificadas pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2021) com índice de suscetibilidade ao radão elevado (Figura 2) e (Figura 3), como é o caso dos edifícios da Imprensa Nacional Casa da Moeda (INCM).

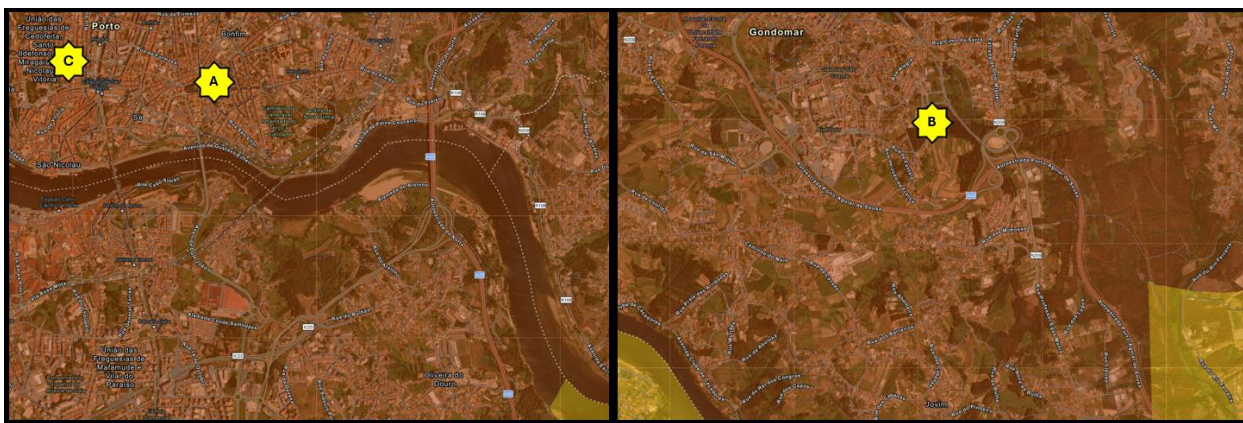


Figura 2 - Mapa de suscetibilidade¹ ao radão e localização dos edifícios em estudo.

Nota: Adaptado de APA.

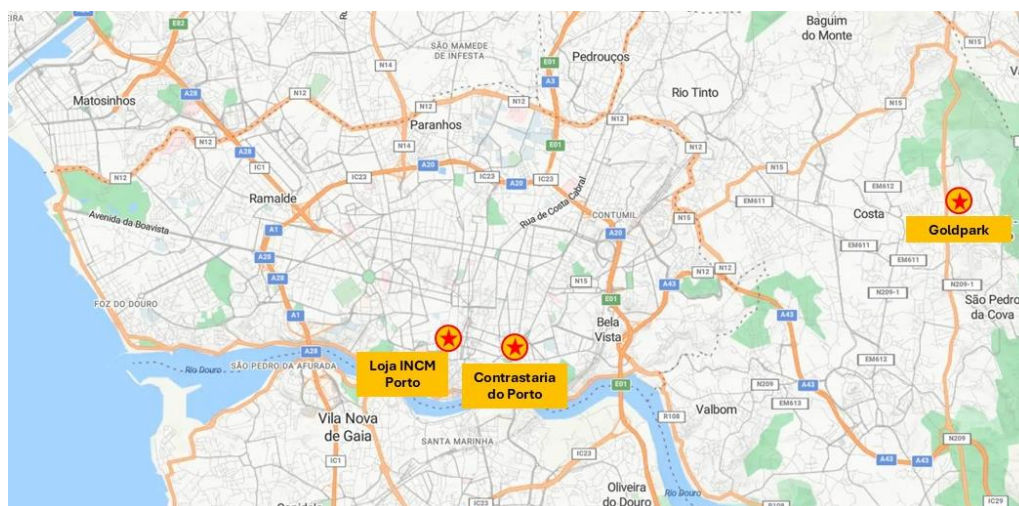


Figura 3 - Localização dos edifícios em estudo.

Nota: Adaptado de Bing.com²

O edifício da Contrastaria do Porto, localizado na freguesia do Bonfim, encontra-se edificado sobre formações graníticas típicas da região do Porto, as quais apresentam potencial significativo para a libertação de radão devido ao seu conteúdo natural em urânio e tório. O PNRn sublinha que os granitos e rochas cristalinas são, em Portugal, dos materiais mais suscetíveis à exalação deste gás radioativo, sobretudo quando atravessados por fraturas ou zonas de alteração (APA, 2021; Resolução do Conselho de Ministros 150-A, 2022). A construção datada de 1942, com paredes exteriores em granito e fundações antigas, potencia a infiltração do radão, sobretudo pela presença de fissuras estruturais e pela ausência de sistemas construtivos modernos de impermeabilização.

O edifício da Livraria do Porto, situado na freguesia da Vitória, insere-se também num contexto litológico dominado por granitos e metassedimentos associados. Construído em 1906, inclui uma cave que, segundo

¹ <https://sniambgeogc.apambiente.pt/getogc/rest/services/Visualizador/sirad/MapServer> (acedido em 01/11/2025);
A - Livraria do Porto; B - Goldpark; C - Livraria do Porto

² www.bing.com/maps?q=mapa+cidade+porto+e+arredores (acedido em 12/09/2025)

a literatura internacional, constitui um espaço de elevado risco para acumulação de radão devido à ventilação limitada e ao contacto direto com o subsolo (UNSCEAR, 2000), de acordo com o Guia para a prestação de serviços na medição de radão (APA, 2022c), os espaços subterrâneos e mal ventilados são considerados críticos para a avaliação da exposição ao radão, exigindo monitorização regular.

Já a Delegação da Contrastaria de Gondomar, situada no Goldpark (freguesia de São Cosme) e construída em 2016, encontra-se implantada sobre unidades do maciço granítico varisco. Nesta região, é descrito o chamado Granito de Gondomar, de grão grosseiro e frequentemente associado a formações metassedimentares e estruturas tectónicas, o que aumenta a permeabilidade e a possibilidade de migração do radão (Ferreira et al., 2014). Apesar da modernidade da construção permitir uma maior estanqueidade e ventilação, o piso onde a contrastaria está instalada se encontrar parcialmente enterrado cria condições favoráveis à entrada de radão, em conformidade com os cenários descritos pela (APA, 2022c).

Em síntese, os três edifícios apresentam um contexto geológico semelhante, dominado por rochas graníticas com potencial elevado para a libertação de radão. No entanto, as condições construtivas diferem: os edifícios antigos do Porto revelam maior vulnerabilidade devido à idade, presença de caves e à ausência de medidas modernas de controlo, enquanto o edifício de Gondomar, embora mais recente, continua exposto ao risco moderado pela sua implantação em contacto direto com o solo.

1.2 Justificação e relevância do problema

O radão (^{222}Rn) é responsável por cerca de 50% da dose efetiva anual de radiação ionizante natural recebida pela população mundial (UNSCEAR, 2020). Este gás representa um dos principais fatores de risco para o cancro do pulmão, apenas suplantado pelo tabagismo. A OMS estima que entre 3% a 14% dos casos de cancro do pulmão são atribuíveis à exposição ao radão (WHO, 2009). Estudos como o de (Darby et al., 2005) concluiu que 9% dos casos de cancro do pulmão podem ser atribuídos à exposição ao radão, este estudo que decorreu em 9 países europeus, concluiu ainda que o risco de cancro do pulmão aumenta com o aumento da exposição ao radão, sendo que este efeito é mais acentuado em fumadores uma vez que a exposição ao radão apresenta um efeito sinérgico com a exposição ao fumo do tabaco. Estudos como o de (Krewski et al., 2005) que decorreu nos Estados Unidos e no Canadá, concluiu que há um aumento do risco de cancro do pulmão com o aumento da exposição ao radão, e confirmou um efeito sinérgico entre a exposição ao radão e ao fumo do tabaco, corroborando os resultados europeus.

Em Portugal, o PNRn, que foi publicado pela Resolução do Conselho de Ministros 150-A, 2022, identifica várias zonas com índice de suscetibilidade elevado, nomeadamente nas regiões Norte e Centro, onde os níveis de radão podem ultrapassar os 1000 Bq/m³, valores significativamente superiores os níveis de referência nacional, 300 Bq/m³. O presente estudo incide precisamente sobre três edifícios localizados em zonas identificadas com índice de suscetibilidade elevado, justificando-se a sua urgência e prioridade.

Existem muitos estudos que evidenciam a associação entre a exposição ao radão e os efeitos deletérios para a saúde nos trabalhadores das minas de urânio. No entanto, nas últimas décadas, vários estudos têm vindo a consolidar o conhecimento sobre a exposição do público em geral ao radão, tanto em contexto ocupacional como em contexto residencial, sendo que os resultados evidenciam os mesmos efeitos nefastos. Estudos multicêntricos, como o de (Darby et al., 2005), demonstraram uma relação linear entre o aumento da

concentração de radão e o risco de cancro do pulmão, não sendo identificável um limiar de exposição seguro (Harrison & Marsh, 2019; UNSCEAR, 2020). Segundo a ICRP (2017), por cada incremento de 100 Bq/m³ na exposição em ambiente residencial, o risco relativo de desenvolver cancro do pulmão aumenta 16%.

Investigações recentes têm evidenciado que a geologia constitui um fator determinante para a suscetibilidade dos edifícios à acumulação de radão, sendo os solos graníticos e vulcânicos particularmente propensos a emissões elevadas deste gás devido ao seu maior teor em urânio. Estudos demonstram que construções implantadas sobre estas litologias apresentam valores significativamente superiores de radão quando comparadas com edifícios erguidos em terrenos sedimentares (Dicu et al., 2024; Ferreira et al., 2014; Lopes et al., 2021). Esta vulnerabilidade é agravada por deficiências construtivas, nomeadamente a ausência de ventilação forçada ou o isolamento insuficiente das fundações, que favorecem a migração do gás para os espaços interiores (Beldean-Galea et al., 2020). Em contextos vulcânicos, como ilustrado pelo caso de Cerveteri, em Itália, foram igualmente registadas concentrações elevadas em edifícios sem medidas adequadas de impermeabilização, confirmando a interação entre fatores geológicos e construtivos no risco de exposição (Voltattorni et al., 2023). Resultados consistentes têm sido também obtidos em cartografias de suscetibilidade, que identificam as áreas graníticas como zonas prioritárias de risco de exposição ao radão (Appleton et al., 2020), e em estudos populacionais que revelam uma maior exposição em edifícios modernos, mais estanques e frequentemente localizados em áreas de risco, afetando sobretudo indivíduos jovens (Simms et al., 2021).

Sendo o radão um poluente invisível e inodoro, a sua presença é ignorada pela população em geral, facto que agrava a sua exposição. A permanência prolongada em ambientes com elevados níveis de radão, como habitações, escolas ou locais de trabalho, representa um risco real e contínuo para a saúde dos ocupantes, em especial crianças, idosos e trabalhadores.

Para além das implicações diretas na saúde individual, a exposição ao radão acarreta consequências sociais e económicas de grande alcance, que justificam a sua consideração como uma prioridade de saúde pública. Os efeitos nefastos do radão podem traduzir-se numa elevada morbilidade, que se repercute nos sistemas nacionais de saúde através do aumento da procura por diagnóstico precoce, tratamentos oncológicos complexos e cuidados de acompanhamento de longa duração (Nunes et al., 2022).

Do lado dos custos diretos, em Portugal, o gasto total em cuidados de saúde associado ao cancro foi estimado em 2208 milhões de EUR em 2018, o que corresponde a 256 EUR per capita, ainda assim cerca de 20% inferior face à média da UE 326 EUR. Os custos diretos de saúde representaram 44% deste total e equivaleram a 5,4% da despesa nacional em saúde. Salientam-se os gastos com medicamentos oncológicos, que absorveram, o correspondente a cerca de 2/5. Entre 2017 e 2020, a despesa hospitalar em Portugal com antineoplásicos cresceu 55%, para 440 milhões de EUR. (European Cancer Inequalities Registry, 2023).

Nos custos indiretos, a perda de produtividade constituiu 39% do custo total, dos quais 30% por mortalidade prematura e 9% por morbilidade (absentismo). Os cuidados informais prestados por familiares e amigos representaram aproximadamente 17% do total, uma parcela socialmente relevante que não transita pelos orçamentos nacionais, mas que recai sobre os agregados familiares (European Cancer Inequalities Registry, 2023). O cancro do pulmão continua a ser a neoplasia com maior taxa de mortalidade em Portugal (Figura

4), sendo que em 2015 registaram-se 4015 óbitos associados a neoplasias do pulmão, brônquios e traqueia (European Cancer Inequalities Registry, 2023).

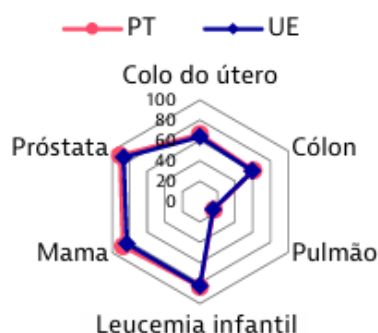


Figura 4 - Taxa de sobrevivência ao fim de 5 anos, por tipo de cancro, 2010-2014.

Nota: Adaptado de European Cancer Inequalities Registry, 2023.

Para efeitos de planeamento económico aplicado ao radão, importa articular estes rácios com a fração das neoplasias atribuíveis ao radão. No Norte de Portugal, estimou-se que 18% a 28% das mortes por cancro do pulmão, entre 1995 a 2004 são atribuíveis à exposição residencial ao radão, sendo que a maioria dos óbitos ocorreu em fumadores em virtude da relação sinérgica entre o tabaco e o radão (Velo et al., 2012).

Resumindo, as doenças oncológicas têm custos visíveis e custos indiretos, representando um encargo significativo quer para os sistemas de saúde quer para os agregados familiares. Entre os custos diretos contamos com hospitalizações, terapias inovadoras e vigilância médica contínua, enquanto os custos indiretos se refletem em absentismo laboral prolongado, perda de produtividade e redução do rendimento disponível das famílias (Gillmore et al., 2018). Esta dimensão económica afeta não só os orçamentos públicos, mas também a estabilidade financeira de agregados familiares que, muitas vezes, enfrentam situações de fragilidade acrescida devido à incapacidade laboral ou à necessidade de cuidados permanentes (Gopalakrishnan & Jeyanthi, 2022).

As repercussões sociais deste fenómeno são igualmente relevantes. Para além do impacto clínico e económico, a progressão da doença oncológica induzida pelo radão está associada à exclusão social, à perda de autonomia pessoal e à degradação da qualidade de vida dos doentes e respetivas famílias (Grzywa-Celińska et al., 2020). Esta perspetiva evidencia que o radão não deve ser encarado unicamente como um risco ambiental ou de saúde individual, mas sim como um problema que afeta diretamente a coesão social e o bem-estar coletivo (Nunes et al., 2022).

Neste enquadramento, a promoção de ambientes interiores saudáveis assume um papel central. A monitorização sistemática da concentração de radão, acompanhada pela implementação de medidas de mitigação eficazes, constitui uma intervenção essencial para reduzir o risco de doença e, em simultâneo, salvaguardar a sustentabilidade social e económica. Como sublinham vários autores, a prevenção da exposição ao radão deve ser entendida não apenas como uma medida técnica ou clínica, mas como um requisito fundamental para o desenvolvimento humano e social sustentável, ao permitir reduzir custos futuros, melhorar a qualidade de vida e proteger comunidades contra vulnerabilidades acrescidas (Gillmore et al., 2018; Gopalakrishnan & Jeyanthi, 2022).

As intervenções precoces centradas na prevenção da infiltração do radão, como a realização de avaliações ambientais em fase de planeamento, a instalação de barreiras anti-radão nas fundações e a incorporação de sistemas de ventilação mecânica na construção de edifícios novos, apresentam custos significativamente inferiores quando comparados com as despesas acumuladas resultantes da inação perante este risco ambiental. Diversos estudos salientam que estas medidas, quando implementadas atempadamente, constituem um exemplo paradigmático de política preventiva eficaz, não só pela sua viabilidade técnica e económica, mas também pelo contributo para reduzir o impacto social e financeiro associado ao tratamento do cancro do pulmão induzido pelo radão (Gillmore et al., 2018; Gopalakrishnan & Jeyanthi, 2022; Nunes et al., 2022).

Do ponto de vista ético, é inaceitável que trabalhadores ou membros do público estejam expostos a riscos evitáveis sem o seu conhecimento ou consentimento. O princípio da precaução e o direito à proteção da saúde, consagrados na Constituição da República Portuguesa, impõem às entidades públicas e privadas o dever moral de prevenir exposições danosas, sobretudo quando os meios técnicos e científicos para o fazer estão acessíveis e são comprovadamente eficazes.

A ausência de ação em locais onde os riscos são conhecidos configura uma falha ética grave, tanto mais que se tratam de riscos silenciosos e cumulativos, cujos efeitos podem não ser imediatamente visíveis, mas são profundamente devastadores a médio e longo prazo.

Em termos legais, a exposição ao radão é objeto de regulamentação específica, quer ao nível europeu quer nacional. A Diretiva 2013/59/EURATOM, transposta para o ordenamento jurídico português pelo Decreto-Lei n.º 108/2018 de 3 de dezembro, na sua atual redação, estabelece o valor de referência para o radão em ambientes interiores (300 Bq/m^3) e impõe a obrigatoriedade de medição em zonas identificadas com índice de suscetibilidade elevado.

O Decreto-Lei n.º 108/2018, de 3 de dezembro, estabelece no artigo 145.º, que o nível de referência nacional para a concentração de radão em habitações, locais de trabalho e edifícios de acesso público é de 300 Bq/m^3 , devendo as entidades responsáveis assegurar que as exposições sejam tão baixas quanto razoavelmente possível. Quando não é possível reduzir a concentração abaixo do valor de referência, a situação passa a ser considerada como de exposição ocupacional planeada, implicando requisitos de proteção acrescidos (art. 146.º, n.º 2).

Nestes casos, torna-se obrigatória a avaliação da dose efetiva anual recebida pelos trabalhadores. Se a dose efetiva for superior a 6 mSv/ano , aplicam-se todas as disposições previstas para as situações de exposição planeada, incluindo a classificação dos trabalhadores como expostos, a monitorização individual por serviços de dosimetria reconhecidos e a vigilância médica adequada (art. 148.º, n.º 1). Se, pelo contrário, a dose se mantiver igual ou inferior a 6 mSv/ano , as exposições devem ser mantidas sob observação contínua (art. 148.º, n.º 2).

Adicionalmente, o artigo 149.º do mesmo diploma determina que, sempre que forem identificadas concentrações acima do nível de referência, deve ser implementada, em articulação com a autoridade competente, uma estratégia coordenada de proteção, visando reduzir as concentrações de radão e garantir um nível ótimo de proteção da saúde dos ocupantes.

Este diploma obriga os empregadores a avaliar os níveis de radão nos seus locais de trabalho e a implementar medidas corretivas sempre que se verifique que são ultrapassados os limites de referência, sob pena de incumprimento legal. A não conformidade pode levar a responsabilidade civil e penal, sanções administrativas e perda de certificações em matéria de segurança e saúde no trabalho.

Adicionalmente, o PNRn reforça a prioridade política e técnica desta problemática, estabelecendo ações concretas de vigilância, mitigação e sensibilização, com foco especial em infraestruturas públicas e locais com elevada permanência humana, como é o caso da INCM.

Face ao exposto, é evidente que a problemática da exposição ao radão constitui um risco real, mensurável e evitável, cuja mitigação é imperativa sob o ponto de vista científico, social, económico, ético e legal. A dissertação em causa contribui de forma direta para a identificação, quantificação e controlo deste risco, assumindo-se como um instrumento valioso para a proteção da saúde ocupacional e pública, contribuindo para o cumprimento normativo e para a promoção de uma cultura de prevenção.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos e lista da bibliografia consultada e citada abordando os seguintes conteúdos:

- Capítulo 1, Introdução. Apresenta o tema, problema e sua fundamentação, justificando a relevância da exposição ao radão em contextos ocupacionais e locais de acesso público. Descreve a organização da dissertação e enuncia os objetivos gerais e específicos, incluindo a apresentação da entidade onde decorreu o estudo. Neste capítulo é ainda feito o enquadramento legal, normativo e científico de suporte ao trabalho.
- Capítulo 2, Metodologia. Detalha o desenho do estudo, os locais de avaliação, os equipamentos utilizados e os procedimentos experimentais.
- Capítulo 3, Resultados. Apresenta, por edifício e compartimento, as séries temporais e estatísticas descritivas das concentrações de radão obtidas nas fases ativa e passiva, bem como o contexto meteorológico e as variáveis ambientais registadas que ajudam a interpretar a variabilidade observada.
- Capítulo 4, Discussão. Interpreta criticamente os resultados face ao enquadramento científico e legal, analisando diferenças entre edifícios, a influência de fatores construtivos, ventilação e implicações para a gestão do risco. Propõe estratégias de mitigação, um plano de monitorização periódica e comunicação de risco, e identifica limitações e potenciais vieses do estudo.
- Capítulo 5, Conclusões e perspetivas futuras. Sintetiza as principais conclusões, destacando a adequação da metodologia e a coerência dos achados com a literatura, e indica linhas de trabalho futuro
- Bibliografia.

1.4 Fundamentação do trabalho e definição dos objetivos

1.4.1 Apresentação da entidade onde a Dissertação foi realizada

A Imprensa Nacional Casa da Moeda, S. A. (INCM)³ é uma sociedade anónima cujo capital é exclusivamente público, resultante da fusão, em 1972, entre a Imprensa Nacional (criada em 1768) e a Casa da Moeda, com atividade documentada desde o século XIII. Esta fusão integrou competências históricas e técnicas, conferindo à INCM uma missão focada na prestação de serviços essenciais ao Estado, à sociedade civil e ao património cultural português.

a. Missão, Visão e Valores⁴

A INCM tem como missão construir relações duradouras e de confiança entre cidadãos, empresas e entidades públicas, através da criação de soluções de segurança e da proteção de valores essenciais da sociedade. A sua visão consiste em ser reconhecida como parceira de confiança, bem como uma referência global na promoção da segurança e da evolução da sociedade. O propósito institucional — “proteger e valorizar o que é único e autêntico” — reflete o seu compromisso com a salvaguarda do legado nacional. Os valores da INCM articulam-se em torno dos conceitos de segurança, legado, responsabilidade, evolução e valorização das pessoas.

b. Áreas de atuação⁵

A atividade da INCM organiza-se em duas grandes vertentes:

- Documentos de segurança e certificação digital, nomeadamente Cartão de Cidadão, passaportes, cartas de condução, títulos de transporte e selos postais, empregando tecnologias como criptografia, biometria, *blockchain* e inteligência artificial;
- Cunhagem e contrastaria, que abrangem a emissão de moeda corrente e comemorativa, a certificação legal de metais preciosos nas contrastarias de Lisboa e Porto, e a edição de publicações oficiais (como o Diário da República) e literárias, com um foco claro na democratização da cultura lusófona.

c. Responsabilidade social⁶, cultura⁷ e pessoas⁸

No âmbito da responsabilidade social, a INCM desenvolve ações que visam uma sociedade mais justa e solidária, através de projetos de voluntariado corporativo, iniciativas com impacto social e a produção de livros e moedas solidárias, cujas receitas apoiam causas sociais. A responsabilidade cultural materializa-se na promoção da língua e arte portuguesas, com iniciativas editoriais inclusivas, audiolivros e prémios literários, além da disponibilização gratuita de conteúdos digitais.

³ www.incm.pt/site/incm-sobre-nos/ (acedido em 19/12/2024)

⁴ www.incm.pt/site/missao-visao-valores/ (acedido em 19/12/2024)

⁵ www.incm.pt/site/casa-da-moeda/ (acedido em 19/12/2024)

⁶ www.incm.pt/site/responsabilidade-social/ (acedido em 19/12/2024)

⁷ www.incm.pt/site/responsabilidade-cultural/ (acedido em 19/12/2024)

⁸ www.incm.pt/site/valor-pessoas/ (acedido em 19/12/2024)

Relativamente às pessoas, a INCM destaca-se pelo reconhecimento do seu capital humano como principal valor. Investe em formação técnica e comportamental, fomenta uma cultura de ética, igualdade, diversidade e inclusão, e assegura saúde, bem-estar e conciliação entre vida profissional e pessoal, destacando-se na certificação do sistema de conciliação (NP 4552).

d. Estrutura Operacional e Âmbito Geográfico⁹

Com instalações localizadas em Lisboa, Porto e Coimbra, a INCM opera em edifícios com funções diversas (produção, armazenamento, serviços técnicos, atendimento público). O presente trabalho incide sobre os três edifícios do norte do país: a Contrastaria do Porto, a Livraria do Porto e a delegação da INCM no Goldpark (Gondomar). Estes edifícios apresentam características construtivas variadas, com contacto direto com o solo e condições de ventilação natural limitadas, inserindo-se em zonas classificadas com índice de suscetibilidade elevado de acordo com a Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2021).

e. Relevância Institucional^{10, 11}

A INCM assume um papel institucional de elevada responsabilidade e visibilidade pública. A implementação de uma política ativa de monitorização e controlo da exposição ao radão nos seus edifícios representa não apenas um imperativo legal e técnico, mas também um compromisso com a segurança e saúde ocupacional, responsabilidade ambiental e promoção de ambientes interiores saudáveis (APA, 2022a). A relevância da organização, enquanto agente de referência pública, justifica plenamente a sua escolha como caso de estudo no presente projeto.

A avaliação da concentração de radão nos edifícios localizados nas instalações da INCM no Norte do País, nomeadamente nos concelhos do Porto e Gondomar, enquadra-se nas obrigações decorrentes da legislação nacional em matéria de proteção radiológica.

De acordo com o Decreto-Lei n.º 108/2018 de 3 de dezembro, na sua atual redação, que transpõe para a ordem jurídica nacional a Diretiva 2013/59/Euratom, é obrigatória a monitorização inicial dos níveis de radão em todos os locais de trabalho.

A avaliação regular do radão não é apenas uma boa prática, mas uma exigência legal imperativa para garantir que não é ultrapassado o nível de referência (300 Bq/m³), bem como a garantia que a concentração de radão nos locais de trabalho seja tão baixa quanto razoavelmente possível abaixo do nível de referência, e caso não seja possível razoavelmente cumprir com o nível de referência, devem ser desencadeadas ações de mitigação para diminuir as concentrações de radão para valores abaixo do nível de referência. Se ainda assim os valores se mantiverem acima do nível de referência, considera-se uma situação de exposição planeada e como tal cumprir com os requisitos inerentes (Decreto-Lei n.º 108/2018, 2018; Harrison & Marsh, 2020).

A INCM, enquanto entidade de referência nacional com responsabilidades institucionais, está obrigada a assegurar as condições de segurança e salubridade nos locais de trabalho, prevenindo riscos ocupacionais

⁹ www.incm.pt/site/estrutura-organizacional/ (acedido em 19/12/2024)

¹⁰ www.incm.pt/site/responsabilidade-social/ (acedido em 19/12/2024)

¹¹ www.contrastaria.pt/institucional/contactos/ (acedido em 19/12/2024)

que possam comprometer a saúde dos trabalhadores e a conformidade legal da organização (Assembleia da República, 2009).

Assim, o presente estudo da exposição ao radão nos edifícios da Contrastaria do Porto, do Posto de Gondomar e da Livraria do Porto, tem por objetivo consolidar dados empíricos que permitam caracterizar o potencial risco existente. Através desta abordagem, pretende-se identificar potenciais não conformidades e fundamentar estratégias de prevenção e mitigação alinhadas com os requisitos legais definidos pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA).

A relevância do trabalho decorre da sua dupla dimensão: por um lado, constitui um contributo direto para a proteção da saúde e segurança dos trabalhadores, promovendo ambientes laborais mais seguros; por outro, representa uma mais-valia para a gestão organizacional da INCM, ao disponibilizar informação científica e operacional que pode sustentar decisões técnicas e administrativas em futuras ações de monitorização, melhoria contínua e planeamento de intervenções nos edifícios.

1.4.2 Conceitos e Definições

Radão (^{222}Rn), gás nobre radioativo, incolor e inodoro, resultante do decaimento do urânio presente nas rochas, nos solos e em alguns materiais de construção. Penetra nos edifícios por fissuras, juntas e interfaces entre o solo e fundações, acumulando em espaços interiores com ventilação limitada. A concentração expressa-se em concentração da atividade por m^3 de ar (Bq/m^3).

Produtos e decaimento do radão e equilíbrio, os descendentes do ^{222}Rn (sólidos) aderem a aerossóis e contribuem de forma determinante para a dose por inalação. O fator de equilíbrio (F) relaciona a atividade efetiva desses produtos com a que existiria em equilíbrio. Também expressa como Concentração Equivalente de Equilíbrio (EEC) em algumas estimativas operacionais.

Dose efetiva (E), medida do risco biológico associado à exposição a radiação ionizante, ponderada pelo tipo de radiação e pela radiosensibilidade dos tecidos (unidade: mSv/ano). Em contexto ocupacional, serve de ferramenta de apoio a decisões de gestão do risco.

Unidades e grandezas:

Becquerel (Bq): 1 desintegração por segundo (atividade).

Bq/m^3 : concentração da atividade de radão no ar interior.

Sv: unidade de dose efetiva, representa 1 Joule de energia por kg de matéria.

Valor de referência da concentração de radão, em Portugal para o ar interior (habitações e locais de trabalho) é $300 \text{ Bq}/\text{m}^3$ (média anual), casos que excedam este valor exigem avaliação e mitigação proporcionadas.

Áreas de suscetibilidade elevada, áreas onde $\geq 10\%$ dos edifícios ultrapassam o valor de referência nacional, a classificação decorre da RCM n.º 150-A/2022 e do mapa nacional de suscetibilidade ao radão.

Monitorização de curto prazo, diagnóstico com detetores eletrónicos, no caso deste estudo durante 10 dias, produzindo séries horárias que captam flutuações diurnas/semanas e efeitos de ventilação/ocupação,

principais objetivos caracterização dos espaços e verificação da eficácia da implementação de medidas de mitigação.

Monitorização de longo prazo, tem como objetivo a estimativa da média anual, efetuada com detetores de traços nucleares CR-39, tem uma duração ≥ 90 dias, podendo ser complementada por registos ativos sazonais prolongados.

Normas e guias técnicos, Diretiva 2013/59/EURATOM, Decreto-Lei n.º 108/2018 e Guias APA para empregadores e prestadores de serviços.

Parâmetros ambientais, temperatura do ar ($\Theta/^{\circ}\text{C}$) e humidade relativa (Hr, %) são registadas para contextualizar a variabilidade do radão e interpretar padrões sazonais.

A entidade alvo do estudo, Imprensa Nacional Casa da Moeda, S. A. (INCM) possui instalações em Lisboa, Porto e Coimbra. Este estudo incide sobre três edifícios no Norte (Área Metropolitana do Porto, zona de suscetibilidade elevada): Contrastaria do Porto, Livraria do Porto e Posto da Contrastaria de Gondomar.

Características dos locais avaliados, edifícios com contacto direto com o solo, caves, semicaves e ventilação natural limitada em alguns compartimentos (caves/pisos semienterrados) tipologias com maior suscetibilidade à acumulação de radão.

Equipamentos de medição.

Detetor eletrónico contínuo, RadonEye+² (FTLab), câmara de ionização por difusão acoplada a fotodíodo de silício permite uma primeira leitura após 10 min, atualização horária, conectividade para exportação de dados, apresenta uma boa linearidade e desempenho adequados para campanhas operacionais e avaliação de medidas.

Detetor passivo de traços nucleares, CR-39, dispositivo de estado sólido para medições ≥ 90 dias, aceites para estimar médias anuais e comparar com o valor de referência.

Fase 1, diagnóstico ativo (curto prazo), colocação de detetores eletrónicos em zonas críticas para perfis horários e identificação de variabilidade diurna e semanal.

Fase 2, longa duração (passiva e ativa), instalação de CR-39 (≥ 90 dias) e complementado com monitorização ativa em nos locais identificados como críticos na fase 1.

Parâmetros ambientais: registo simultâneo de $\Theta/^{\circ}\text{C}$ e Hr (%) por compartimento.

1.4.3 Enquadramento Legal e Normativo

A exposição ao radão é enquadrada por um sistema normativo multinível que integra orientações internacionais, europeias e nacionais, visando a proteção da saúde pública e ocupacional. A nível internacional, a Agência Internacional de Energia Atómica (IAEA) estabelece, através das *International Basic Safety Standards*, que os Estados devem adotar níveis de referência para a concentração de radão em habitações e locais de trabalho, recomendando que não ultrapassem 300 Bq/m³ como valor médio anual. Sempre que este limiar seja excedido, impõe-se a implementação de medidas corretivas, de forma a garantir que as exposições sejam mantidas tão baixas quanto razoavelmente possível (IAEA, 2014). Em

consonância com estas orientações, a UE aprovou a Diretiva 2013/59/Euratom, que fixa normas de segurança de base para proteção contra os perigos da exposição a radiações ionizantes, estabelecendo igualmente o valor de referência de 300 Bq/m³ no ar interior de habitações e locais de trabalho (EURATOM, 2014). No contexto português, esta diretiva foi transposta para o direito nacional através do Decreto-Lei n.º 108/2018, de 3 de dezembro, que define a aplicação prática destas disposições a habitações, locais de trabalho e edifícios de acesso público, reforçando a necessidade de medidas de monitorização e mitigação para salvaguardar a saúde dos trabalhadores e da população em geral.

De acordo com os guias técnicos da Agência Portuguesa do Ambiente, “Gestão da exposição ao radão nos locais de trabalho – Guia para empregadores” e a Nota Interpretativa N.º 1, as entidades empregadoras estão obrigadas a realizar medições de radão em conformidade com metodologias padronizadas, assegurando que os resultados sejam comparáveis ao nível de referência nacional. Caso, após a adoção de medidas de remediação, os valores se mantenham acima de 300 Bq/m³, deve ser efetuada uma avaliação de exposição, podendo a situação ser tratada como exposição existente (≤ 6 mSv/ano) ou, se exceder este valor, como exposição planeada, com aplicação de medidas adicionais como a classificação dos trabalhadores como expostos, monitorização individual e vigilância médica (Figura 5) (APA, 2022a, 2024; Decreto-Lei n.º 108/2018, 2018).

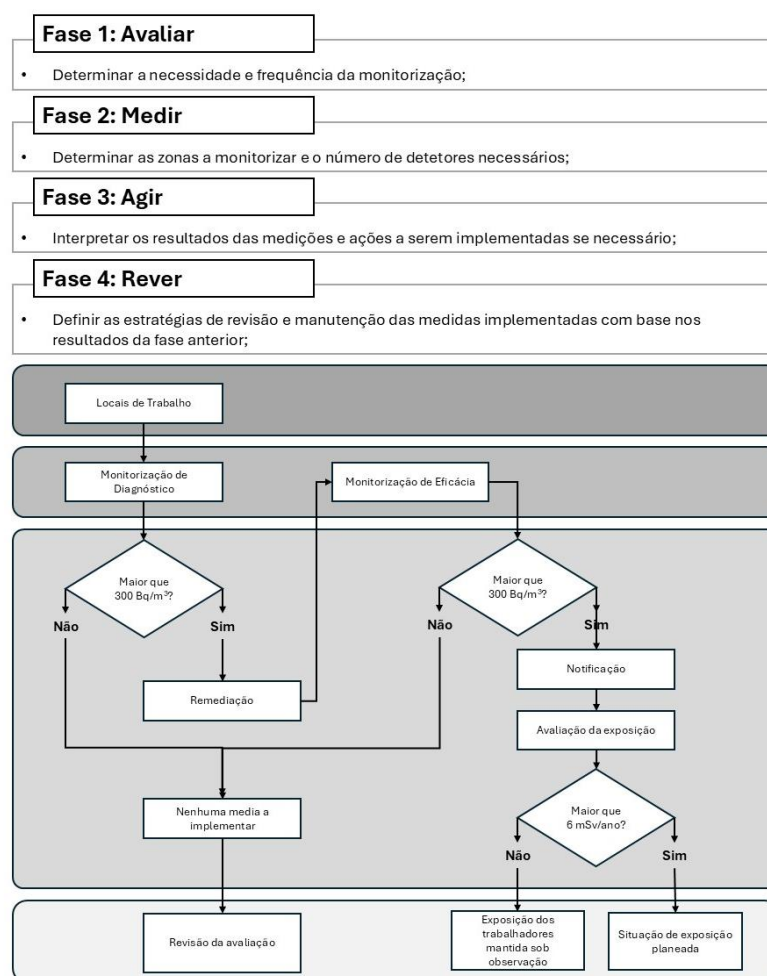


Figura 5 - Diagrama de Gestão de Risco de Exposição ao Radão

Nota: Adaptado de APA, 2022.

Adicionalmente, o PNRn, define medidas para a redução da exposição populacional, com especial atenção a edifícios escolares, hospitalares, de serviços públicos e locais de trabalho (Resolução do Conselho de Ministros 150-A, 2022).

No plano técnico, as medições devem seguir as orientações constantes dos Guias da APA e dos manuais técnicos do LNEC (APA, 2022c, 2022a, 2024; Luís Eduardo Pimentel Real & Jorge M. Grandão Lopes, 2020).

1.4.4 Conhecimento Científico

O conhecimento científico acumulado ao longo das últimas décadas sobre o ^{222}Rn revela um consenso consolidado quanto à sua perigosidade como fator de risco para a saúde humana, particularmente no desenvolvimento de cancro do pulmão (Harrison & Marsh, 2019; WHO, 2009). A preocupação com este agente radioativo surgiu na primeira metade do século XX, através de estudos epidemiológicos tendo como população alvo os trabalhadores das minas de urânio nos Estados Unidos, Checoslováquia e Alemanha que revelavam taxas elevadas de mortalidade por cancro do pulmão, muito superiores à média populacional (UNSCEAR, 2000). Estes trabalhadores estavam sujeitos a exposições muito elevadas a produtos de decaimento do radão em ambientes subterrâneos mal ventilados.

Durante as décadas de 1970 e 1980, os avanços na dosimetria e a implementação de estudos epidemiológicos controlados permitiram estabelecer uma relação causal clara entre a exposição crónica ao radão e a incidência de neoplasias pulmonares (Darby et al., 2005). Essa evidência fundamentou a decisão da Agência Internacional para a Investigação em Cancro (IARC), que em 1988 classificou oficialmente o radão como carcinogénico do Grupo 1, ou seja, com evidência suficiente de carcinogenicidade em humanos (IARC, 1988). A IARC é um organismo da Organização Mundial da Saúde, tendo sido criado a 20 de maio de 1965, Portugal é desde 7 de maio de 2025 membro oficial deste organismo fortalecendo deste modo o esforço global na pesquisa sobre o cancro.

A investigação sobre as neoplasias tem-se vindo a expandir, com destaque para os estudos sobre o contributo do radão. Recentemente, a investigação estendeu-se a ambientes residenciais, tendo vindo a confirmar-se que a exposição ao radão em habitações e locais de trabalho constitui, também, um importante fator de risco para a população em geral. Apenas recentemente a exposição a radiação natural, nomeadamente ao radão, foi formalmente integrada na legislação como componente da exposição ocupacional, passando a ser considerada não só em contextos subterrâneos, mas também em edifícios de utilização pública e locais de trabalho, exemplo é a Diretiva 2013/59/EURATOM e ratificada com a aprovação do Plano Nacional para o Radão, apenas em 2013 e 2022 respetivamente.

Estudos multicêntricos revelaram que, mesmo a concentrações inferiores a 300 Bq/m^3 , o risco relativo de cancro do pulmão aumenta de forma proporcional à dose acumulada, especialmente em indivíduos fumadores (ICRP, 2014; WHO, 2009). Atualmente, este consenso é suportado por investigações epidemiológicas de larga escala (Celen et al., 2023; UNSCEAR, 2020)

1.4.4.1 Natureza Física e Radioativa do Radão

O radão é um gás nobre radioativo, incolor, inodoro e insípido, resultante do decaimento radioativo natural do rádio-226 (^{226}Ra), um dos descendentes da série de decaimento radioativo do urânio-238 (^{238}U). O ^{238}U encontra-se naturalmente presente nas rochas, solos e materiais geológicos (IAEA, 2014; UNSCEAR, 2000). O ^{222}Rn é o único radionuclídeo gasoso desta série de decaimento. Com uma semivida de 3,82 dias, o radão tem tempo suficiente para migrar através de poros e fissuras no solo até à superfície e penetrar nos edifícios, acumulando-se em espaços interiores mal ventilados, onde pode atingir concentrações significativas (IAEA, 2014; WHO, 2009).

Durante o seu decaimento, o ^{222}Rn emite partículas alfa de elevada energia que, apesar do seu baixo poder de penetração na pele, apresentam um elevado potencial lesivo ao nível biológico quando inaladas (ICRP, 2014; WHO, 2009). Os seus produtos de decaimento sólidos, nomeadamente o polónio-218 (^{218}Po), chumbo-214 (^{214}Pb), bismuto-214 (^{214}Bi) e polónio-214 (^{214}Po), aderem-se às partículas em suspensão no ar e podem ser inalados profundamente para as vias respiratórias inferiores (UNSCEAR, 2000). Uma vez depositados no epitélio brônquico, estes radionuclídeos continuam a emitir radiação alfa, provocando ionização direta das células e dos tecidos, com capacidade para induzir mutações genéticas, alterações cromossómicas e lesões pré-neoplásicas (IAEA, 2014). A elevada densidade de ionização das partículas alfa, que depositam grande quantidade de energia num volume celular muito reduzido, confere-lhes uma perigosidade biológica superior à da radiação beta ou gama, justificando a sua maior periculosidade em termos de indução de efeitos estocásticos como o cancro (ICRP, 2014).

Estudos geofísicos detalhados demonstram que a exalação do radão à superfície terrestre está intrinsecamente associada a estruturas tectónicas ativas, como falhas geológicas, fraturas e zonas de cisalhamento, que funcionam como vias preferenciais para a migração dos gases radioativos desde as camadas profundas do solo até à atmosfera (Dicu et al., 2024; UNSCEAR, 2000). Estas estruturas facilitam o movimento ascendente do radão através da matriz rochosa por processos de difusão molecular e advecção gasosa, sendo esta última intensificada por gradientes de pressão induzidos por diferenças térmicas e hidrogeológicas (IAEA, 2014). A permeabilidade e porosidade das formações geológicas, em especial de rochas como granitos, fosforitos e xistos negros ricos em urânio, condicionam a quantidade de radão libertado para o ambiente (WHO, 2009). Esta interação entre a geodinâmica estrutural e a geoquímica do meio resulta numa elevada variabilidade espacial das concentrações de radão, com diferenças abruptas observadas em distâncias inferiores a 10 metros, o que torna complexa a modelação e previsão da exposição mesmo em áreas aparentemente homogéneas (Celen et al., 2023).

1.4.4.2 Acumulação em Ambientes Interiores

A acumulação de radão em ambientes interiores resulta da interação entre fontes naturais de emissão e características construtivas e funcionais dos edifícios que influenciam a sua retenção.

A principal fonte de radão é o solo subjacente, especialmente em formações graníticas ou vulcânicas com teores elevados de urânio e rádio. O radão é libertado durante o decaimento radioativo destes elementos migrando para o interior dos edifícios através de fissuras, fraturas, juntas estruturais e zonas de maior permeabilidade. A sua mobilidade é favorecida pela permeabilidade do solo e pela diferença de pressão

entre o interior do edifício e o subsolo (Dicu et al., 2024; IAEA, 2014). De acordo com diversos estudos, entre 80% e 95% do radão presente em espaços interiores tem origem nesta via, sobretudo em zonas de substrato granítico (Ferreira et al., 2014; UNSCEAR, 2020; WHO, 2009).

Uma segunda fonte potencial é representada pelos materiais de construção, particularmente aqueles produzidos a partir de matérias-primas com teores elevados de radionuclídeos naturais (como o ^{226}Ra) ou resíduos industriais com urânio e tório. Em Portugal, registaram-se casos históricos de utilização de rejeitados do processamento de urânio na zona da Urgeiriça, enquanto na Suécia, no período pós-guerra, o denominado “betão azul” (*blue concrete*), rico em rádio, originou concentrações elevadas de radão em habitações. Contudo, excluindo estas situações excecionais, o contributo dos materiais de construção é geralmente residual (inferior a 5%) face à emissão proveniente do subsolo (ICRP, 2014; Reste et al., 2022; Voltattorni et al., 2023).

A água da rede de abastecimento, sobretudo quando proveniente de captações subterrâneas profundas ou de poços privados, pode conter radão dissolvido, que se liberta para o ar durante a utilização doméstica (por exemplo, duches e lavagens). Apesar de, em condições normais de abastecimento público, o contributo desta via ser reduzido, inferior a 2% da concentração total, pode ser significativo em zonas rurais ou em sistemas de distribuição fechados e mal ventilados (WHO, 2009).

Por fim, a infiltração de ar exterior constitui uma fonte marginal, relevante apenas em áreas com concentrações ambientais elevadas, sendo geralmente desprezável face às restantes vias (ICRP, 2014).

A acumulação de radão em espaços interiores depende também de características construtivas (Figura 6) e condições de utilização do edifício, que condicionam a taxa de entrada e a eficiência da ventilação. Entre os fatores construtivos mais determinantes encontram-se: a ausência de barreiras anti-radão nas fundações; a existência de caves ou pisos semienterrados em contacto direto com o solo; a presença de fissuras, juntas mal vedadas e pavimentos permeáveis; e a estanquicidade excessiva dos edifícios modernos, frequentemente associada a estratégias de eficiência energética (Gillmore et al., 2018; Hansen et al., 2023).

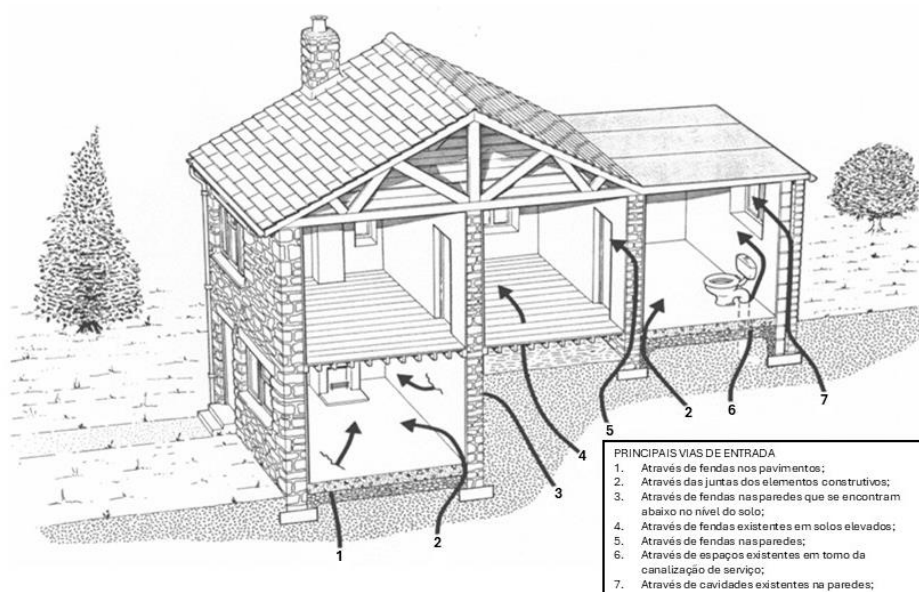


Figura 6 - Principais vias de Entrada Radão.

Nota: Adaptado de ICRP 2014.

Nos fatores funcionais, destacam-se o tempo de permanência em espaços fechados, o tipo e frequência de ventilação (natural ou mecânica) e a sazonalidade, dado que as maiores concentrações são habitualmente observadas nos meses frios, quando as janelas permanecem fechadas e ocorre inversão térmica (Kurkela et al., 2023; Vienneau et al., 2021).

Em suma, edifícios energeticamente eficientes, com elevada estanquicidade e reduzida renovação de ar, tendem a apresentar maiores concentrações médias de radão, sendo, portanto, essencial considerar simultaneamente a origem geológica e as condições construtivas e de ventilação na avaliação e mitigação do risco radiológico (Kojo & Kurtio, 2020; Reste et al., 2022; WHO, 2009).

1.4.4.3 Evidência Epidemiológica

A relação entre a exposição ao radão e o desenvolvimento de cancro do pulmão encontra-se solidamente estabelecida (WHO, 2009), não existindo evidência científica de um limiar seguro de exposição, razão pela qual a ICRP, recomenda que os níveis de radão sejam mantidos tão baixos quanto razoavelmente possível (ICRP, 2014; UNSCEAR, 2020; WHO, 2009).

Em Portugal, as zonas com substrato granítico, particularmente no norte do país, evidenciam uma maior suscetibilidade à acumulação de radão no ar interior dos edifícios, resultado da libertação deste gás a partir do solo e da sua consequente migração para o interior das construções. Esta tendência tem sido confirmada por estudos realizados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e pelo mapa de suscetibilidade desenvolvido pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA), que identificam as áreas graníticas como de suscetibilidade acrescida (APA, 2021).

As implicações ocupacionais e em saúde pública da exposição ao radão estão hoje enquadradas num sólido quadro normativo internacional e nacional.

Neste enquadramento, a resposta ao risco associado ao radão não se limita a uma perspetiva técnica ou em saúde pública, mas insere-se numa abordagem regulatória integrada, que articula a proteção da saúde dos trabalhadores e da população, políticas públicas de prevenção e estratégias de sustentabilidade, em conformidade com as recomendações internacionais da IAEA, da ICRP e da OMS.

Estudos posteriores têm vindo a reforçar o risco de exposição ao radão para saúde humana, análises combinadas, como foi o caso da análise combinada de (Darby et al., 2005), que integrou 13 estudos de caso-controlo europeus realizados em ambientes residenciais. Este estudo revelou que o risco relativo de cancro do pulmão aumenta cerca de 16% por cada incremento de 100 Bq/m³ na concentração média anual de radão em habitações, sendo esse efeito ainda mais pronunciado em fumadores. Resultados semelhantes foram obtidos por (Krewski et al., 2005) no Canadá e por (Torres-Durán et al., 2014) em Espanha, reforçando a consistência do risco em diferentes populações e diferente metodologias.

Estudos recentes, como o de (Celen et al., 2023), demonstraram também correlações significativas entre concentrações elevadas de radão e a incidência de carcinoma broncogénico, com observações de risco aumentado em populações não fumadoras. Estes dados sublinham o carácter estocástico da carcinogénese

induzida pelo radão e reforçam a necessidade da implementação de medidas que previnam a exposição a este contaminante do ar interior, uma vez que, mesmo exposições a concentrações abaixo do valor de referência de 300 Bq/m³ acarretam consequências potencialmente nefastas para a saúde (ICRP, 2014; WHO, 2009).

Os sintomas clínicos resultantes da exposição prolongada ao radão podem manifestar-se de forma insidiosa e são, em muitos casos, inespecíficos nos estágios iniciais. Os mais frequentemente relatados incluem tosse persistente (seca ou produtiva), produção de escarro, dispneia aos esforços e, ocasionalmente, dor torácica não específica (Celen et al., 2023; Wang et al., 2024). A presença destes sintomas pode preceder o diagnóstico clínico de cancro do pulmão, refletindo a ação cumulativa da radiação alfa sobre o epitélio brônquico. A exposição prolongada a concentrações elevadas de radão induz uma inflamação crónica das vias aéreas, podendo também agravar condições respiratórias pré-existentes como a doença pulmonar obstrutiva crónica ou tuberculose (DPOC) (WHO, 2009).

Com a progressão do dano celular, ocorrem mutações genéticas induzidas pela radiação que promovem alterações pré-neoplásicas. Numa fase mais avançada, a doença oncológica manifesta-se com sintomas mais graves como hemoptises, perda de peso, astenia marcada e sinais de invasão local ou metastização. Estudos clínicos evidenciam que muitos dos casos diagnosticados em não fumadores com adenocarcinoma pulmonar apresentam história de exposição crónica ao radão residencial ou ocupacional (Torres-Durán et al., 2014; WHO, 2009).

1.4.4.4 Exposição Ocupacional *versus* Exposição do Público em Geral

A distinção entre a exposição ocupacional e a exposição do público em geral baseia-se em critérios definidos no enquadramento legal e técnico da proteção radiológica, designadamente a natureza e intensidade da exposição, o tempo de permanência nos espaços e as condições de ventilação.

No caso da exposição ocupacional, esta ocorre nos locais de trabalho onde o radão pode atingir concentrações elevadas, nomeadamente em ambientes subterrâneos como minas, túneis, grutas turísticas ou instalações industriais implantadas em zonas graníticas. Nestes contextos, as concentrações de radão podem frequentemente ultrapassar 1000 Bq/m³, podendo mesmo atingir valores superiores a 3000 Bq/m³ em situações não controladas (Akkaş et al., 2025; IAEA, 2014).

A exposição dos trabalhadores é, em regra, limitada no tempo e associada a períodos concentrados de permanência diária, o que permite uma estimativa mais rigorosa da dose efetiva anual. De acordo com o Decreto-Lei n.º 108/2018, na sua redação atual, os trabalhadores devem ser classificados em:

- Categoria A, quando a dose anual efetiva excede 6 mSv, exigindo monitorização individual por serviços de dosimetria acreditados e vigilância médica específica;
- Categoria B, quando a dose se mantém abaixo de 6 mSv, mas acima dos níveis de referência que obrigam a monitorização ambiental e vigilância médica adequada ao risco identificado.

Esta classificação estabelece obrigações diferenciadas de controlo e acompanhamento, garantindo que a exposição ocupacional ao radão seja monitorizada e gerida segundo o princípio de que nenhum valor de exposição é seguro, assim os valores de exposição devem ser mantidos tão baixos quanto tecnicamente possíveis.

Por outro lado, a exposição do público em geral ocorre em habitações e outros espaços de uso não laboral, onde os indivíduos passam entre 60 e 90 % do tempo diário em ambientes interiores, segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2009). Trata-se de uma exposição crónica e contínua, que assume particular relevância em grupos vulneráveis, como crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias crónicas. Estudos realizados em países europeus, como Finlândia, Suíça e Espanha, evidenciam que, em habitações com concentrações superiores a 400 Bq/m³, a dose efetiva anual pode atingir valores entre 3 e 5 mSv/ano, sobretudo em casas térreas ou com caves mal ventiladas (Torres-Durán et al., 2014).

Importa salientar que a reabilitação energética dos edifícios, embora beneficie a eficiência térmica e ambiental, pode aumentar significativamente a acumulação de radão se não forem previstas soluções adequadas de ventilação. Intervenções como a substituição de janelas por modelos herméticos, o reforço do isolamento térmico de fachadas e coberturas, e a melhoria da estanquicidade geral do edifício reduzem as trocas de ar com o exterior, favorecendo a retenção de poluentes interiores, entre os quais o radão (ICRP, 2014; Resolução do Conselho de Ministros 150-A, 2022; UNSCEAR, 2020).

Estudos demonstram que, em edifícios reabilitados sem ventilação mecânica adequada, as concentrações de radão podem aumentar mais de 50% (Milner et al., 2014). A instalação de sistemas de ventilação mecânica com recuperação de calor (VMC-RC) constitui uma solução eficaz para compensar a redução da ventilação natural, garantindo uma renovação de ar suficiente e níveis seguros de qualidade do ar interior, em conformidade com as recomendações da OMS (WHO, 2009).

Em síntese, a gestão da exposição ao radão deve ter em conta as especificidades de cada contexto:

- Nos locais de trabalho, exige-se uma abordagem estruturada e regulamentar, centrada na avaliação das doses ocupacionais, classificação dos trabalhadores e implementação de medidas de mitigação;
- Na exposição do público, o enfoque deve recair na prevenção e mitigação passiva, através de boas práticas construtivas, ventilação adequada e monitorização periódica das habitações.

A compatibilização entre eficiência energética e segurança radiológica requer, portanto, uma abordagem integrada, em que as soluções de isolamento e vedação sejam acompanhadas de sistemas eficazes de ventilação e controlo ambiental, assegurando simultaneamente o conforto térmico, a eficiência energética e a proteção da saúde pública (IAEA, 2014; Milner et al., 2014; WHO, 2009)).

1.4.4.5 Avaliação da Dose Efetiva e Modelos de Exposição

A dose efetiva anual, expressa em milisieverts por ano (mSv/a), resulta da soma de todas as vias de exposição relevantes, incluindo a exposição interna, devida à inalação de radão e dos seus descendentes de decaimento, e a exposição externa, associada à radiação gama emitida a partir do solo e dos materiais de construção. O cálculo da dose depende de múltiplos fatores: a concentração do agente radioativo no ambiente (tipicamente em Bq/m³, no caso do radão), o tempo de exposição ou permanência em determinado espaço, a frequência dessa exposição e ainda a aplicação de fatores de conversão normalizados, que permitem traduzir a concentração do radionuclídeo e o regime de exposição em termos de dose efetiva recebida (IAEA, 2014; ICRP, 2014).

A duração da exposição é de aproximadamente 7000 horas/ano em contexto habitacional e de 2000 horas/ano para contexto ocupacional. Para a população portuguesa, onde se estima que mais de 85% do tempo diário seja passado em interiores, e considerando valores médios de concentração de radão entre 50 a 200 Bq/m³ em habitações na região Norte (APA, 2021), a dose anual devida à exposição ao radão em ambiente residencial poderá variar entre 0,8 e 2,6 mSv/ano. Estes valores aproximam-se ou ultrapassam o limite de dose para o público geral (1 mSv/ano) estabelecido pela legislação portuguesa (Decreto-Lei n.º 108/2018 de 3 de Dezembro, 2018).

Abordagens recentes procuram incorporar variáveis como a vulnerabilidade biológica da população (ex.: idade, comorbilidades), a tipologia construtiva dos edifícios (ex.: presença de caves, tipo de fundações, ventilação natural vs forçada) e o comportamento sazonal, dada a tendência para concentrações mais elevadas durante o inverno devido ao encerramento de janelas e menor ventilação natural (UNSCEAR, 2020; WHO, 2009).

Alguns estudos demonstram que a avaliação da dose efetiva anual pode ser significativamente subestimada quando se baseia exclusivamente na concentração de radão ignorando a contribuição dos seus produtos de decaimento de vida curta, como o ²¹⁸Po, o ²¹⁴Pb e o ²¹⁴Bi (ICRP, 2014; UNSCEAR, 2020). Os produtos de decaimento podem ser responsáveis por mais de 90% da dose efetiva recebida numa exposição prolongada, uma vez que permanecem aderidos às superfícies brônquicas após a deposição inicial (ICRP, 2014).

Em ambientes com concentrações médias de radão entre 200 e 400 Bq/m³, a dose efetiva anual estimada aumenta de 3,5 mSv para mais de 6 mSv, quando são considerados os produtos de decaimento. Assim, a integração dos progenitores radioativos na modelação da dose é essencial para uma avaliação realista do risco, particularmente em ambientes mal ventilados ou com ocupação prolongada (Silva & Dinis, 2022).

O enquadramento jurídico da exposição ao radão assenta em dois instrumentos fundamentais: os níveis de referência e os limites de exposição, ambos com força normativa distinta.

A nível europeu, a Diretiva 2013/59/EURATOM, de 5 de dezembro de 2013, estabeleceu as normas de segurança de base relativas à proteção contra os perigos resultantes da exposição às radiações ionizantes, introduzindo pela primeira vez disposições explícitas para o radão em ambientes interiores. O artigo 74.º fixa em 300 Bq/m³ o valor de referência para a concentração de radão em habitações e locais de trabalho, impondo aos Estados Membros a obrigação de adotar Planos Nacionais de Ação para o radão. Este valor, de natureza regulatória, mas não absoluta, constitui um limiar a partir do qual devem ser promovidas medidas de mitigação e monitorização, sem significar que concentrações inferiores estejam isentas de risco (EURATOM, 2014).

Relativamente aos limites de exposição, o Decreto-Lei n.º 108/2018 segue o disposto no artigo 9.º da Diretiva 2013/59/EURATOM, estabelecendo como dose efetiva máxima para trabalhadores expostos o valor de 20 mSv/ano.

Por fim, importa destacar que a Resolução do Conselho de Ministros n.º 150-A/2022, de 15 de dezembro, aprovou o PNRn, dando execução ao artigo 103.º do Decreto-Lei n.º 108/2018 e operacionalizando as disposições da diretiva europeia. O PNRn define as responsabilidades setoriais, estabelece programas de medição em edifícios existentes e promove a integração do risco de radão nos regulamentos técnicos da construção.

Deste modo, a legislação portuguesa articula o valor de referência (300 Bq/m³) como instrumento de ação preventiva e os limites de exposição (6 e 20 mSv/ano) como instrumentos de proteção vinculativa, assegurando a conformidade com as obrigações europeias e internacionais de proteção radiológica.

1.4.4.6 Dose efetiva devida apenas ao radão

Para efeitos de controlo radiológico, a dose efetiva anual devida à inalação de radão é determinada com base na concentração média de radão no ar, no tempo de exposição anual, no fator de equilíbrio entre o radão e os seus descendentes, e no coeficiente de conversão recomendado pelas entidades internacionais, pode ser determinado através das expressões matemáticas que se seguem, e é expressa em milisieverts por ano (mSv/ano), (APA, 2022a, 2024):

$$E = DCF \cdot C(RA) \cdot F \cdot t$$

Onde:

- E = Dose efetiva (mSv);
- DCF = Coeficiente de dose (mSv.Bq⁻¹.h.m⁻³);
- C(RA) = Concentração de atividade em radão (Bq.m⁻³);
- F = Fator de equilíbrio entre o radão e os seus descendentes (normalmente 0,4);
- t = Tempo de exposição em horas;

1.4.4.7 Dose efetiva ao radão e seus descendentes

$$E = DCF \cdot t \cdot PAEC$$

Onde:

- E = Dose efetiva (mSv/ano);
- DCF = Coeficiente de dose (mSv.mJ⁻¹.m⁻³.h⁻¹);
- t = Tempo de exposição (horas)
- PAEC = Concentração de energia alfa potencial (J.m⁻³);

$$PAEC = F \cdot C(AR) \cdot 5,56 \times 10^{-9}$$

Onde:

- F = Fator de equilíbrio entre o radão e os seus descendentes;
- C(AR) = Concentração de atividade em radão no ar (Bq.m⁻³);
- 5,56×10⁻⁹ J. Bq⁻¹ corresponde à energia alfa potencial libertada por cada decaimento de radão;

$$F = \frac{EEDC}{C(AR)}$$

Onde:

- EEDC = concentração equivalente de produtos de decaimento, ou seja, a concentração total de energia alfa dos descendentes de curta vida (^{218}Po , ^{214}Bi) (Bq.m^{-3});
- $C(\text{AR})$ = Concentração de atividade de radão no ar (Bq.m^{-3})

O coeficiente de dose (DCF), encontra-se definido no ICRP, para duas situações distintas, residências e locais de trabalho, onde para locais de trabalho o $\text{DCF} = 7,8 \times 10^{-6} \text{ mSv/Bq.h.m}^{-3}$, enquanto para residências o $\text{DCF} = 6,3 \times 10^{-6} \text{ mSv/Bq.h.m}^{-3}$.

1.4.4.8 Metodologias de Medição e Limitações

A medição da concentração de radão em espaços interiores pode ser realizada através de dois grandes grupos de dispositivos: detetores passivos e detetores ativos. Entre os primeiros, destacam-se os detetores de traços sólidos do tipo CR-39 (*track-etch detectors*) (Figura 7), amplamente reconhecidos pela sua robustez e fiabilidade. Estes dispositivos funcionam sem necessidade de energia elétrica, baseando-se num polímero sensível à radiação alfa. Durante a exposição ao radão, as partículas alfa libertadas pelos produtos de decaimento do gás produzem microdanos na superfície do polímero, os quais, após revelação química e análise microscópica, permitem quantificar a concentração média acumulada ao longo de períodos prolongados, geralmente entre três meses a um ano (IAEA, 2014; UNSCEAR, 2020).



Figura 7 - Detetor CR-39.

Nota: Adaptado de Tecnorad.it

A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) recomenda o uso deste método como padrão para a monitorização de diagnóstico e de eficácia em habitações e locais de trabalho, conforme estabelecido pela APA no Guia para a prestação de serviços na medição de radão por detetores passivos (APA, 2022b). Esta orientação encontra-se alinhada com as diretrizes internacionais da IAEA e da ICRP, que apontam os detetores CR-39 como a abordagem mais adequada para garantir a comparabilidade de resultados e a representatividade das concentrações anuais de radão (IAEA, 2014; ICRP, 2014). A sua adoção generalizada justifica-se por diversas razões: custo reduzido, facilidade de aplicação em larga escala, inexistência de requisitos de manutenção durante o período de exposição e elevada fiabilidade estatística quando aplicados em campanhas populacionais.

Contudo, importa sublinhar que, apesar destas vantagens, os detetores passivos não fornecem dados em tempo real e não permitem avaliar as flutuações diárias ou sazonais da concentração de radão. Nestes contextos, os detetores ativos, assumem relevância complementar, sobretudo em estudos de dinâmica temporal ou na verificação de medidas de mitigação.

Por outro lado, os detetores ativos utilizam sensores eletrónicos com registo contínuo da concentração de radão, fornecendo medições em intervalos curtos (ex.: cada 10 minutos). O RadonEye+² (Figura 8), é um dos monitores mais utilizados em avaliações rápidas e de diagnóstico; opera com uma câmara de ionização e deteção de impulsos alfa, permitindo leituras quase em tempo real com elevada sensibilidade (Dimitrova et al., 2023). Estes dispositivos são particularmente úteis para identificar padrões temporais, avaliar o impacto de estratégias de mitigação e testar a eficácia da ventilação. No entanto, exigem calibração periódica, podem ser afetados por variações de temperatura e humidade e têm custos mais elevados (Dimitrova et al., 2023; IAEA, 2014).



Figura 8 - Detetor RadonEye+²

Nota: Adaptado de radonshop.co.uk

A aplicabilidade de cada tipo de equipamento depende do objetivo da medição: para avaliações legais e de exposição prolongada, os detetores passivos como o CR-39 são recomendados por cumprirem as normas ISO 11665 e permitirem estimar uma média anual para o valor de radão, dada a elevada variabilidade dos níveis de radão no ar interior. A concentração de radão no ar interior é influenciada por diversos fatores, não sendo possível especificar e quantificar a totalidade destes fatores. Em estudos exploratórios, validação de intervenções ou monitorização dinâmica, é possível usar detetores ativos tais como o RadonEye+² que permitem medir os níveis de radão presentes (IAEA, 2014; WHO, 2009).

Alguns ensaios comparativos internacionais têm vindo a demonstrar que os monitores eletrónicos de baixo custo, como o RadonEye+², podem constituir uma alternativa válida aos sistemas tradicionais, desde que a sua utilização seja acompanhada de procedimentos rigorosos de calibração e verificação metrológica. Estes estudos mostram que, quando devidamente calibrados em laboratórios acreditados, estes monitores apresentam níveis de exatidão e repetibilidade aceitáveis para aplicações de rastreio, avaliação rápida de risco e verificação de medidas de mitigação (Dimitrova et al., 2023).

1.4.4.9 Estratégias de Prevenção e de Mitigação

A mitigação da concentração de radão em ambientes interiores assenta na aplicação de estratégias de engenharia destinadas a reduzir a infiltração do gás proveniente do solo ou a promover a sua remoção eficiente através de sistemas de ventilação e pressurização. A seleção da técnica mais adequada depende de múltiplos fatores, designadamente a origem da exposição, a tipologia construtiva do edifício e, de forma determinante, o nível de concentração medido (APA, 2022a; IAEA, 2014; ICRP, 2014).

De acordo com o Guia da APA para a prestação de serviços na medição de radão e com a Nota Interpretativa n.º 1 (APA, 2024), as medidas de mitigação devem ser proporcionais à magnitude da exposição detetada. Assim, quando os valores médios anuais de concentração de radão no ar interior excedem o nível de referência nacional de 300 Bq/m³, torna-se obrigatório implementar ações corretivas para reduzir a exposição dos ocupantes. O objetivo primário é atingir concentrações inferiores a 300 Bq/m³, contudo, sempre que possível, recomenda-se que os níveis sejam reduzidos para valores ainda mais baixos, sendo que a OMS recomenda que os níveis de radão sejam inferiores a 100 Bq/m³. (APA, 2022b, 2022a, 2024; IAEA, 2014).

- a. Ventilação mecânica controlada (VMC): A instalação de sistemas de ventilação mecânica controlada (VMC), com ou sem recuperação de calor (VMC-RC), constitui uma das abordagens mais eficazes na redução das concentrações de radão em ambientes interiores. Estes sistemas promovem a renovação contínua do ar, reduzindo a acumulação do gás, especialmente em espaços onde a ventilação natural é insuficiente. Estudos demonstram reduções entre 50% e 80% quando corretamente dimensionados e mantidos (Eduardo Pimentel Real et al., 2020; WHO, 2009). A eficácia está fortemente dependente da correta adaptação ao tipo de ocupação e da manutenção periódica. Em termos de custos, trata-se de uma solução intermédia a elevada, dado o investimento inicial em equipamentos e o consumo energético associado, embora a inclusão de recuperação de calor permita maior eficiência energética a médio prazo. Na (Figura 9) encontra-se representado um sistema de ventilação por pressurização do edifício.

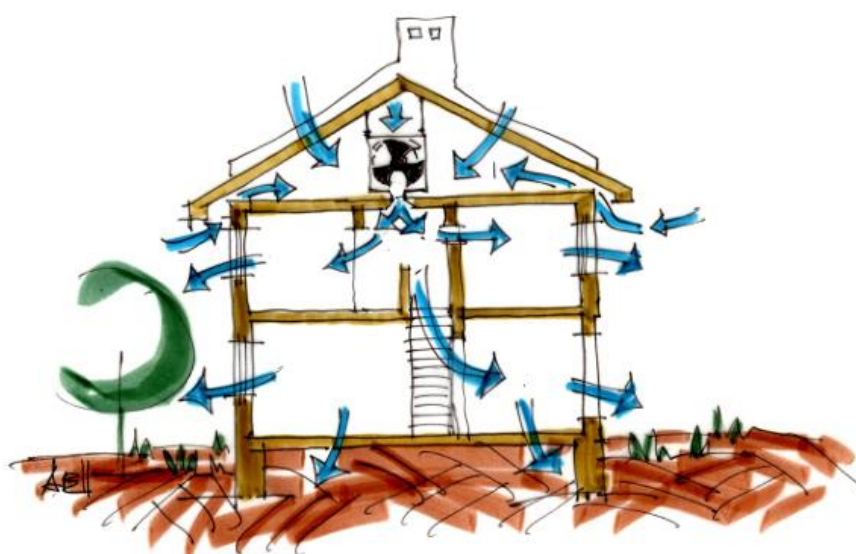


Figura 9 - Esquema de um sistema de pressurização.

Nota: Adaptado de LNEC

- b. Selagem de fissuras e juntas estruturais: A vedação de aberturas, juntas de dilatação, fendas em lajes de betão e passagens técnicas é uma medida essencial como intervenção inicial, ao impedir a entrada de radão proveniente do subsolo. Esta solução é particularmente aplicável em edifícios com concentrações moderadas ($100\text{--}300\text{ Bq/m}^3$), onde pode alcançar reduções da ordem dos 30% a 50% (IAEA, 2014). Contudo, raramente é suficiente como medida isolada, devendo ser associada a estratégias de ventilação ou despressurização. Representa uma solução de baixo custo relativo, já que envolve essencialmente trabalhos de construção e materiais selantes, mas exige monitorização para garantir a durabilidade da intervenção.
- c. Barreiras anti radão: A aplicação de membranas selantes ou películas de baixa permeabilidade ao radão (por exemplo, em polietileno de alta densidade) sob lajes de fundação ou entre pisos (Figura 10), é uma estratégia preventiva eficaz, sobretudo em edifícios de nova construção. Quando corretamente executadas, estas barreiras podem reduzir a infiltração de radão em mais de 90% (Luís Eduardo Pimentel Real & Jorge M. Grandão Lopes, 2020; WHO, 2009). A sua implementação requer elevada qualidade técnica na instalação, garantindo continuidade e estanqueidade, sob pena de comprometer a eficácia. Os custos são considerados moderados a elevados, mas são significativamente mais económicos quando aplicados na fase de construção do edifício, em comparação com intervenções retroativas.

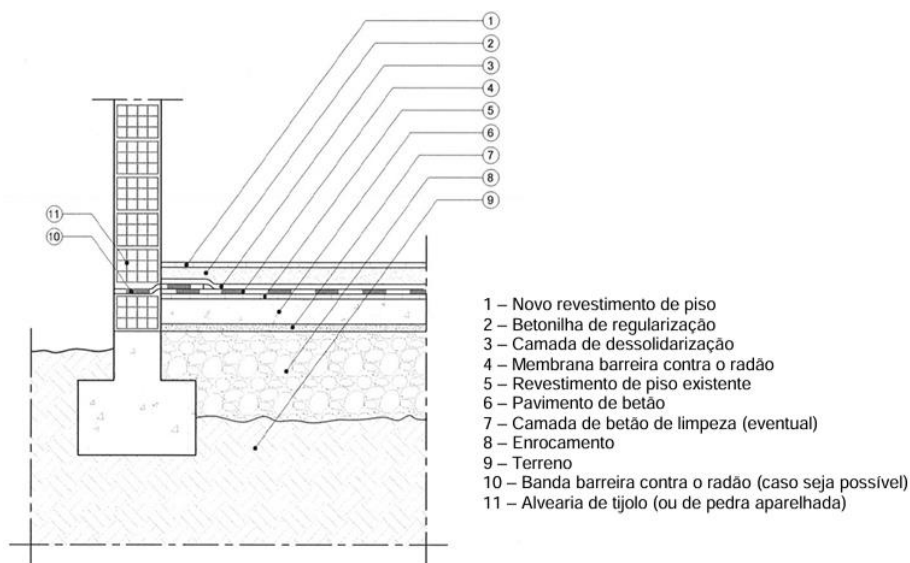


Figura 10 - Membrana barreira contra o radão aplicada sobre o revestimento de piso existente.

Nota: Adaptado de LNEC

- d. Sistemas de despressurização do solo (*Sub-slab depressurization – SSD*): Os sistemas de despressurização do solo constituem a técnica de mitigação mais eficaz em edifícios com concentrações elevadas ou muito elevadas ($> 500\text{ Bq/m}^3$). O método consiste na instalação de um sistema de extração de ar sob a laje de fundação, criando uma pressão negativa que impede a migração do radão para o interior (Figura 11). A literatura científica e técnica reporta reduções que podem ultrapassar os 95% (IAEA, 2014; WHO, 2009). Apesar da sua elevada eficácia, trata-se de

uma solução com custos mais elevados de implementação e manutenção, exigindo intervenção especializada e monitorização regular do desempenho do sistema.

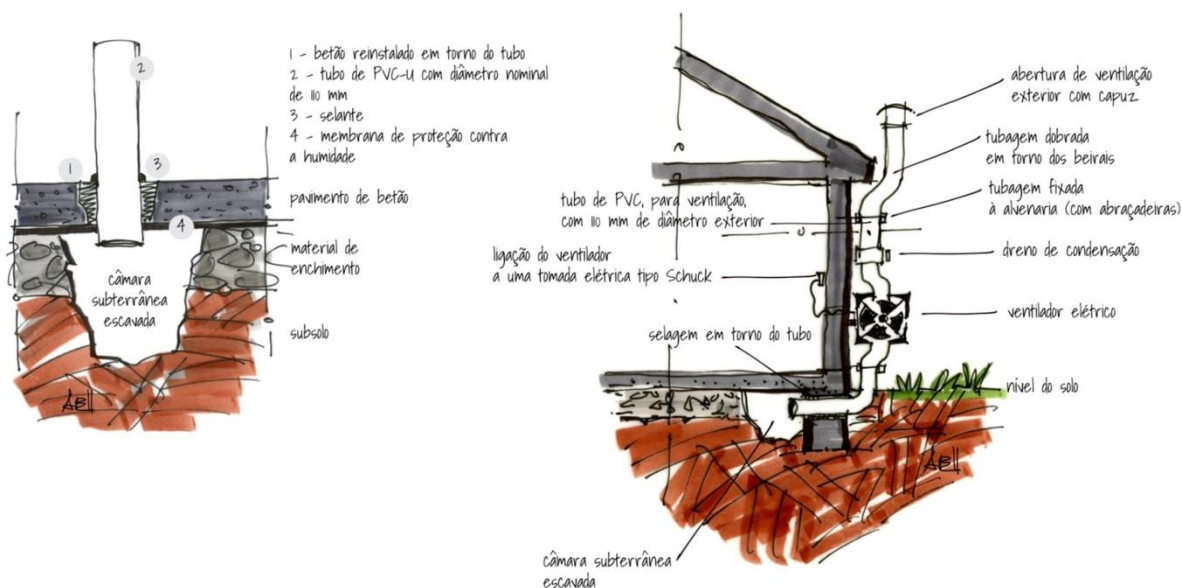


Figura 11 - Exemplo da instalação de um sistema de despressurização do solo

Nota: Adaptado de LNEC

A escolha da estratégia ou combinação de estratégias deve considerar uma avaliação prévia das vias de entrada, características construtivas e condições de ocupação. A eficácia global depende da correta implementação, monitorização contínua e sensibilização dos utilizadores (APA, 2022b). A mitigação do radão representa, assim, uma medida de saúde pública de elevada relação custo-benefício, particularmente em zonas de risco elevado e em edifícios com elevada densidade de ocupação (UNSCEAR, 2020; WHO, 2009).

1.4.4.10 Metodologia de pesquisa de informação

A pesquisa bibliográfica seguiu os princípios do *PRISMA Statement*, assegurando a reprodutibilidade, rastreabilidade e transparência dos procedimentos adotados.

- a) Estratégia de pesquisa – Palavras-chave e combinações: As palavras-chave foram agrupadas em quatro conjuntos, concebidos para cobrir as diversas dimensões do tema radão, nomeadamente saúde, exposição ocupacional, risco oncológico e métodos de quantificação:
 - Grupo 1: *Radon, Health, Building OR Structure OR House*
 - Grupo 2: *Radon, Exposure, Radiation, Workplace OR Occupational*
 - Grupo 3: *Radon, Disease, Cancer, Exposure, Workplace OR Home OR Dwelling*
 - Grupo 4: *Radon, Quantification, Methodology, Methods*

Estas combinações foram aplicadas nas bases de dados SCOPUS, Web of Science e ScienceDirect.

- b) Bases de dados consultadas e resultados:

- SCOPUS: Identificados 3800 artigos; após aplicação de filtros de idioma, tipo de publicação e relevância, foram mantidos 36 artigos.

-
- Web of Science: Identificados 3012 artigos; após a aplicação dos critérios de seleção, data de publicação, língua e tipo de documento, 22 artigos foram considerados relevantes.
 - ScienceDirect: Identificados 6199 artigos; 28 artigos foram retidos após aplicação dos filtros de qualidade e elegibilidade.

No total, a pesquisa sistemática abrangeu 13097 registos iniciais.

c) Critérios de inclusão e exclusão: A triagem obedeceu aos seguintes requisitos:

- Período temporal: Artigos publicados entre 2020 e 2025.
- Tipo de documento: Exclusivamente artigos científicos, sujeitos a revisão por pares.
- Idioma: Apenas artigos em inglês.

Após eliminação de 47 duplicações e exclusão de 9 artigos por impossibilidade de acesso integral, a amostra final incluiu 30 artigos.

1.4.4.11 Resultados da pesquisa

a) Número de artigos excluídos e justificação:

Do total de artigos inicialmente selecionados (86), foram rejeitados 47 por duplicação entre bases e 9 por indisponibilidade de conteúdo integral.

b) Diagrama PRISMA:

De forma a ilustrar graficamente o processo de seleção, exclusão e inclusão, é apresentado o diagrama de fluxo PRISMA (Figura 12).

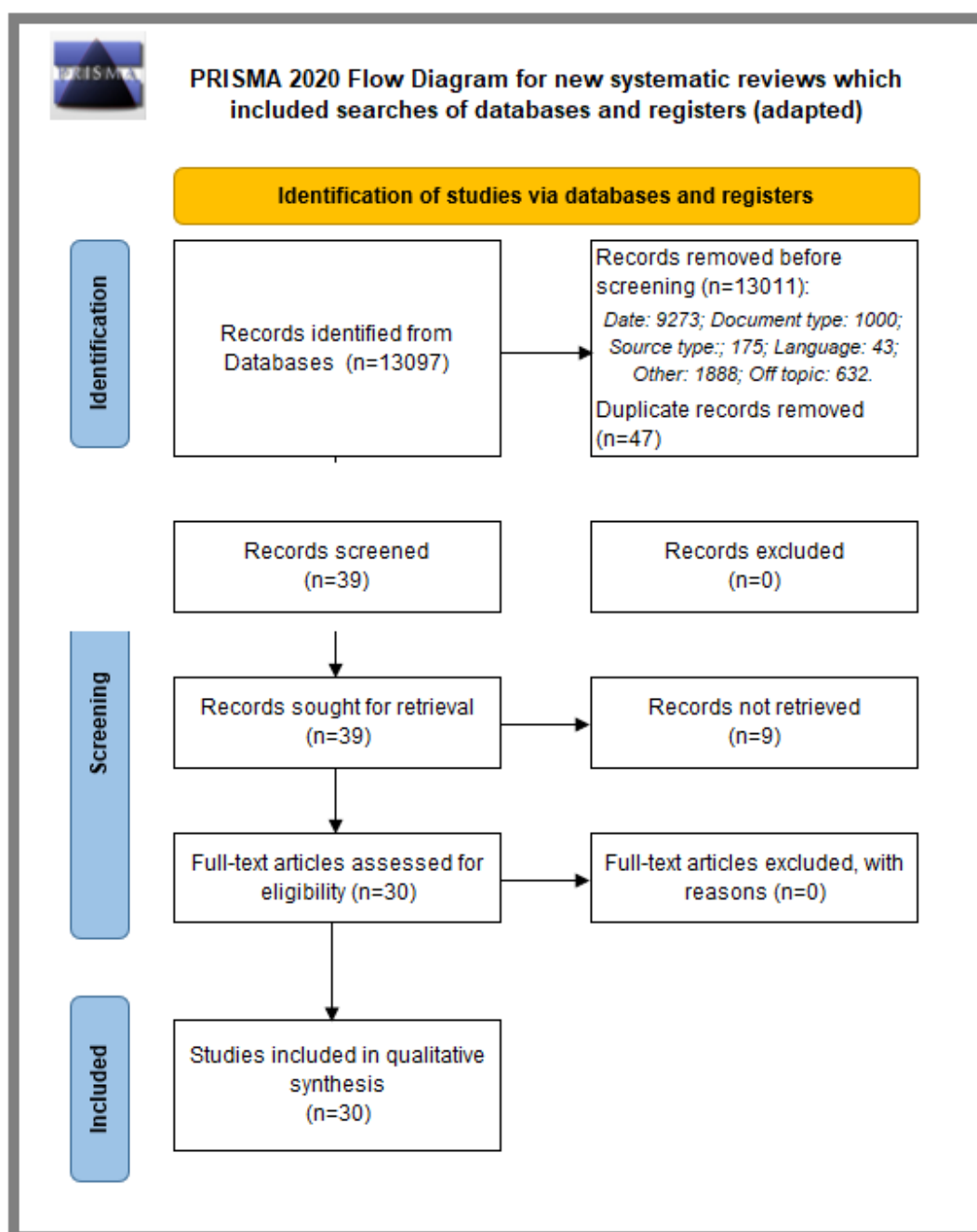


Figura 12 - Diagrama de fluxo PRISMA.

c) Tabelas de síntese:

Para garantir a clareza metodológica, são incluídas duas tabelas de síntese:

- Tabela 1 - Caracterização metodológica dos artigos selecionados, contexto geográfico e problemática
- Tabela 2 - População alvo, variáveis em estudo e principais resultados e limitações.

Estas tabelas complementam a análise crítica, possibilitando uma consulta rápida dos parâmetros fundamentais de cada estudo, assegurando a coerência da revisão e facilitando futuras replicações

Tabela 1 - Caracterização metodológica dos artigos selecionados, contexto geográfico e problemática

Autores, Ano	Título	País / Região	Problemática em estudo
Gavin K. Gillmore, Robin G. M. Crockett, Paul S. Phillips, 2018	Radon as a Carcinogenic Built-Environmental Pollutant	Reino Unido	Analisar a distribuição do radão, métodos de medição, riscos associados à exposição e medidas de mitigação no contexto de políticas e regulamentações globais.
J.D. Harrison, J.W. Marsh, 2019	ICRP Recommendations on Radon	Reino Unido	Revisar as publicações da ICRP sobre proteção contra o radão e propor coeficientes de dose efetiva para exposições em ambientes domésticos e de trabalho.
Zhaokun Wang, et al, 2020	Residential radon decay products are associated with cough and phlegm in patients with COPD	Estados Unidos (Massachusetts, especialmente Boston e arredores)	Examinar a relação entre PR de origem interna e externa com tosse, expetoração e qualidade de vida relacionada à saúde (HRQL) em pacientes com DPOC.
Danielle Vienneau, et al, 2020	Residential radon – Comparative analysis of exposure models in Switzerland	Suíça	Desenvolver e avaliar modelos de previsão de concentrações de radão em residências para melhorar análises epidemiológicas, incluindo mortalidade por câncer
Mihail Simion Beldean-Galea, et al, 2020	Evaluation of indoor air pollutants in 100 retrofit residential buildings from Romania during cold season	Roménia	Investigar a qualidade do ar interior em edifícios retrofitados, avaliar a relação entre parâmetros de ventilação e concentrações de poluentes, e propor recomendações para gestão de qualidade do ar interior.
Jeffrey J. Whicker Michael W. McNaughton, 2020	Work to Save Dose: Contrasting Effective Dose Rates from Radon Exposure in Workplaces and Residences Against the Backdrop of Public and Occupational Regulatory Limits	Estados Unidos (Novo México)	Avaliar e comparar a exposição ao radão em escritórios e residências no mesmo condado, analisando as implicações para a proteção radiológica.
Pam Warkentin, et al, 2020	A Comparison of Consumer-Grade Electronic Radon Monitors	Canadá	Fornecer uma avaliação imparcial do desempenho de monitores de radão de consumo e determinar fatores importantes para mitigações informadas por esses dispositivos.
Anna Grzywa-Celińska, 2020	Radon—The Element of Risk. The Impact of Radon Exposure on Human Health	Polónia	Explorar a relação entre a exposição ao radão e o cancro do pulmão, com ênfase em mecanismos carcinogénicos e medidas de mitigação.
J D Appleton, et al, 2020	Radon Gas Hazard	Reino Unido	Descrever as origens do radão, seus efeitos na saúde humana, métodos de medição e estratégias de mitigação, com base em dados geológicos e medições em edifícios.
Katja Kojo, Päivi Kurttio, 2020	Indoor Radon Measurements in Finnish Daycare Centers and Schools—Enforcement of the Radiation Act	Finlândia	Realizar medições sistemáticas de radão em centros de dia e escolas em áreas de alto risco e garantir o cumprimento das regulamentações nacionais.
Sara Antignani, et al, 2021	A 10-year follow-up study of yearly indoor radon measurements in homes, review of other studies and implications on lung cancer risk estimates	Itália	Avaliar a variabilidade interanual das concentrações de radão em casas habitadas e discutir o impacto dessa variabilidade na estimativa do risco de câncer de pulmão.
Atsuyuki Sorimachi, et al, 2021	Comparison experiments for radon and thoron measuring instruments at low-level concentrations in one room of a Japanese concrete building	Japão	Comparar a precisão de diferentes instrumentos de medição de ^{222}Rn e ^{220}Rn (monitores contínuos e detetores passivos) para verificar variações nos resultados e fatores que afetam as medições.
Justin A. Simms, et al, 2021	Younger North Americans Are Exposed to More Radon Gas Due to Occupancy Biases Within the Residential Built Environment	América do Norte (Canadá e Estados Unidos)	Examinar a relação entre a exposição ao radão e as características das habitações residenciais e dos ocupantes. Avaliar os níveis de radiação por partículas alfa em diferentes períodos de construção e idades dos ocupantes.

<i>Filomena Loffredo, et al, 2021</i>	<i>Indoor Radon Concentration and Risk Assessment in 27 Districts of a Public Healthcare Company in Naples, South Italy</i>	<i>Itália</i>	<i>Determinar concentrações de radão, calcular a dose efetiva anual para trabalhadores e avaliar o risco de cancro pulmonar associado à exposição prolongada.</i>
<i>Jelena Reste, et al, 2021</i>	<i>Indoor Air Radon Concentration in Premises of Public Companies and Workplaces in Latvia</i>	<i>Letónia</i>	<i>Avaliar as concentrações de radão em ambientes interiores e propor estratégias para reduzir a exposição em locais com níveis elevados.</i>
<i>Lopes, S.I.; Nunes, L.J.R.; Curado, 2021</i>	<i>Designing an Indoor Radon Risk Exposure Indicator (IRREI): An Evaluation Tool for Risk Management and Communication in the IoT Age</i>	<i>Portugal</i>	<i>Criar uma ferramenta intuitiva para auxiliar na gestão de riscos relacionados ao radão, utilizando dados em tempo real e integrando dimensões regulatórias, espaciais e temporais.</i>
<i>Preethi Gopalakrishnan, J. Jeyanthi, 2022</i>	<i>Importance of radon assessment in indoor Environment-a review</i>	<i>Índia</i>	<i>Discutir a importância da avaliação de radão em ambientes interiores, identificando fontes, fatores de dispersão e impactos na saúde, e propor medidas de prevenção.</i>
<i>Ivelina Dimitrova, et al, 2022</i>	<i>Study of the performance and time response of the RadonEye Plus2 continuous radon monitor</i>	<i>Bulgária e França</i>	<i>Investigar a linearidade, a reprodutibilidade e o tempo de resposta do RadonEye Plus2, comparando-o a outros monitores comerciais para uso em medições de radão em interiores.</i>
<i>Olli Kurkela, et al, 2022</i>	<i>Lung Cancer Incidence Attributable to Residential Radon Exposure in Finland</i>	<i>Finlândia</i>	<i>Quantificar os casos evitáveis de cancro do pulmão atribuíveis ao radão residencial, considerando idade, sexo, tipo de habitação e status de fumador. Avaliar o efeito conjunto do radão e do tabaco no risco de cancro do pulmão. Estimar a redução de casos com mitigação do radão acima de níveis de ação (100, 200, 300 Bq/m³).</i>
<i>David B. Richardson, et al, 2022</i>	<i>Lung Cancer and Radon: Pooled Analysis of Uranium Miners Hired in 1960 or Later</i>	<i>Canadá, República Checa, França, Alemanha, Estados Unidos</i>	<i>Avaliar o risco de mortalidade por cancro do pulmão em mineiros expostos a baixas concentrações de radão e seus produtos de decaimento em condições contemporâneas.</i>
<i>Leonel J. R. Nunes, et al, 2022</i>	<i>Impacts of Indoor Radon on Health: A Comprehensive Review on Causes, Assessment and Remediation Strategies</i>	<i>Portugal</i>	<i>Analisar os efeitos do radão na saúde, estabelecer uma relação entre a exposição ao radão e o cancro do pulmão e propor estratégias de mitigação para edifícios existentes e em construção.</i>
<i>Mc Laughlin, J.P.; Gutierrez-Villanueva, J.-L.; Perko, T., 2022</i>	<i>Suggestions for Improvements in National Radon Control Strategies of Member States Which Were Developed as a Requirement of EU Directive 2013/59 EURATOM</i>	<i>União Europeia</i>	<i>Identificar lacunas nas estratégias nacionais de controlo do radão e propor melhorias, com foco em comunicação, regulamentos de construção, financiamento e proteção de grupos vulneráveis.</i>
<i>Yonca Yahsi Celen, et al, 2023</i>	<i>Measuring radon concentration and investigation of its effects on lung cancer</i>	<i>Turquia (Balıkesir)</i>	<i>Medir a concentração de radão em duas instalações (hospital e edifício educacional) e avaliar o risco associado ao cancro do pulmão.</i>
<i>Voltattorni, N.; Gasparini, A.; Galli, G, 2023</i>	<i>The Analysis of ²²²Rn and ²²⁰Rn Natural Radioactivity for Local Hazard Estimation: The Case Study of Cerveteri (Central Italy)</i>	<i>Itália</i>	<i>Avaliar a concentração de radão e torão para identificar fontes e padrões de distribuição, com foco em riscos para a saúde e uso do solo.</i>
<i>Violeta Hansen, et al, 2023</i>	<i>Indoor radon survey in Greenland and dose assessment</i>	<i>Gronelândia</i>	<i>Avaliar concentrações de radão em residências, associar essas concentrações com a geologia local e calcular a dose anual média efetiva devido à inalação de radão em adultos.</i>
<i>Rebecca A. Stern, et al, 2023</i>	<i>Radon sampling methodologies: A case for accurate, accessible measurements using household instruments</i>	<i>Estados Unidos</i>	<i>Validar a precisão de instrumentos domésticos acessíveis para medição contínua de radão e compará-los com dispositivos de grau de pesquisa.</i>
<i>I. Dimitrova, V. Todorov, S.</i>	<i>Real time monitoring of Rn-222 in workplaces and estimation of working time correction factor</i>	<i>Bulgária</i>	<i>Avaliar a variabilidade sazonal e semanal da concentração de radão em locais de trabalho, propor correções no cálculo da</i>

Georgiev, K. Mitev, 2024			exposição ao radão durante o horário laboral e analisar o impacto de padrões comportamentais e condições ambientais.
Akkaş, A., et al, 2024	Measurement of radon concentration in metro stations of Istanbul, Türkiye	Turquia (Istambul)	Medir a concentração de radão em várias linhas de metro e avaliar a dose anual recebida por passageiros e trabalhadores devido à exposição a este gás.
I. Dimitrova, et al, 2024	Calibration and metrological test of the RadonEye Plus2 electronic monitor	Bulgária, Reino Unido e França	Avaliar a precisão, linearidade, erro de medição e viabilidade de procedimentos simplificados de calibração para o monitor RadonEye Plus2.
Tiberius Dicu, et al, 2024	Evaluating radon concentration and temporal correction factors in residential and workplace buildings: A comparison of passive and active methods	Roménia	Avaliar a concentração de radão em diferentes tipos de edifícios e desenvolver fatores de correção temporal (TCF) específicos para métodos de medição e tipo de edifício.

Tabela 2 - População alvo, variáveis em estudo e principais resultados e limitações

Autores, Ano	População	Variáveis	Principais Conclusões	Limitações
Gavin K. Gillmore, Robin G. M. Crockett, Paul S. Phillips, 2018	Baseado em estudos epidemiológicos e dados sobre exposições domésticas e ocupacionais.	Concentração de radão (Bq/m^3), características geológicas, materiais de construção, ventilação, sazonalidade e políticas nacionais de mitigação.	O radão é a segunda maior causa de cancro do pulmão após o tabaco, responsável por 3–6% dos casos no Reino Unido. As concentrações em casas podem variar até 10 vezes dentro de um mesmo tipo geológico. Há discrepâncias significativas na aplicação de políticas e mitigação entre diferentes países.	Revisão dependente de dados existentes, com cobertura desigual em diferentes regiões.
J.D. Harrison, J.W. Marsh, 2019	Exposições em casas e locais de trabalho analisadas com base em dados epidemiológicos e modelos dosimétricos.	Concentração de radão (Bq/m^3), coeficientes de dose (mSv/WLM), fatores de equilíbrio, impacto em trabalhadores e público.	A exposição ao radão pode ser gerida diretamente por medições de concentração de ar e referência a limites. Coeficientes de dose efetiva são essenciais para avaliação de riscos ocupacionais e domésticos.	Baseia-se amplamente em dados europeus e norte-americanos, o que pode limitar sua aplicação em outras regiões com diferentes padrões de construção e exposição.
Zhaokun Wang, et al, 2020	141 pacientes do sexo masculino com DPOC, ex-fumadores, com idade média de 73,3 anos.	PR total, PR de origem interna e externa, PM2.5, carbono negro, sintomas respiratórios (tosse, expetoração, falta de ar) e scores de qualidade de vida (SGRQ).	A PR de origem interna tem maior impacto em sintomas respiratórios do que a PR externa. Isso sugere que mitigar fontes internas de radão pode beneficiar pacientes com DPOC.	População predominantemente masculina e branca, representatividade limitada. Exposições semanais podem não refletir exatamente as condições dos três meses anteriores aos questionários.
Danielle Vienneau, et al, 2020	5,4 milhões de adultos (dados da Swiss National Cohort - SNC), com base em 79.598 medições de radão.	Concentração de radão, fatores geográficos (elevação, litologia, tipo de solo), tipo e idade da construção, hábitos de ventilação e características do andar de residência.	Modelos baseados em aprendizado de máquina capturam melhor as interações complexas e não lineares nas medições de radão. Fatores como elevação e idade da construção são determinantes importantes.	Ausência de dados sobre ventilação mecânica, materiais de construção e hábitos individuais de ventilação. Uso de medições com durações inferiores a três meses pode introduzir imprecisões.
Mihail Simion Beldean-Galea, et al, 2020	100 casas alvo de remodelações em cinco cidades da Roménia.	Concentração de radão (métodos passivos e ativos), VOCs, formaldeído, acetaldeído, acetona, CO2, temperatura, humidade relativa e ventilação.	Edifícios retrofitados sem ventilação mecânica apresentam maior risco de acumulação de poluentes. A ventilação adequada é essencial para reduzir exposições a radão, formaldeído e VOCs.	Monitorização de curto prazo (7 dias) no inverno. Dados limitados sobre sazonalidade e outras variáveis de ventilação.

Jeffrey J. Whicker Michael W. McNaughton, 2020	65 escritórios e 47 residências monitorizados no condado de Los Alamos.	Concentração de radão (Bq/m^3), dose efetiva anual (mSv/ano), tempos de exposição, ventilação.	As residências apresentam maiores concentrações de radão devido a menores taxas de ventilação em comparação com escritórios. O nível de dose em residências excede frequentemente o limite público de $1 mSv/ano$, mas permanece abaixo do limite ocupacional de $50 mSv/ano$.	Dados limitados a um único condado. Não considerou variações sazonais completas.
Pam Warkentin, et al, 2020	N/D	Concentração de radão (Bq/m^3), precisão, exatidão, erro de medição, desempenho em diferentes condições ambientais.	Os monitores de consumo podem ser usados para decisões preliminares, mas a margem de erro deve ser considerada. O erro de medição em níveis próximos ao limite regulamentar ($200 Bq/m^3$ no Canadá) pode levar a interpretações erradas.	Dependência de condições laboratoriais controladas; resultados podem variar em ambientes reais. Foco em dispositivos disponíveis no mercado canadiano em 2019.
Anna Grzywa-Celińska, 2020	Baseado em dados epidemiológicos e análises da literatura sobre exposições ambientais e ocupacionais.	Concentração de radão (Bq/m^3), mecanismos carcinogênicos, efeitos na saúde respiratória, taxas de mortalidade por cancro do pulmão.	Concentrações elevadas de radão estão associadas a mutações no gene p53, um marcador crítico no desenvolvimento de cancro do pulmão. Fatores como ventilação, renovação de edifícios e materiais de construção influenciam significativamente os níveis de radão interior.	Revisão teórica; dados baseados em estudos prévios de diferentes regiões.
J D Appleton, et al, 2020	N/D	Concentração de radão no ar (Bq/m^3), geologia local, materiais de construção, ventilação, características climáticas e fatores sazonais.	Medidas preventivas, como barreiras de radão e ventilação ativa, são eficazes. A exposição ao radão está diretamente associada a 3,3% das mortes por cancro do pulmão no Reino Unido, sendo 2,8% relacionadas à interação entre tabaco e radão.	Baseado em dados do Reino Unido, com aplicabilidade limitada a outras regiões com diferentes características geológicas e regulatórias.
Katja Kojo, Päivi Kurtio, 2020	633 centros de dia e 1176 escolas na Finlândia.	Concentração de radão (Bq/m^3), cumprimento das medições, medidas corretivas.	Campanhas sistemáticas aumentaram significativamente a conformidade com as regulamentações. A conscientização pública e institucional sobre o radão melhorou.	Incerteza na aplicação adequada dos detetores devido à realização descentralizada das medições. Dados insuficientes sobre o número de pessoas potencialmente expostas antes das campanhas.
Sara Antignani, et al, 2021	84 residências monitoradas (173 quartos), principalmente edifícios multifamiliares.	Concentração de radão, variabilidade anual, características das habitações, distribuição de concentração por cômodo e ano.	A variabilidade interanual é baixa, o que sugere impacto negligenciável na estimativa de risco de câncer de pulmão em estudos epidemiológicos italianos. O clima mediterrâneo e a ventilação natural podem explicar a baixa variabilidade.	Foco em uma única região (Roma) e em um tipo de habitação predominantemente urbana.
Atsuyuki Sorimachi, et al, 2021	N/D	Concentração de ^{222}Rn e ^{220}Rn , temperatura do ar interior, humidade relativa, sensibilidade dos instrumentos.	Monitores contínuos são mais consistentes em medições de ^{222}Rn em comparação com detetores passivos. Baixas concentrações de ^{220}Rn são difíceis de medir com precisão devido a limitações de sensibilidade dos instrumentos.	Estudo realizado em condições controladas, limitando a aplicabilidade em ambientes reais. Concentrações de radão e torão abaixo do LOD dificultam análises precisas.
Justin A. Simms, et al, 2021	18.971 residências testadas para radão, com dados demográficos detalhados para	Concentração de radão (Bq/m^3), dose anual de radiação (mSv/ano), idade dos ocupantes, número de residentes, ano de	A exposição ao radão é maior em casas modernas e entre pessoas mais jovens, aumentando o risco de cancro ao longo da vida. Políticas devem focar em aumentar a consciencialização sobre o radão	Potencial sub-representação de grupos socioeconômicos mais baixos. Dados limitados ao Canadá e a propriedades residenciais.

	3.518 participantes.	construção das habitações.	em primeiros compradores de imóveis e jovens famílias.	
Filomena Loffredo, et al, 2021	607 salas monitorizadas em 27 distritos, com mais de 1300 detetores CR-39 utilizados.	Concentração de radão (Bq/m^3), dose efetiva anual (mSv), risco de cancro, altura dos andares, características dos edifícios.	Concentrações mais altas em salas mal ventiladas e andares subterrâneos. Edifícios com materiais como tufo e pozolana mostraram maiores concentrações de radão. Maior risco associado ao uso de espaços fechados durante o lockdown da COVID-19.	Falta de informações sobre características estruturais dos edifícios, como idade e materiais de construção. Desvio da normalidade em concentrações elevadas devido à amostragem limitada.
Jelena Reste, et al, 2021	243 edifícios monitorizados, incluindo escolas, hospitais, museus, e locais de trabalho.	Concentração de radão (Bq/m^3), materiais de construção, tipo de ventilação, presença de caves e tipo de janelas.	A ventilação inadequada em edifícios recentemente isolados é a principal causa de concentrações elevadas. Níveis elevados em 5,3% dos locais, frequentemente em salas com pouca ventilação e isolamento excessivo.	Concentração em áreas específicas; possível subestimação de outras regiões. Não abrangeu todas as variações sazonais.
Lopes, S.I.; Nunes, L.J.R.; Curado, 2021	873 respostas válidas em Portugal (inquérito sobre percepção do risco e conhecimento sobre o radão).	Concentração média anual de radão (AAMRC), ocupação diária média (DAO), dose efetiva anual (IAED), percepção do risco, eficácia das estratégias de comunicação.	IRREI é eficaz para comunicação clara e minimização de alarmismo em torno do risco de radão. Ferramentas IoT podem integrar estratégias de mitigação ativa e melhorar a percepção pública.	Baseado em questionários, com dependência de respostas autorreportadas. Modelo teórico sem validação prática em larga escala.
Preethi Gopalakrishnan, J. Jeyanthi, 2022	N/D	Concentração de radão, fontes (solo, água, materiais de construção), fatores de dispersão (ventilação, temperatura, pressão, humidade), impactos na saúde.	A ventilação reduz significativamente a concentração de radão. A exposição prolongada a concentrações elevadas está associada a problemas respiratórios, infertilidade e distúrbios psicológicos. Medidas preventivas, como materiais anti-radão e técnicas de vedação, são recomendadas.	Revisão teórica sem aplicação prática direta; os dados apresentados dependem de estudos em contextos geográficos variados.
Ivelina Dimitrova, et al, 2022	Estudo técnico com 36 monitores RadonEye Plus2.	Concentração de radão (Bq/m^3), tempo de resposta (T50, T90, T95), linearidade e reprodutibilidade.	O RadonEye Plus2 é adequado para medições em residências e locais de trabalho com ventilação ativa. É sensível o suficiente para monitorizar variações diurnas de radão e avaliar sistemas de mitigação. No entanto, sua resposta é mais lenta em comparação com outros monitores, como AlphaGUARD e RAD7.	Não apropriado para concentrações extremamente altas sem calibração individual; dependência de ajustes de correção devido à não linearidade acima de $3500 Bq/m^3$.
Olli Kurkela, et al, 2022	Dados de 2694 casos de cancro do pulmão na Finlândia em 2017; estratificados por idade, sexo e tipo de habitação.	Concentração de radão (Bq/m^3), incidência de cancro, prevalência de tabagismo, risco relativo (ERR).	A maioria dos casos de cancro atribuíveis ao radão ocorre em homens, maiores de 65 anos, residentes em casas (não apartamentos). Radão residencial contribui mais para o risco combinado em fumadores do que como fator isolado.	Dados limitados ao contexto finlandês. Dependência de dados históricos para níveis de radão.
David B. Richardson, et al, 2022	57.873 mineiros de urânio, com 1,9 milhões de anos-pessoa de observação e 1.217 mortes por cancro do pulmão.	Exposição cumulativa ao radão (WLM), mortalidade por cancro do pulmão, idade à exposição, taxa anual de exposição, tempo desde a exposição.	A exposição a baixas concentrações de radão está associada a um aumento significativo no risco de cancro do pulmão. Os resultados reforçam os modelos de risco usados para diretrizes de proteção radiológica atuais.	Dados limitados para mulheres e populações não ocidentais. Foco em mineiros contratados após 1960 pode subestimar os riscos associados a exposições históricas mais altas.
Leonel J. R. Nunes, et al, 2022	Baseado em estudos epidemiológicos	Concentração de radão (Bq/m^3), fatores de risco, metodologias	A exposição ao radão contribui para 20% dos casos de cancro do pulmão globalmente. Residências	Revisão baseada em estudos existentes, sem dados experimentais

	<i>internacionais e dados de concentrações residenciais.</i>	<i>de mitigação, impactos na saúde.</i>	<i>têm maior concentração de radão do que edifícios públicos devido à ventilação inadequada.</i>	<i>próprios. Dados limitados sobre regiões fora da Europa e América do Norte.</i>
<i>Mc Laughlin, J.P.; Gutierrez-Villanueva, J.-L.; Perko, T., 2022</i>	<i>N/D</i>	<i>Comunicação de riscos, códigos de construção, ferramentas financeiras, proteção de crianças, envolvimento de decisores e necessidades de pesquisa.</i>	<i>Comunicação ineficaz é um obstáculo significativo para a mitigação voluntária. Regulamentos de construção mais rigorosos podem prevenir níveis elevados de radão em novos edifícios.</i>	<i>Depende de políticas existentes em países específicos da UE. Falta de dados empíricos para algumas propostas.</i>
<i>Yonca Yahsi Celen, et al,</i>	<i>Estudantes e trabalhadores das instalações monitorizadas (Hospital de Educação e Pesquisa da Universidade de Balikesir e Faculdade de Medicina).</i>	<i>Concentração de radão (Bq/m³), localização dos detetores, ventilação, materiais de construção.</i>	<i>Concentrações baixas atribuídas a ventilação adequada e características do solo. Maior concentração em pisos subterrâneos em comparação com pisos superiores.</i>	<i>Estudo limitado a duas instalações em uma única região. Período de monitorização relativamente curto.</i>
<i>Voltattorni, N.; Gasparini, A.; Galli, G, 2023</i>	<i>N/D</i>	<i>Concentração de radão e torão no solo (Bq/m³), radão interior (Bq/m³), radão dissolvido na água, fatores geológicos e condições estruturais de edifícios.</i>	<i>Anomalias de radão no solo foram associadas a afloramentos de tufo vulcânico e necrópoles subterrâneas. O radão acumulado em interiores dependeu mais dos materiais de construção (tufo) do que das concentrações no solo. Ventilação insuficiente contribuiu para os altos níveis de radão interior em algumas habitações.</i>	<i>Período limitado de medição (verão de 2017). Dados de água limitados a dois poços privados.</i>
<i>Violeta Hansen, et al, 2023</i>	<i>257 residências com 459 medições; foco em adultos.</i>	<i>Concentrações de radão (Bq/m³), geologia local, características das habitações, doses anuais médias de radão.</i>	<i>A geologia local tem um impacto significativo nas concentrações de radão; Narsaq apresentou os níveis mais altos devido à proximidade de depósitos de urânio.</i>	<i>Limitado a três cidades e a habitações unifamiliares/semi-unifamiliares; ausência de dados de outras regiões ou tipos de edificações.</i>
<i>Rebecca A. Stern, et al, 2023</i>	<i>Instrumentos colocados em residências (principalmente caves) para avaliar exposições a radão em ambientes domésticos.</i>	<i>Concentração de radão (Bq/m³), precisão, sensibilidade, custo, variabilidade diária e sazonal.</i>	<i>Dispositivos de baixo custo, como RadonEye e EcoQube, oferecem precisão suficiente para monitoramento residencial. A acessibilidade desses dispositivos pode ampliar a conscientização e reduzir exposições ao radão em residências.</i>	<i>Estudo focado em ambientes residenciais; resultados podem não se aplicar a edifícios comerciais ou industriais. Dados limitados a áreas de concentração moderada de radão.</i>
<i>I. Dimitrova, V. Todorov, S. Georgiev, K. Mitev, 2024</i>	<i>Dez locais de trabalho.</i>	<i>Concentração de radão (total e durante horário laboral), fator de correção kWT, sazonalidade, padrões de ventilação, variação diurna e noturna.</i>	<i>Diferenças significativas na concentração de radão durante o horário laboral e total devem-se a padrões de ventilação. Variações sazonais e comportamentais tornam necessárias medições específicas e personalizadas em cada local.</i>	<i>Foco em apenas uma região e predominância de escritórios diurnos sem turnos noturnos.</i>
<i>Akkaş, A., et al, 2024</i>	<i>Medições realizadas em diferentes estações de metro subterrâneas;</i>	<i>Concentração de radão (Bq/m³), dose anual efetiva (mSv), profundidade das estações, sistemas de ventilação.</i>	<i>A ventilação eficiente desempenha um papel crucial na redução da concentração de radão em ambientes subterrâneos. A exposição ao radão nas estações de metro de Istambul não contribui significativamente para a dose</i>	<i>Dados limitados a estações de cinco linhas específicas do metro de Istambul. Período de monitorização de apenas três meses.</i>

			<i>anual efetiva recebida pela população.</i>	
<i>I. Dimitrova, et al, 2024</i>	<i>20 monitores RadonEye Plus2 avaliados em câmaras de radão.</i>	<i>Concentração de radão (280–2900 Bq/m³), erro de precisão, erro sistemático (viés), linearidade, fatores de correção.</i>	<i>O RadonEye Plus2 é adequado para medições em residências e locais de trabalho, mas recomenda-se calibração individual em aplicações críticas. Procedimentos simplificados de calibração podem substituir métodos tradicionais sem perda significativa de precisão.</i>	<i>Desempenho não avaliado em concentrações de radão abaixo de 280 Bq/m³. Resultados podem variar em ambientes não controlados.</i>
<i>Tiberius Dicu, et al, 2024</i>	<i>69 edifícios (34 residenciais e 35 locais de trabalho); 966 detetores CR-39 usados.</i>	<i>Concentração média anual de radão (AIRC), variações sazonais, fatores de correção temporal (TCF), condições de ventilação e ocupação.</i>	<i>Métodos ativos capturam melhor as variações temporais, mas os passivos são mais confiáveis para exposições médias anuais. A aplicação de TCF para edifícios residenciais em locais de trabalho pode levar a estimativas imprecisas.</i>	<i>Estudo limitado a três cidades romenas; os resultados podem não ser generalizáveis a outras regiões. Dependência de dados de ocupação autorrelatados.</i>

1.4.5 Discussão dos resultados

A análise sistemática da literatura científica disponível, organizada segundo a metodologia PRISMA, permitiu reunir evidência atualizada e robusta sobre a problemática da exposição ao radão, confirmando a sua relevância no quadro do problema sobre o qual versa este trabalho.

De acordo com os dados consolidados (Tabela 1 e Tabela 2), a literatura recente aponta de forma inequívoca para a existência de níveis de radão superiores aos valores de referência recomendados pela ICRP (ICRP, 2017) em diversas tipologias de edifícios, incluindo edifícios de uso público e locais de trabalho situados em zonas geológicas com predominância de maciços graníticos, esta situação é particularmente relevante no norte do território nacional onde predominam os solos graníticos.

A revisão incluiu 30 artigos científicos, selecionados de um universo inicial de 13.097 registos, o que demonstra não apenas a abrangência temática, mas também a produção científica sobre este tema e a relevância que tem atualmente. Foram utilizados critérios muito específicos para uma redução do número de resultados devolvidos.

A maior parte dos estudos analisados recorre a metodologias de medição *in situ*, com uso de detetores passivos de traço ou câmaras de cintilação, confirmando a persistência de concentrações médias de radão acima de 300 Bq/m³ em contextos residenciais e ocupacionais. A robustez metodológica destas investigações reforça quer a validade dos dados, quer a fiabilidade dos equipamentos disponíveis, reforçando a necessidade da implementação de medidas de prevenção (em caso de edifícios novos) e de mitigação (em caso de edifícios existentes), em consonância quer com as obrigações legais, quer com as recomendações para proteção da saúde dos ocupantes dos edifícios.

Em termos de impacto na saúde pública, a evidência científica acumulada confirma de forma consistente a associação estatisticamente significativa entre a exposição crónica ao radão e a incidência de carcinoma. O risco é particularmente elevado em indivíduos fumadores, devido ao efeito sinérgico entre o tabagismo e a inalação de partículas alfa provenientes dos produtos de decaimento do radão (Celen et al., 2023; Darby et al., 2005; Krewski et al., 2005). No entanto, a literatura também é clara ao demonstrar que existe risco

acrescido em populações não fumadoras, sendo atualmente o radão considerado a segunda principal causa de cancro do pulmão a nível mundial, logo após o tabaco (ICRP, 2014; WHO, 2009).

Mais recentemente, verificou-se um avanço conceptual importante: a consolidação da noção de que toda a exposição ao radão é potencialmente nefasta, independentemente do contexto em que ocorre, seja em ambiente residencial, seja em ambiente ocupacional (Darby et al., 2005; ICRP, 2014; Krewski et al., 2005; WHO, 2009). Tal reconhecimento sustenta o princípio de que qualquer dose de radiação ionizante comporta risco estocástico, não existindo limiares totalmente seguros, razão pela qual tanto a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP, 2014) como a Agência Internacional de Energia Atómica (IAEA, 2014) advogam a aplicação sistemática do princípio da otimização da proteção radiológica.

No caso português, este enquadramento encontra expressão no PNRn, aprovado em 2022, que assume como objetivo estratégico a redução sustentada da exposição da população ao radão em habitações, edifícios públicos e locais de trabalho.

Assim, o conhecimento atual reforça que o radão deve ser tratado como um problema prioritário de saúde pública, cuja gestão exige simultaneamente prevenção em novas construções, mitigação em edifícios existentes e monitorização regular em locais de trabalho, em linha com as recomendações internacionais e com os instrumentos nacionais de política pública.

Em síntese, a discussão crítica dos resultados permite confirmar que:

- a) A exposição ocupacional ao radão se mantém como fator de risco relevante em Portugal, em especial em edifícios situados em substratos graníticos, em linha com os registos cartográficos mais recentes (Luís Eduardo Pimentel Real & Jorge M. Grandão Lopes, 2020).
- b) A literatura internacional enfatiza a ausência de um limiar seguro para a exposição, embora legalmente a referência seja de 300 Bq/m³, o valor da exposição deve ser mantido o mais baixo possível, tendo implicações diretas na redução dos níveis de radão.
- c) Assim, a presente revisão sistemática fundamenta a pertinência científica, validando o alinhamento entre o problema identificado e o contexto específico nacional.

1.4.6 Objetivos da Dissertação

1.4.6.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação é avaliar o nível de exposição ao radão em três edifícios da INCM situados em zonas de risco elevado, identificar situações de exposição ocupacional, e propor medidas técnicas de mitigação que assegurem a proteção da saúde dos trabalhadores e o cumprimento da legislação aplicável.

1.4.6.2 Objetivos Específicos

Esta dissertação tem como objetivos específicos:

- a) Caracterizar tecnicamente os edifícios da INCM quanto à sua tipologia construtiva, ventilação, contacto com o solo e função de ocupação.

-
- b) Executar medições ativas de curto prazo com detetores eletrónicos em 12 espaços seleccionados, para identificação preliminar de zonas de concentração superior ou próximas do valor de referência de 300 Bq/m³.
 - c) Implementar medições passivas de longo prazo, com base em detetores de estado sólido (CR39), segundo a norma ISO 11665-4, para determinação da concentração média anual de radão.
 - d) Quantificar o risco de exposição com base na concentração registada e na dose efetiva anual estimada, comparando os resultados com os valores de referência da legislação portuguesa e as recomendações da OMS.
 - e) Propor medidas de mitigação adequadas a cada espaço, como, por exemplo, ventilação mecânica controlada, selagem de fissuras, isolamento de pavimentos e sistemas de despressurização.
 - f) Desenvolver um plano de monitorização periódica e preventiva, com critérios de avaliação e metodologia de comunicação de risco.

2 METODOLOGIA

A avaliação dos níveis de radão em edifícios foi conduzida segundo uma estratégia metodológica faseada, combinando medições com detetores ativos de leitura contínua (RadonEye+²) com detetores passivos de traços sólidos (CR-39), em conformidade com as orientações nacionais e internacionais para a monitorização deste gás radioativo (APA, 2022b, 2022a, 2024; IAEA, 2014; J-F. Lecomte et al., 2014). Esta abordagem integrada permitiu simultaneamente cumprir os requisitos legais para a determinação de valores médios anuais e obter informação complementar sobre as variações temporais da concentração de radão.

Primeira fase – Caracterização preliminar

A primeira fase do estudo decorreu durante o período de inverno, época em que as concentrações de radão tendem a ser mais elevadas devido à menor ventilação natural e às condições meteorológicas (UNSCEAR, 2020). Nesta etapa, recorreu-se exclusivamente a detetores ativos RadonEye+², cuja elevada sensibilidade e capacidade de registo contínuo permitem identificar padrões temporais e zonas críticas dentro dos edifícios (Dimitrova et al., 2023). O objetivo desta fase foi a caracterização preliminar dos níveis de radão e a identificação das áreas com maior risco, informação necessária para a seleção criteriosa dos locais de colocação dos detetores passivos.

Segunda fase – Monitorização integrada

A segunda fase decorreu entre a primavera e o verão, prolongando-se por um período de três meses consecutivos, em conformidade com o Guia da APA (APA, 2022b), que estabelece que os detetores passivos CR-39 devem permanecer expostos durante um período mínimo de 90 dias para que os resultados sejam representativos. Foram então colocados em paralelo:

- a) Detetores passivos CR-39, destinados à determinação da concentração média de radão, de acordo com os critérios legais e normativos (nível de referência nacional de 300 Bq/m³ (APA, 2022b; Decreto-Lei n 108/2018, 2018).
- b) Detetores ativos RadonEye+², instalados em simultâneo, com a finalidade de registar as variações temporais da concentração de radão ao longo do tempo, nomeadamente flutuações diurnas, sazonais e associadas a padrões de ventilação ou ocupação dos espaços.

Esta combinação metodológica permitiu integrar a robustez estatística e a rastreabilidade legal dos detetores passivos CR-39 (APA, 2022b; WHO, 2009) com a capacidade de análise dinâmica e diagnóstico rápido dos detetores ativos (Dimitrova et al., 2023; IAEA, 2014).

A opção por esta metodologia decorre da necessidade de assegurar resultados fiáveis, comparáveis e legalmente aceites, bem como de complementar a informação tradicionalmente obtida por detetores passivos com dados de maior resolução temporal. O uso de detetores ativos, RadonEye+², em ambas as fases, permitiu a identificação de eventuais padrões de variabilidade que poderiam comprometer a representatividade das medições, ao passo que os CR-39 garantiram a conformidade com o enquadramento regulatório português e europeu (APA, 2022b; IAEA, 2014; Resolução do Conselho de Ministros 150-A, 2022).

Assim, a metodologia seguida permitiu não apenas quantificar os níveis de radão em conformidade com os níveis de referência nacionais (300 Bq/m³), mas também compreender a dinâmica espacial e temporal da exposição, fornecendo bases técnicas sólidas para a avaliação dos níveis de exposição e para a definição de estratégias de mitigação ajustadas às condições dos edifícios estudados.

2.1 Local da Avaliação

O estudo foi realizado em três edifícios da Imprensa Nacional Casa da Moeda (INCM), localizados na Área Metropolitana do Porto, com diferentes tipologias, características estruturais e históricos de construção. Esses edifícios estão situados em zonas identificadas pela APA como de suscetibilidade elevada de exposição ao radão, apresentando particularidades que tornam a sua análise relevante.

As informações referentes aos edifícios estudados estão representadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Localização dos locais de estudo

<i>Empresa:</i>	<i>Imprensa Nacional Casa da Moeda, SA (INCM)</i>			
<i>Morada:</i>	<i>Av. Dr. José de Almeida, 1000-042 Lisboa</i>			
<i>Contacto Empresa:</i>	<i>André Filipe Silva</i>	<i>andre.silva@incm.pt</i>	<i>22 519 8101</i>	
<i>Edifício Contrastaria do Porto</i>	<i>Rua Visconde Bóbeda s/n, 4000-109 Porto</i>			
<i>Edifício Delegação de Gondomar</i>	<i>Edifício Goldpark, Rua Parque Tecnológico, s/n, 4420-330 Gondomar</i>			
<i>Edifício Livraria do Porto</i>	<i>Rua Cândido dos Reis, 97, 4050152 Porto</i>			
<i>Data das Avaliações 1ª Fase:</i>	<i>Data de Início</i>		<i>Data de Conclusão</i>	
	<i>3/12/2024</i>		<i>12/12/2024</i>	
<i>Data das Avaliações 2ª Fase:</i>	<i>Detetor RadonEye+²</i>		<i>Detetor CR-39</i>	
	<i>Data de início</i>	<i>Data Conclusão</i>	<i>Data de início</i>	<i>Data Conclusão</i>
	<i>29/05/2025</i>	<i>08/08/2025</i>	<i>07/05/2025</i>	<i>08/08/2025</i>
<i>Avaliador:</i>	<i>André Filipe Silva</i>	<i>andrefpsilva@sapo.pt</i>	<i>913732111</i>	

2.1.1 Edifício da Contrastaria do Porto

O edifício em estudo localiza-se na Rua Visconde Bóveda, freguesia do Bonfim, Porto, tendo sido originalmente construído na década de 1940, com posteriores ampliações. É constituído por rés-do-chão e primeiro andar e alberga atualmente os serviços da contrastaria, gráfica de segurança e informática.

A sua tipologia construtiva, de carácter antigo, recorreu ao uso de paredes exteriores em granito e a materiais comuns à época, fatores que, aliados à sua localização em área urbana consolidada, aumentam a suscetibilidade à infiltração de radão. Estas características estão reconhecidas pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2023) como potenciadores da acumulação de radão em edifícios com estas características.

A ocupação dos espaços decorre em regime diurno, entre as 09h00 e as 18h00 (9 horas diárias), em contexto laboral. O rés-do-chão é constituído por sete compartimentos e uma instalação sanitária, dos quais apenas quatro compartimentos foram considerados na caracterização, por apresentarem ocupação permanente e contínua. Em condições habituais, o edifício é ocupado por 11 trabalhadores, distribuídos pelos diferentes serviços.

2.1.2 Edifício da Livraria do Porto

O edifício em análise encontra-se localizado na Rua Cândido dos Reis, freguesia da Vitória, Porto, com construção datada de 1906. Inserido no centro histórico da cidade, constitui um exemplo típico de edificação urbana em áreas antigas, onde as condições geológicas (subsolo granítico) e as características construtivas tradicionais favorecem a acumulação de radão, particularmente em compartimentos subterrâneos UNSCEAR, 2020). A presença de uma cave e a ventilação naturalmente limitada destes espaços representam fatores adicionais de risco para a concentração do gás.

O edifício é composto por cave e rés-do-chão. Na cave existem três compartimentos e uma instalação sanitária, tendo sido considerado apenas um compartimento como de ocupação permanente. No rés-do-chão foram identificados três compartimentos, dos quais dois apresentam ocupação permanente. A ocupação laboral decorre entre as 09h00 e as 18h00 (9 horas diárias), num regime típico de horário diurno. O edifício é habitualmente ocupado por três trabalhadores, distribuídos pelos compartimentos identificados.

Esta caracterização confirma que se trata de uma estrutura com fatores intrínsecos de vulnerabilidade à presença de radão (idade da construção, presença de cave e ventilação limitada).

2.1.3 Delegação da Contrastaria de Gondomar

Encontra-se situada no Goldpark, Rua do Parque Tecnológico, freguesia de São Cosme, Gondomar, tendo sido construída em 2016. Trata-se de um edifício moderno que acolhe o posto de Gondomar da Contrastaria do Porto.

Do ponto de vista construtivo, o edifício apresenta um rés-do-chão parcialmente enterrado, característica que pode favorecer a infiltração de radão devido à pressão exercida pelo solo contra as paredes perimetrais (IAEA, 2014). Apesar de se tratar de uma construção recente, este fator geotécnico constitui um elemento de risco adicional para a acumulação do gás no interior, especialmente em compartimentos localizados na envolvente em contacto direto com o terreno.

A ocupação dos espaços decorre em regime diurno, entre as 09h00 e as 18h00 (9 horas diárias), em contexto laboral. O edifício é composto por 14 compartimentos principais, complementados por quatro instalações sanitárias e dois vestiários. Para efeitos de caracterização e monitorização dos níveis de radão foram considerados apenas seis compartimentos, correspondentes às áreas de ocupação permanente e contínua. Em condições habituais, a instalação é ocupada por 27 trabalhadores.

2.2 Descrição dos equipamentos

A quantificação da concentração de radão em ambientes interiores constitui um requisito central para a caracterização do risco radiológico e para o cumprimento dos referenciais legais vigentes. No contexto europeu e nacional, o nível de referência para a concentração média anual é de 300 Bq/m³, com obrigação de implementação de planos nacionais e de programas de monitorização e mitigação (Decreto-Lei n.º 108/2018 de 3 de Dezembro, 2018; EURATOM, 2014). Estas obrigações enquadram a estratégia

metodológica adotada neste trabalho, que combina medições contínuas (ativas) e medições integradas de longa duração (passivas), garantindo simultaneamente resolução temporal suficiente para caracterizar padrões de variação e representatividade temporal para estimar a média anual comparável ao nível de referência (ICRP, 2014; WHO, 2009).

Esta abordagem dupla é consistente com as recomendações internacionais J-F. Lecomte et al., 2014; WHO, 2009).

A complementaridade entre campanhas de curta duração (ativa/eletrônica) e de longa duração (passiva) permite, por um lado, identificar e interpretar a variabilidade intra-diária e sazonal e, por outro, obter estimativas robustas da exposição crônica (média anual), reduzindo o enviesamento associado às flutuações temporais (Resolução do Conselho de Ministros 150-A, 2022; WHO, 2009). Os dispositivos utilizados no estudo estão identificados na Tabela 4.

Tabela 4 - Identificação dos detetores

#	Marca	Modelo	Nº Série	Tipo de Detetor
1	FTLab	RadonEye+ ²	PE2221140260	Ativo
2	FTLab	RadonEye+ ²	PE2221140261	Ativo
3	FTLab	RadonEye+ ²	PE2221140262	Ativo
4	FTLab	RadonEye+ ²	PE2221140264	Ativo
5	FTLab	RadonEye+ ²	PE2221140265	Ativo
6	FTLab	RadonEye+ ²	PE2221140266	Ativo
7	FTLab	RadonEye+ ²	PE2221140267	Ativo
8	FTLab	RadonEye+ ²	PE2221140268	Ativo
9	FTLab	RadonEye+ ²	PE2221140269	Ativo
10	FTLab	RadonEye+ ²	PE2221140270	Ativo
11	FTLab	RadonEye+ ²	PE2221140271	Ativo
12	FTLab	RadonEye+ ²	PE2221140273	Ativo
13	FTLab	RadonEye+ ²	PE2221140275	Ativo
13	LRN-UC	CR-39	GK2985	Passivo
14	LRN-UC	CR-39	GK2988	Passivo
15	LRN-UC	CR-39	GK2935	Passivo
16	LRN-UC	CR-39	GK1626	Passivo
17	LRN-UC	CR-39	GK2968	Passivo
18	LRN-UC	CR-39	GK2131	Passivo

2.2.1 Detetor Eletrónico Contínuo — RadonEye+²

A componente ativa assentou em monitores eletrónicos RadonEye+² (FTLab, Coreia do Sul), que utilizam uma câmara de ionização por difusão passiva acoplada a fotodiodo de silício para detetar as partículas α emitidas no decaimento do ²²²Rn. Este princípio permite disponibilizar uma primeira leitura em cerca de 10 minutos e atualizações horárias subsequentes, produzindo séries temporais com resolução adequada para analisar ciclos diurnos/semanais, impactes de ventilação e respostas a intervenções (Dimitrova et al., 2023, 2024). A conectividade Bluetooth/Wi-Fi viabiliza o acompanhamento remoto e a exportação de dados para análise (Dimitrova et al., 2023). Em termos metrológicos, os RadonEye+² evidenciam uma boa linearidade, incertezas compatíveis com a utilização em campanhas operacionais e tempo de resposta adequado para captação de variações hora-a-hora, o que os torna apropriados para campanhas exploratórias e para avaliação da eficácia da implementação de medidas de mitigação (Dimitrova et al., 2023; Warkentin et al., 2020).

A robustez desta opção ativa é reforçada por estudos de comparação inter-instrumentais que demonstram um desempenho aceitável destes equipamentos de baixo custo, como é o caso do RadonEye+², quando comparados a equipamentos de referência (Warkentin et al., 2020). Em ambientes laborais, a monitorização em tempo real deve ainda ser articulada com fatores de ocupação, através de correções pelo tempo efetivo de trabalho, para melhor estimar a dose anual dos trabalhadores (Dimitrova et al., 2023). Estas práticas estão alinhadas com as recomendações internacionais (IAEA, 2014; ICRP, 2014).

2.2.2 Detetor Passivo de Traços Nucleares — CR-39

Em complemento, a componente passiva recorreu a detetores do tipo CR-39, disponibilizados pelo Laboratório de Radioatividade Natural da Universidade de Coimbra, que se encontra reconhecido pela APA como laboratório competente. Os núcleos α gerados no decaimento do radão e dos seus descendentes produzem microdanos que permanecem latentes no polímero, e após revelação química, os traços tornam-se observáveis por microscopia procedendo-se então à sua contagem (WHO, 2009). A literatura recente evidencia que, para avaliação de risco e validação de mitigação, os detetores CR-39 fornecem estimativas robustas da média anual, mitigando o enviesamento associado à variabilidade sazonal e diária (Hansen et al., 2023; WHO, 2009).

A complementaridade entre ambas as abordagens é, assim, deliberada: os registos contínuos dos detetores ativos permitem caracterizar a dinâmica das concentrações — incluindo picos de curta duração, efeitos de ocupação/ventilação e extremos diários, alimentando a construção de gráficos de série horária e de máximos/mínimos diários. Por seu turno, os detetores CR-39 asseguram a comparabilidade regulatória pela média anual, necessária para decidir face ao nível de referência (APA, 2022b; J-F. Lecomte et al., 2014; WHO, 2009). Esta arquitetura metodológica, recomendada pela OMS e pela ICRP, é a que melhor concilia sensibilidade a variações com representatividade temporal, otimizando a inferência sobre exposição crónica e suportando decisões de gestão do risco e de mitigação (ICRP, 2014; WHO, 2009).

2.3 Procedimentos Experimentais

O presente procedimento experimental foi delineado de modo a dar cumprimento ao disposto no Decreto-Lei n.º 108/2018, que transpõe a Diretiva 2013/59/Euratom, e integra as recomendações constantes do Guia para a Prestação de Serviços na Medição de Radão por Detetores Passivos no Ar Interior de Edifícios (APA, 2022b) e do Guia para Empregadores — Gestão da Exposição ao Radão nos Locais de Trabalho (APA, 2022a). O objetivo central consiste em assegurar a caracterização detalhada da concentração de radão nos edifícios selecionados, através da identificação preliminar de zonas de maior suscetibilidade à acumulação de radão, da avaliação das variações sazonais e da definição de medidas de gestão de risco, sempre que aplicável.

Para garantir a representatividade temporal das medições, a metodologia foi estruturada em duas fases complementares: a primeira decorreu em novembro/dezembro, período em que as concentrações de radão tendem a ser mais elevadas devido às condições de menor ventilação natural; a segunda realizou-se em maio/junho, correspondendo a uma estação de maior ventilação, permitindo assim comparar e avaliar a

influência da sazonalidade nos níveis de radão. Esta abordagem faseada assegurou uma análise mais completa e robusta, em conformidade com os requisitos legais e as orientações internacionais (IAEA, 2014; J-F. Lecomte et al., 2014).

2.3.1 Fase 1 — Caracterização preliminar dos edifícios e monitorização de diagnóstico

O estudo teve como objetivo a realização de medições preliminares e de curta duração da concentração de radão, visando a identificação de compartimentos ou zonas com maior suscetibilidade à acumulação deste gás, considerando para o efeito as características construtivas dos edifícios, a sua localização geológica e o padrão de utilização dos espaços. Para tal, recorreu-se a detetores eletrónicos de leitura contínua RadonEye+², instalados em locais estrategicamente selecionados, de modo a permitir a obtenção de medições em tempo real e o registo de flutuações diárias da concentração de radão. O período de amostragem decorreu durante 10 dias consecutivos, entre 3 e 12 de dezembro de 2024.

Na implementação prática, a colocação dos detetores seguiu as recomendações nacionais e internacionais aplicáveis, em particular as orientações constantes do ponto 4.2.2 do Guia para Empregadores — Gestão da Exposição ao Radão nos Locais de Trabalho (APA, 2022a). Assim, os detetores foram instalados a uma altura entre 1 e 2 metros do pavimento, em espaço livre e a alguns centímetros da parede, afastados de janelas, sistemas de ventilação de ar fresco, aquecedores ou outras fontes de calor. Evitou-se a colocação em espaços de circulação (corredores, arrumos ou locais de arquivo), privilegiando compartimentos com ocupação efetiva e contínua, de modo a garantir a representatividade da exposição dos trabalhadores. Não foram utilizados locais inadequados, como armários, gavetas, caixas ou zonas em contacto com água, e assegurou-se que os detetores permanecessem no mesmo local durante todo o período de monitorização, recorrendo a mecanismos de fixação garantindo a sua estabilidade e segurança. Em paralelo, foram registados parâmetros ambientais complementares, designadamente temperatura e humidade relativa, permitindo contextualizar os resultados e possibilitar uma interpretação mais rigorosa e fiável das medições obtidas

2.3.2 Fase 2 — Monitorização de Longa Duração com Detetores Passivos (CR-39)

O objetivo desta fase do estudo consistiu em determinar a concentração média anual de radão nos edifícios analisados, em conformidade com os critérios definidos no Guia da APA para a Prestação de Serviços na Medição de Radão por Detetores Passivos (APA, 2022b), de modo a validar a magnitude dos valores obtidos na análise preliminar. Para tal, procedeu-se à instalação de detetores de traços nucleares CR-39, fornecidos pelo Laboratório de Radioatividade Natural da Universidade de Coimbra, colocados nas divisões previamente identificadas como zonas críticas de acumulação de radão e com ocupação regular de trabalhadores.

Cada detetor permaneceu no local por um período mínimo de 90 dias consecutivos, assegurando a representatividade dos resultados em termos de variação sazonal e ocupacional. O período de exposição

decorreu entre 7 de maio e 8 de agosto de 2025, correspondendo a aproximadamente três meses de monitorização contínua.

Na implementação prática, respeitaram-se as recomendações técnicas da APA, garantindo a fixação de cada detetor a uma altura entre 1 e 2 metros do pavimento, afastado de paredes, de fontes de calor, de incidência solar direta e de zonas de circulação. Foram ainda cumpridos todos os procedimentos relativos ao envio e rastreabilidade dos detetores para o laboratório de análise, em conformidade com o disposto no Anexo 3 do Guia APA, assegurando a fiabilidade e a comparabilidade dos resultados obtidos (APA, 2022b, 2022a, 2024).

2.3.3 Fase 3 — Avaliação de variações sazonais com detetores ativos

O objetivo desta fase consistiu em complementar os dados obtidos através da monitorização passiva com a análise das flutuações sazonais da concentração de radão, recorrendo a detetores ativos RadonEye⁺². Estes equipamentos foram instalados de forma a avaliar a influência de fatores externos, nomeadamente a temperatura exterior, a ventilação e as condições meteorológicas, aspetos reconhecidos como determinantes na variabilidade temporal das concentrações (APA, 2022b, 2022a).

A metodologia adotada compreendeu a instalação de detetores ativos tanto nos locais identificados na avaliação preliminar como nos compartimentos monitorizados com detetores CR-39, de modo a assegurar a comparabilidade dos resultados. As medições foram realizadas em tempo real, com registo das flutuações diárias da concentração de radão, sendo os valores posteriormente correlacionados com parâmetros ambientais (temperatura interior e exterior, humidade relativa). O período de monitorização prolongou-se por três meses consecutivos, entre 29 de maio e 8 de agosto de 2025, coincidindo com a segunda fase de monitorização passiva.

Na implementação prática, seguiram-se as recomendações técnicas da (APA, 2022b), assegurando a colocação dos detetores ativos a uma altura entre 1 e 2 metros, afastados de janelas abertas, fontes de calor ou ventilação direta. Foram evitados espaços de circulação (como corredores, arrumos ou locais sem ocupação significativa), privilegiando compartimentos com ocupação permanente e representativa da exposição dos trabalhadores. Simultaneamente, foram registados parâmetros ambientais complementares (temperatura e humidade relativa), de modo a contextualizar os resultados e a interpretar com maior rigor as variações observadas.

Importa ainda salientar que, em conformidade com o Guia da APA para Empregadores — Gestão da Exposição ao Radão nos Locais de Trabalho (APA, 2022a), foi aplicada a correção do tempo de exposição dos detetores ativos para que os valores médios obtidos fossem comparáveis com os resultados dos detetores passivos CR-39. Esta etapa foi essencial para garantir a consistência metodológica, permitindo validar os dados obtidos e assegurar que os resultados fossem cientificamente robustos e legalmente enquadráveis.

3 RESULTADOS

3.1 Avaliação preliminar – 1ª Fase

No edifício da Contrastaria do Porto, foram monitorizados quatro locais distintos (RSP, LMP, CSI e UGF). As medições da concentração de radão no ar foram realizadas com registos horários, posteriormente consolidados em valores representativos por dia útil.

No edifício Goldpark, a monitorização abrangeu cinco locais (RSG, MCG, LMG, CSI e DSO), seguindo a mesma metodologia, com recolha contínua de dados.

Na Livraria do Porto, a avaliação foi efetuada em três locais: cave, área de acesso ao público e área de acesso restrito (não público). Também aqui foram obtidas séries de dados, permitindo avaliar a variação da concentração de radão ao longo do dia.

Na tabela seguinte está resumido os resultados obtidos, ver Tabela 5.

Tabela 5 - Quadro resumo valores de radão - 1ª fase, detetores ativos.

<i>Edifício</i>	<i>Local</i>	<i>Piso</i>	<i>Valores de Radão (Bq/m³)</i>			
			<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Média</i>	<i>Média Corrigida (dias úteis)</i>
CPO	RSP	0	1311	241	733	629
	LMP	0	352	78	190	199
	CSI	0	664	42	353	322
	UGF	0	560	79	228	271
GPK	RSG	0	60	0	19	21
	MCG	0	68	4	24	25
	LMG	0	95	10	45	46
	CSI	0	55	5	24	24
	DSO	0	291	2	101	83
LPO	Cave	-1	251	55	109	105
	Público	0	168	23	72	71
	Não público	0	191	26	83	84

No edifício da Contrastaria do Porto, através da análise dos dados, ver Tabela 5 (Figura 13), podemos verificar que o comportamento dos diversos compartimentos é bastante heterogéneo, é na RSP e no CSI que ocorrem os níveis mais elevados de radão, embora neste último em valores bastante inferiores. Verifica-se uma tendência para a acumulação de radão durante o fim de semana, mais pronunciada na RSP e na CSI do que no LMP e na UGF. Este comportamento, embora expectável dado que o edifício permanece encerrado nesse período, permite ainda inferir diferenças no modo como os diversos compartimentos se comportam relativamente à acumulação de radão.

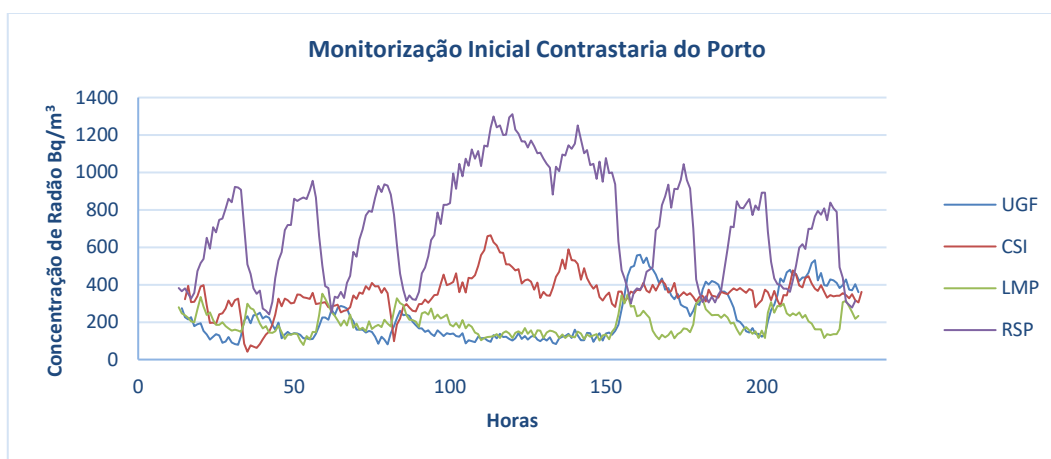


Figura 13 - Resultados monitorização inicial, Contrastaria do Porto.

Na Livraria do Porto, pela análise dos dados, ver Tabela 5 (Figura 14), verifica-se um comportamento ao longo do edifício bastante homogéneo, embora os valores de radão sejam mais elevados de um modo consistente na cave do edifício.

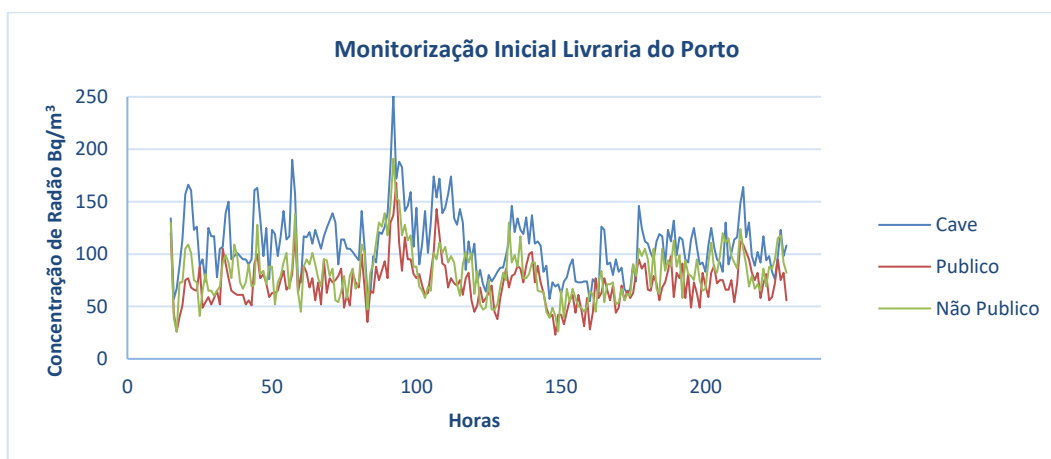


Figura 14 - Resultados monitorização inicial, Livraria do Porto.

No edifício do Goldpark, através da análise dos resultados, ver Tabela 5 (Figura 15), verifica-se um comportamento muito homogéneo dos diferentes compartimentos, com a exceção da DSO onde os picos de concentração de radão chegaram a ser quatro vezes superiores ao nível dos restantes compartimentos.

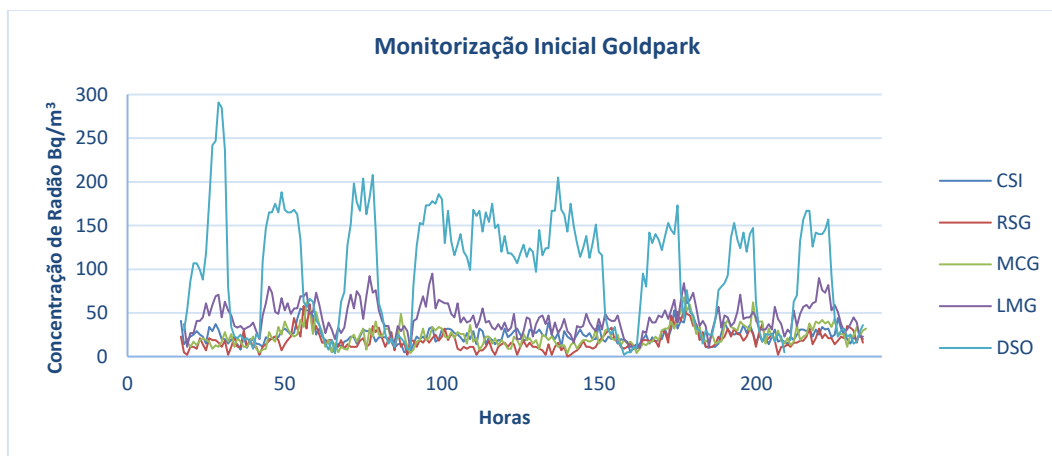


Figura 15 - Resultados monitorização inicial, Goldpark.

3.1.1 Análise compartimento a compartimento

Na UGF, os níveis de radão oscilaram entre um máximo de 560 Bq/m³ e um mínimo de 79 Bq/m³. A média global registada foi de 228 Bq/m³, sendo que a média dos dias úteis se fixou em 271 Bq/m³ (Figura 16) e (Figura 17).

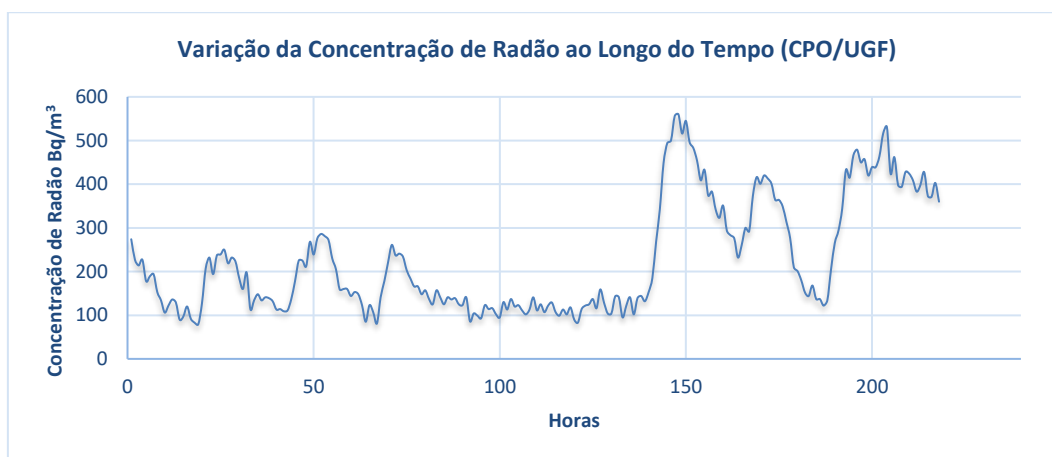


Figura 16 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (CPO/UGF).

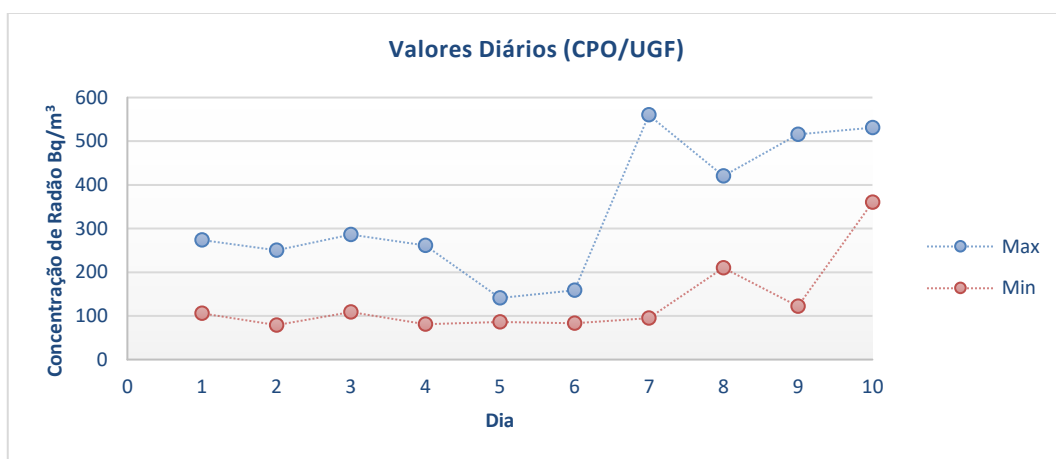


Figura 17 – Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (CPO/UGF).

Na CSI, os resultados revelaram um valor máximo de 664 Bq/m³ e um valor mínimo de 42 Bq/m³. A média global calculada foi de 353 Bq/m³, enquanto a média dos dias úteis foi de 322 Bq/m³ (Figura 18) e (Figura 19).

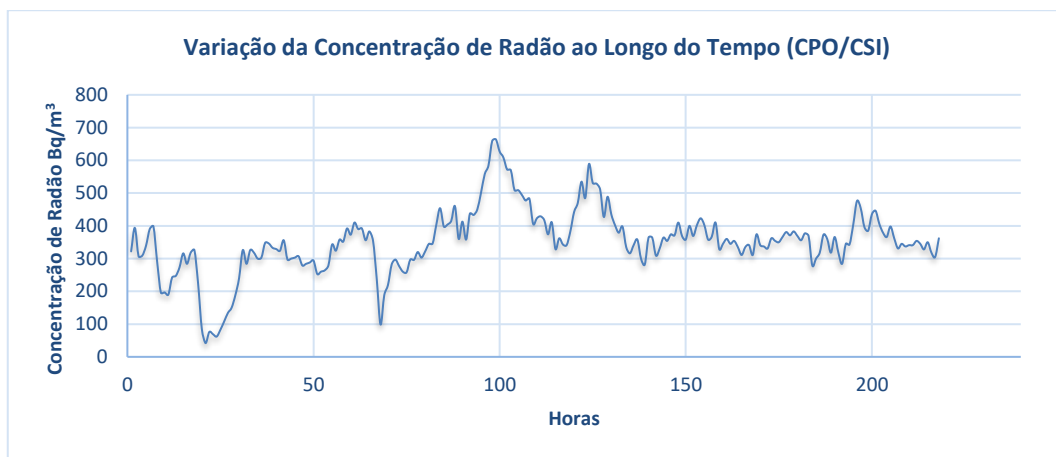


Figura 18 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (CPO/CSI).

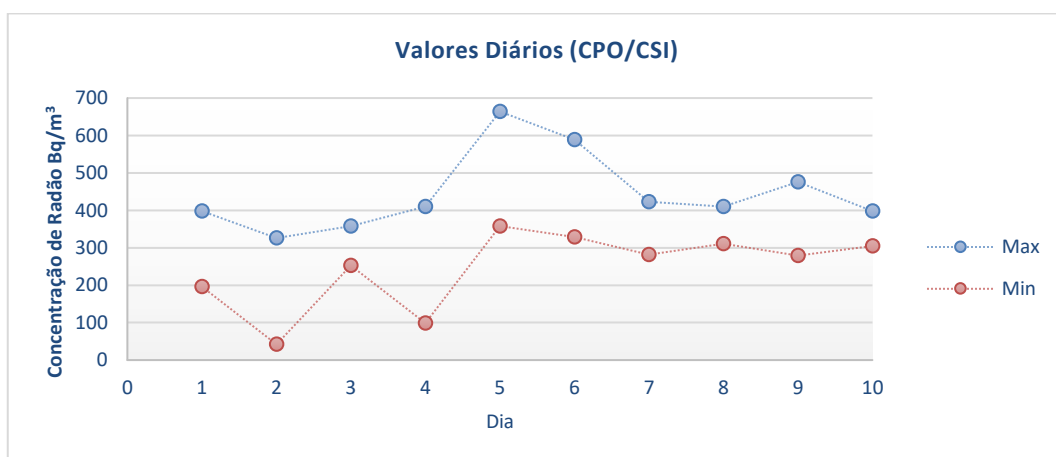


Figura 19 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (CPO/CSI)

No LMP, os teores de radão apresentaram menor amplitude, situando-se entre um máximo de 352 Bq/m³ e um mínimo de 78 Bq/m³. A média global obtida foi de 190 Bq/m³, sendo que, restringindo a análise aos dias úteis, a média foi ligeiramente superior, de 199 Bq/m³ (Figura 20) e (Figura 21).

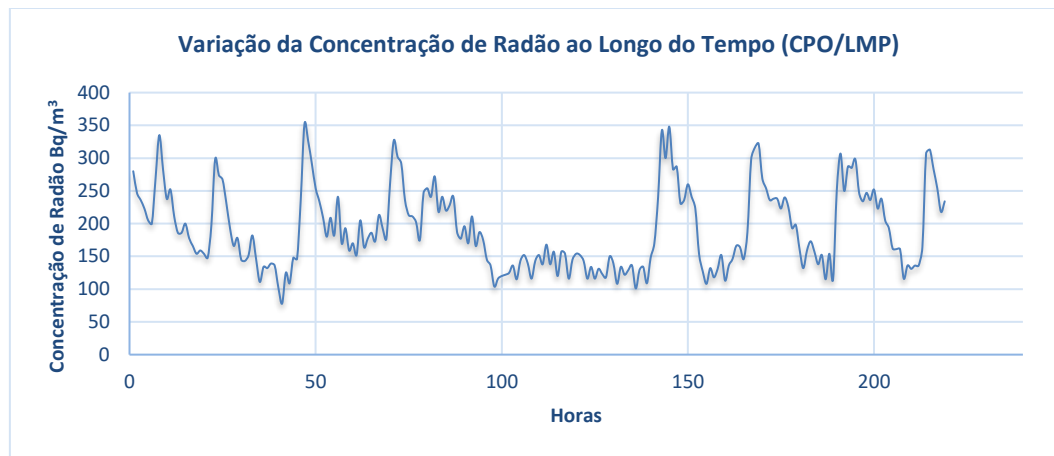


Figura 20 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (CPO/LMP).

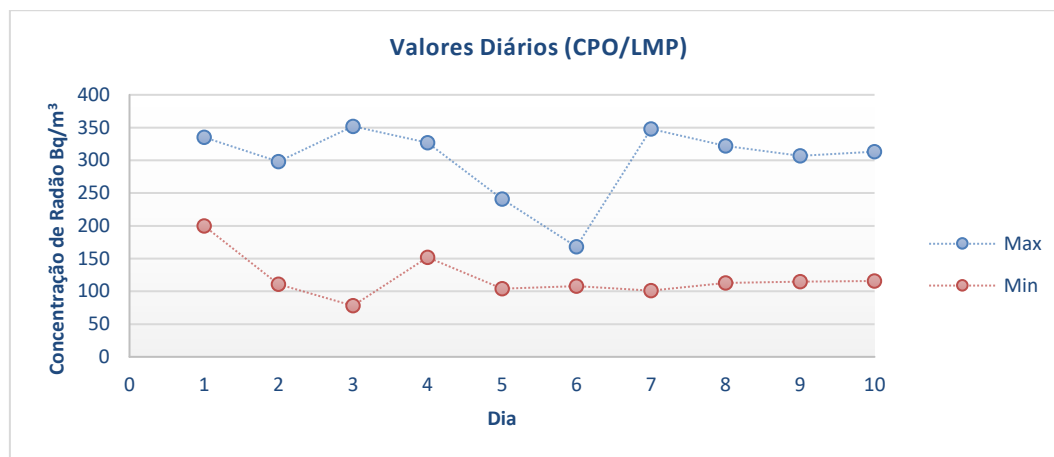


Figura 21 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (CPO/LMP).

Na RSP, observou-se uma variação acentuada dos teores de radão, com um valor máximo registado de 1311 Bq/m³ e um valor mínimo de 241 Bq/m³. A concentração média global foi de 733 Bq/m³, enquanto a média calculada considerando apenas os dias úteis correspondeu a 629 Bq/m³ (Figura 22) e (Figura 23).

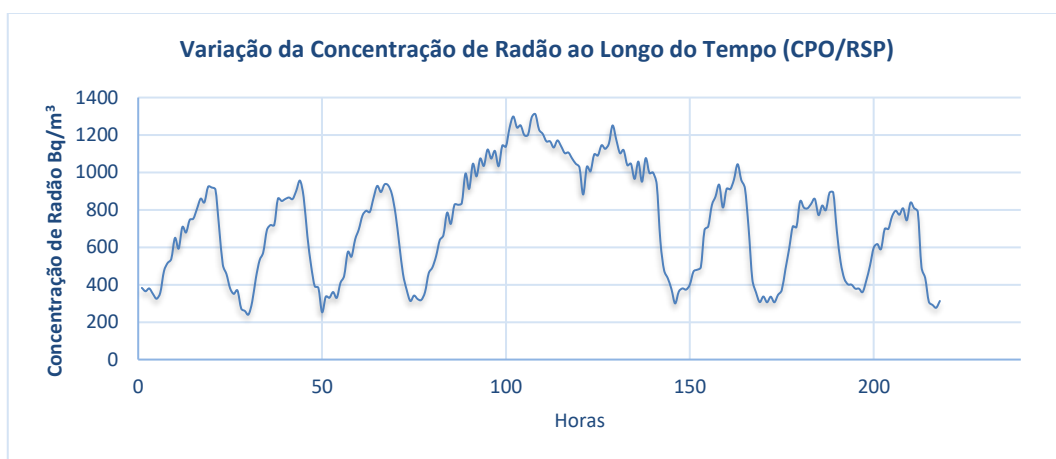


Figura 22 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (CPO/RSP).

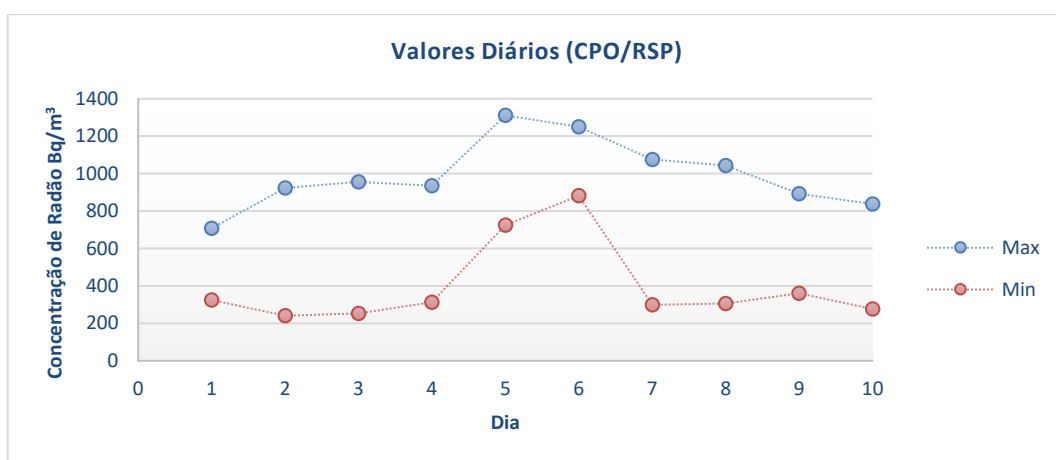


Figura 23 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (CPO/RSP).

No CSI, os níveis de radão registrados oscilaram entre um máximo de 55 Bq/m³ e um mínimo de 5 Bq/m³. Tanto a média global como a média relativa aos dias úteis apresentaram o mesmo valor, correspondente a 24 Bq/m³ (Figura 24) e (Figura 25).

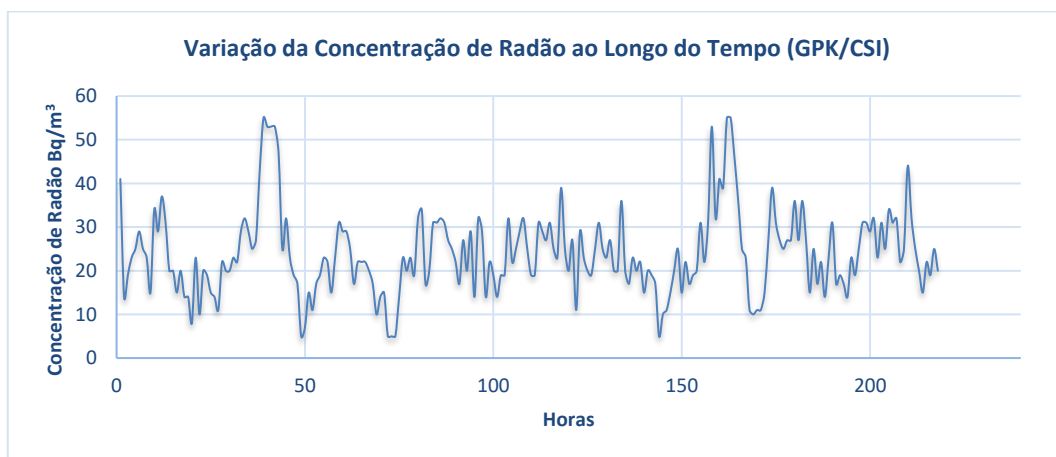


Figura 24 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (GPK/CSI).

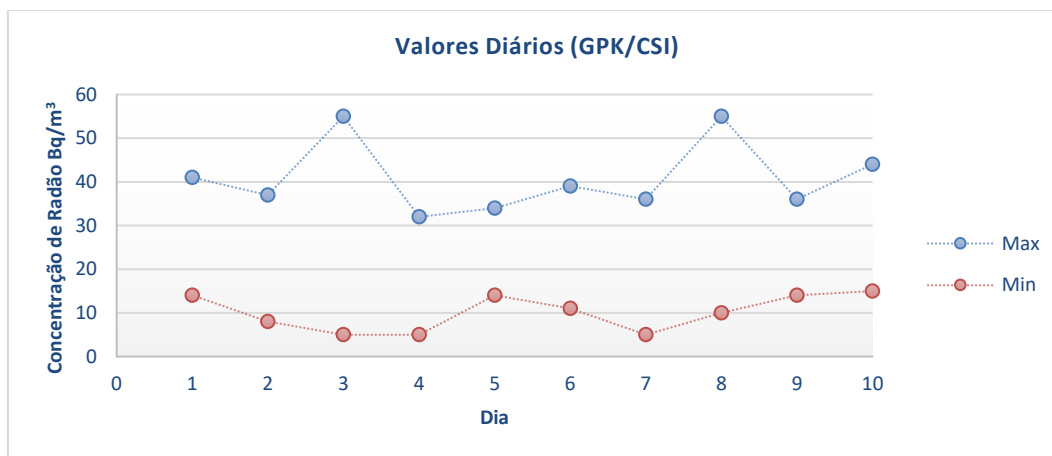


Figura 25 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (GPK/CSI).

Na RSG, a concentração de radão variou entre um valor máximo de 60 Bq/m³ e um valor mínimo de 0 Bq/m³. A média global registada foi de 19 Bq/m³, enquanto a média restrita aos dias úteis foi de 21 Bq/m³ (Figura 26) e (Figura 27).

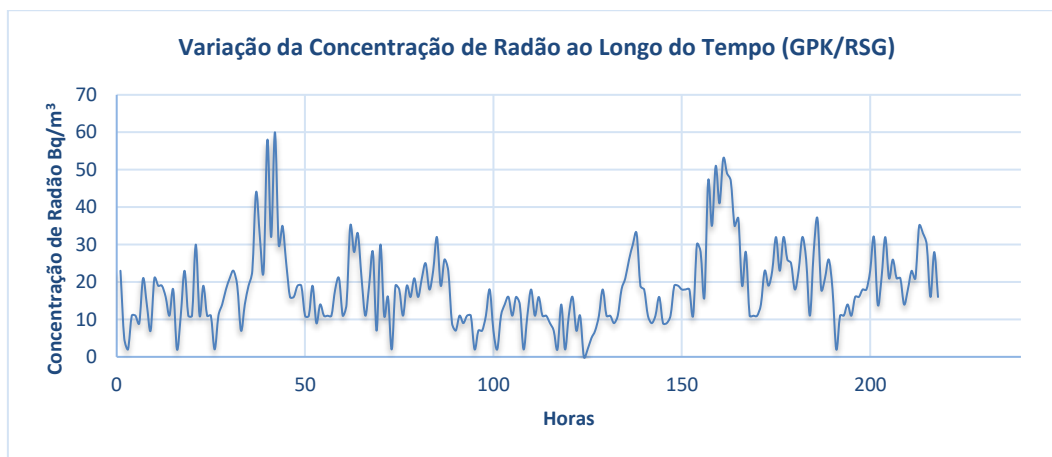


Figura 26 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (GPK/RSG).

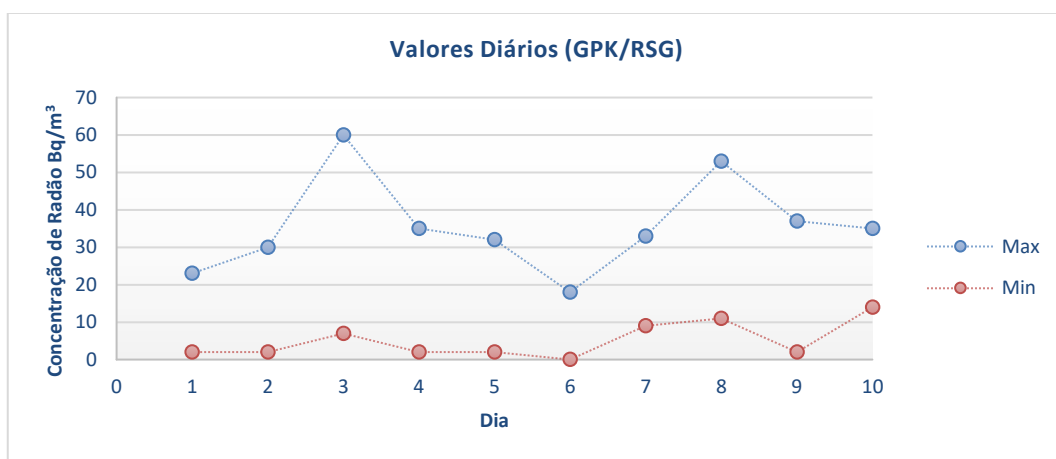


Figura 27 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (GPK/RSG).

No local MCG, os teores de radão situaram-se entre um máximo de 68 Bq/m³ e um mínimo de 4 Bq/m³. A média global obtida foi de 24 Bq/m³, mantendo-se praticamente inalterada quando considerada apenas a amostra relativa a dias úteis (25 Bq/m³) (Figura 28) e (Figura 29).

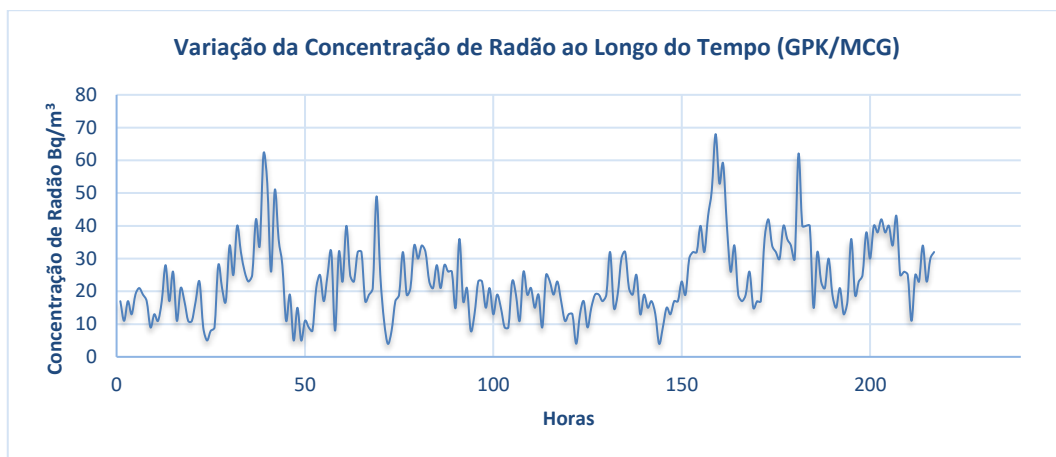


Figura 28 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (GPK/MCG).

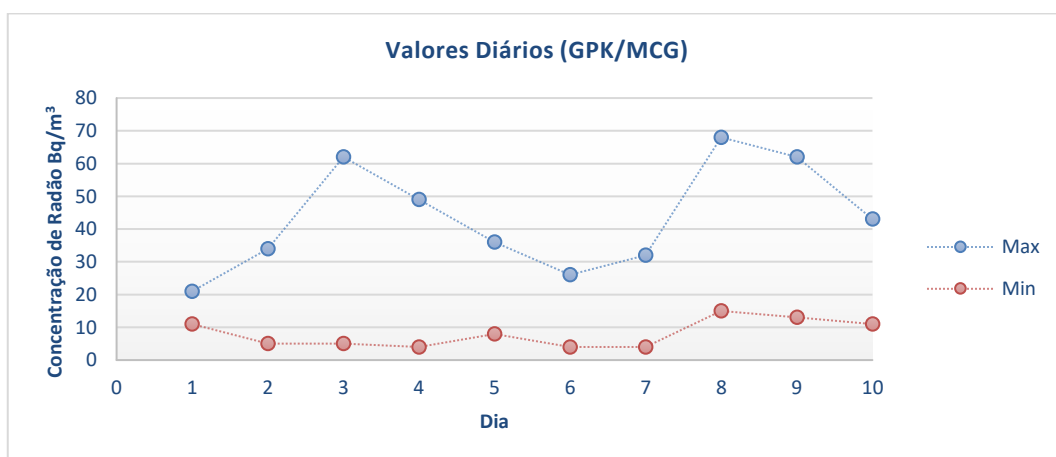


Figura 29 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (GPK(MCG)).

No espaço LMG, observaram-se valores de radão entre um máximo de 95 Bq/m³ e um mínimo de 10 Bq/m³. A concentração média global foi de 45 Bq/m³, sendo que, ao considerar exclusivamente os dias úteis, o valor médio foi de 46 Bq/m³ (Figura 30) e (Figura 31).

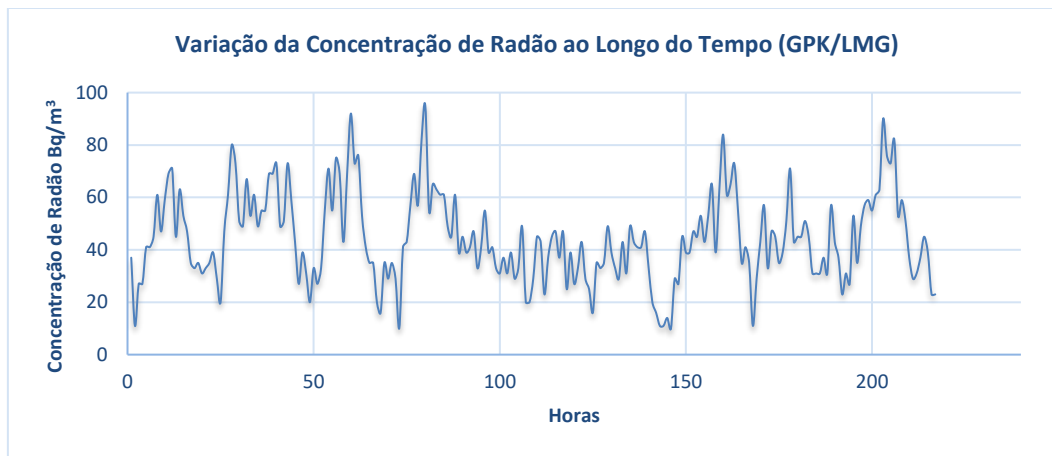


Figura 30 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (GPK/LMG).

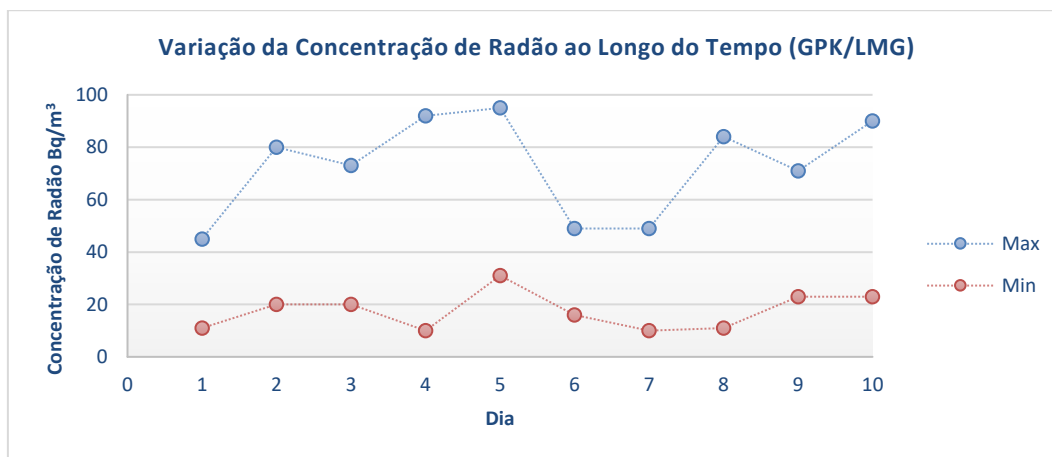


Figura 31 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (GPK/LMG).

O espaço DSO apresentou maior amplitude de variação relativamente aos restantes locais monitorizados, com um valor máximo de 291 Bq/m³ e um valor mínimo de 2 Bq/m³. A média global situou-se em 101 Bq/m³, sendo que, ao restringir a análise aos dias úteis, a média foi de 83 Bq/m³ (Figura 32) e (Figura 33).

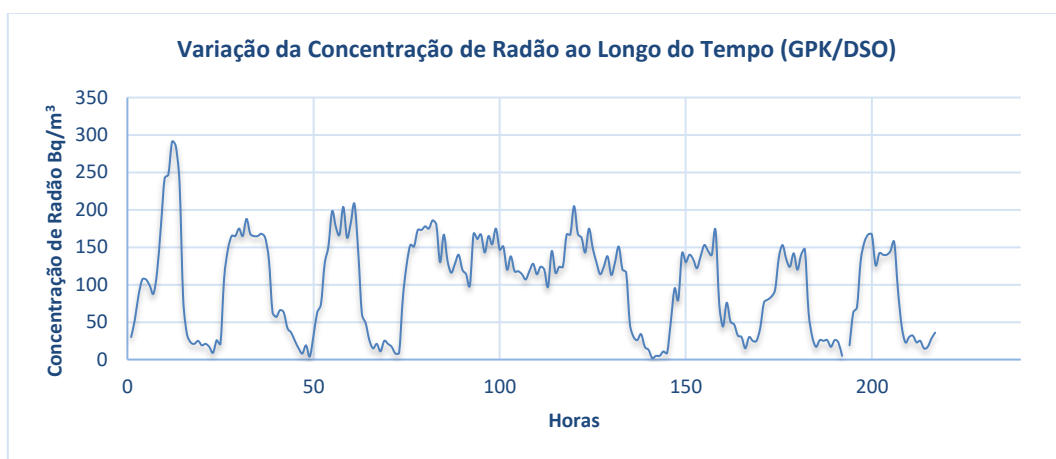


Figura 32 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (GPK/DSO).

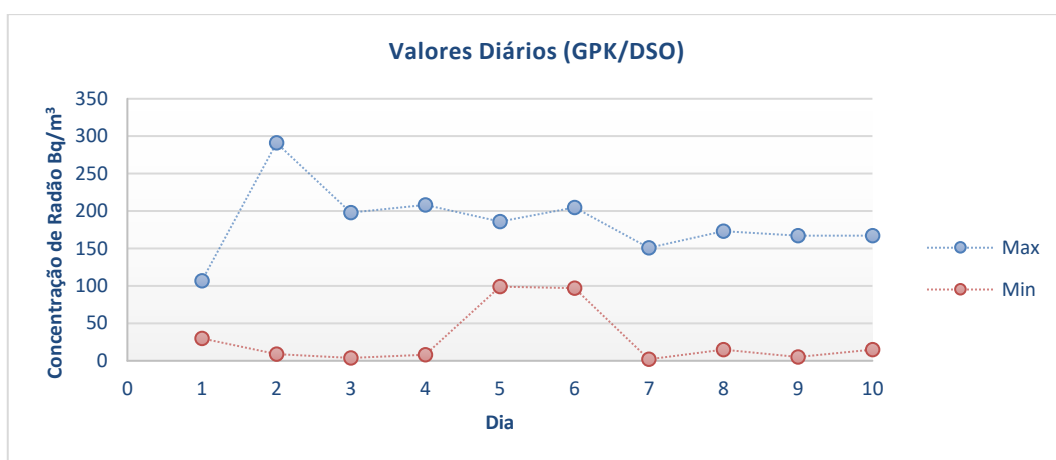


Figura 33 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (GPK/DSO).

Na cave, verificou-se uma variação entre um valor máximo de 251 Bq/m³ e um valor mínimo de 55 Bq/m³. A concentração média global foi de 109 Bq/m³, enquanto a média relativa aos dias úteis correspondeu a 105 Bq/m³, ver (Figura 34) e (Figura 35).

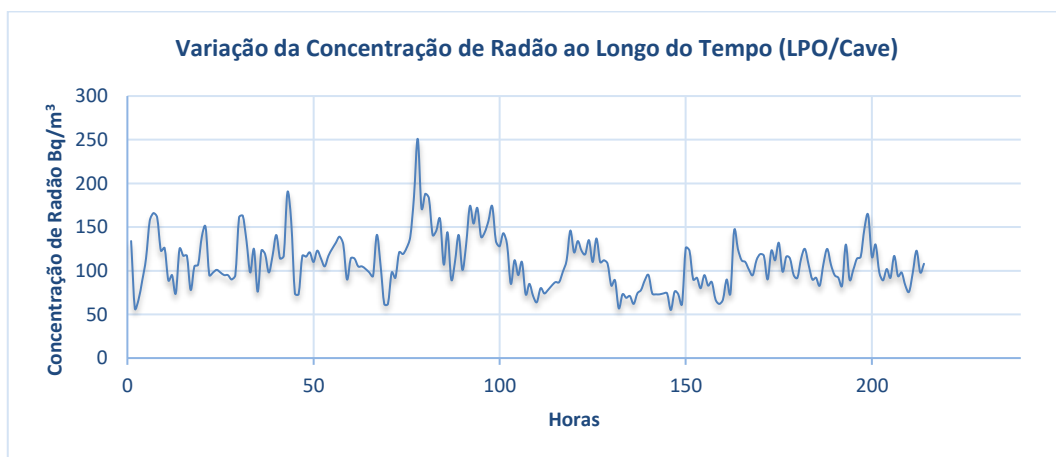


Figura 34 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (LPO/Cave).

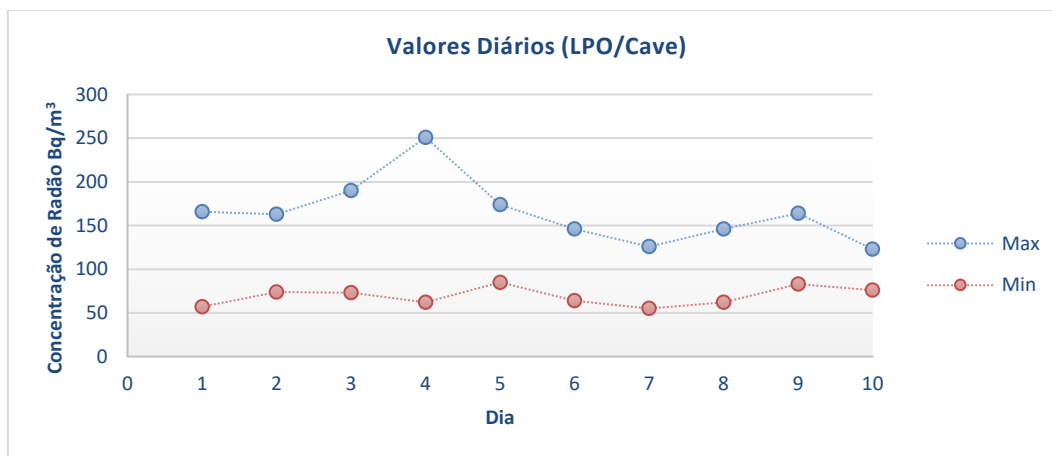


Figura 35 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (LPO/Cave).

Na área destinada ao público, os teores de radão oscilaram entre um máximo de 168 Bq/m³ e um mínimo de 23 Bq/m³. A média global registada foi de 72 Bq/m³, valor que se manteve praticamente inalterado quando considerados apenas os dias úteis (71 Bq/m³) (Figura 36) e (Figura 37).

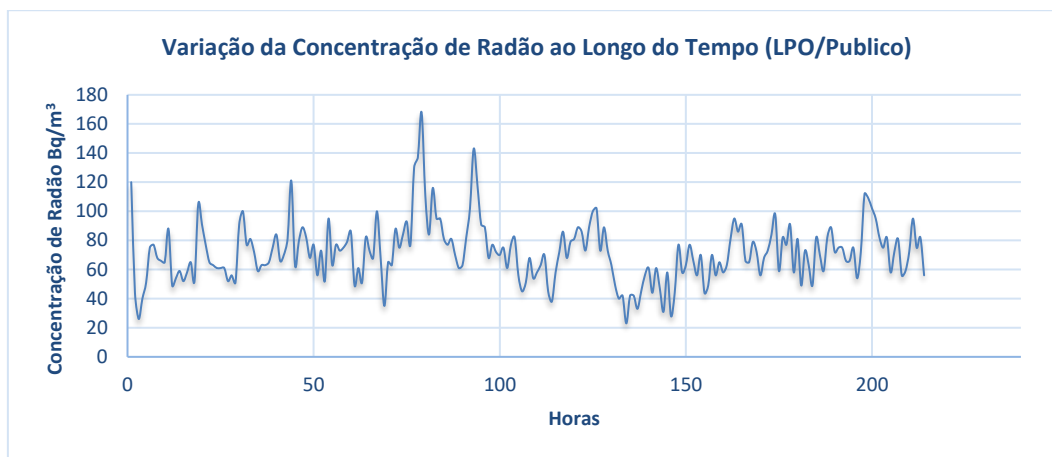


Figura 36 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (LPO/Público).

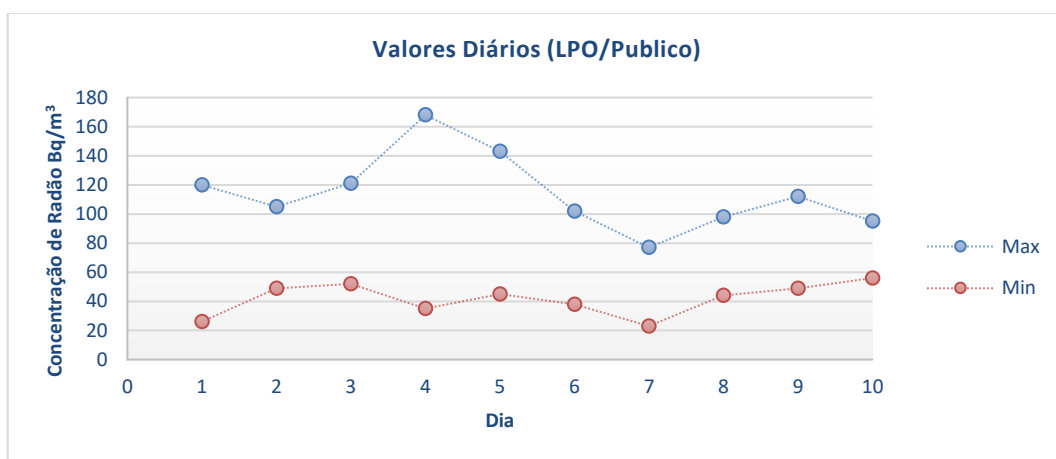


Figura 37 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (LPO/Público).

Na área de acesso reservado, a concentração de radão variou entre um valor máximo de 191 Bq/m³ e um mínimo de 26 Bq/m³. A média global situou-se em 83 Bq/m³, sendo que a média dos dias úteis apresentou um valor muito próximo, de 84 Bq/m³ (Figura 38) e (Figura 39).

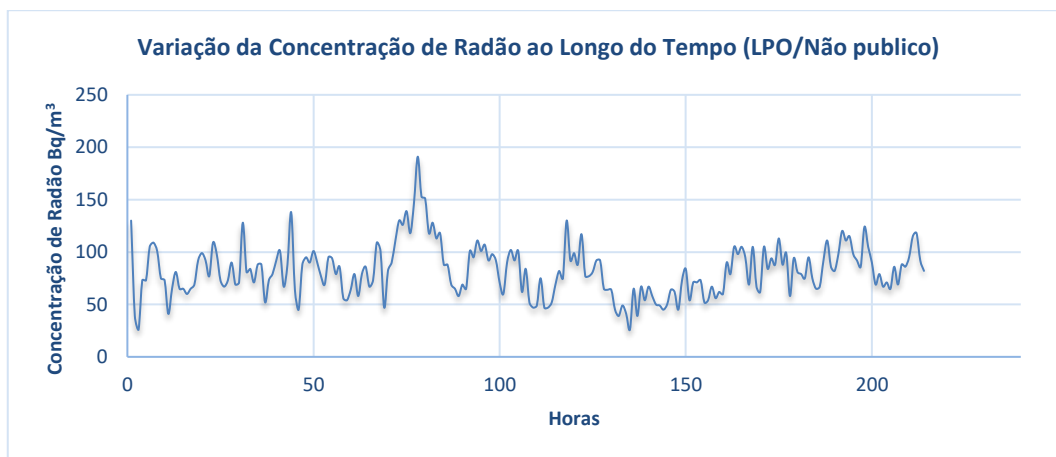


Figura 38 - Variação da concentração de Rn na 1ª fase (LPO/Não público).

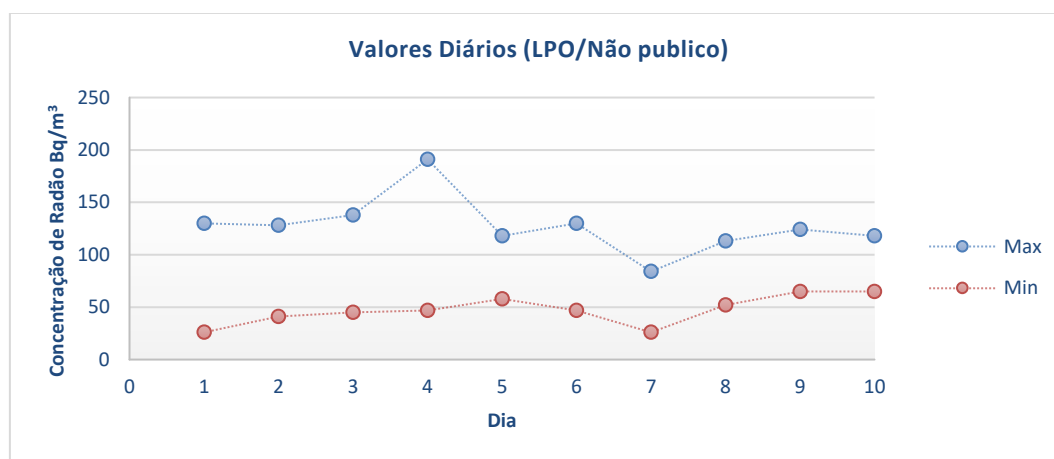


Figura 39 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 1ª fase (LPO/Não público).

3.2 Avaliação Detetores Ativos – 2ª Fase

Na Contrastaria do Porto, a segunda fase de monitorização abrangeu quatro locais distintos (RSP, LMP, CSI e UGF). Nesta etapa, as medições de longa duração da concentração de radão no ar foram efetuadas em registo horário contínuo, permitindo posteriormente a consolidação dos resultados, e em particular avaliar a variação da concentração do radão ao longo do dia. No edifício Goldpark, a avaliação decorreu em cinco locais (RSG, MCG, LMG, CSI e DSO), seguindo o mesmo procedimento. Na Livraria do Porto, a monitorização incidiu sobre três locais: cave, área de acesso ao público e área de acesso restrito (não público). Tal como nos restantes edifícios, foram obtidas séries temporais contínuas de longa duração.

Na tabela seguinte apresenta-se um resumo dos resultados obtidos, ver Tabela 6.

Tabela 6 - Quadro resumo de valores de radão - 2ª fase, detetores ativos.

Edifício	Local	Piso	Valores de Radão (Bq/m³)			
			Max	Min	Média	Média Corrigida (dias uteis)
CPO	RSP	0	1016	9	421	359
	LMP	0	448	38	137	145
	CSI	0	595	2	149	137
	UGF	0	555	23	141	160
GPK	RSG	0	134	0	23	18
	MCG	0	361	0	45	24
	LMG	0	432	2	91	63
	CSI	0	95	0	29	26
	DSO	0	161	0	43	30
LPO	Cave	-1	418	2	158	150
	Público	0	298	0	82	79
	Não público	0	323	0	98	92

Na contrastaria do porto, a análise dos dados recolhidos, ver Tabela 12 (Figura 40), verifica-se que o comportamento heterogéneo dos compartimentos se mantém. Foi na RSP que foram registados os valores mais elevados de radão, sendo esta a zona com a maior acumulação entre os compartimentos estudados.

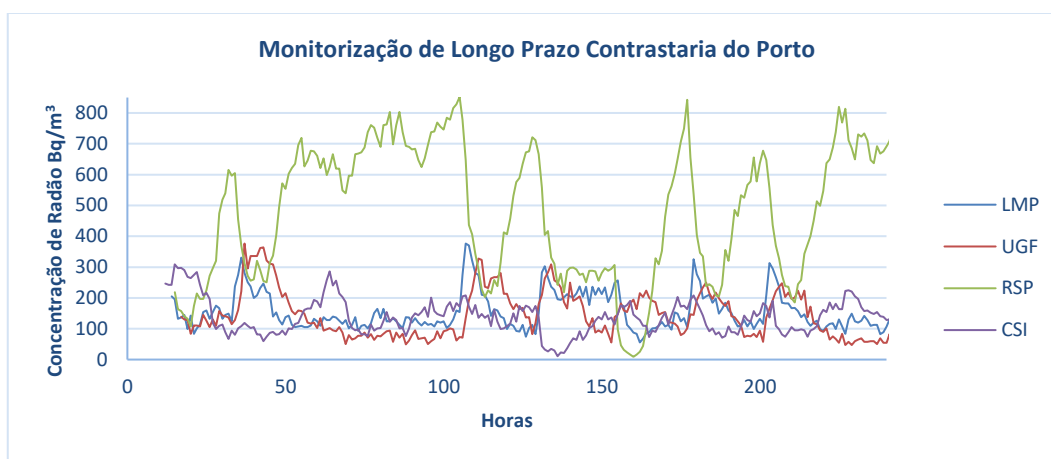


Figura 40 - Monitorização de Longo Prazo - Contrastaria do Porto.

No edifício do Goldpark, através da análise dos resultados, ver Tabela 16 (Figura 41), verifica-se que os valores mais elevados foram registados nas secções MCG, LMP e RSG, embora abaixo do valor de referência de 300 Bq/m³. Estas três secções evidenciam um comportamento homogêneo, em contraste com a DSO e a CSI que registaram valores de concentração de radão mais baixos e também evidenciaram um comportamento semelhante.

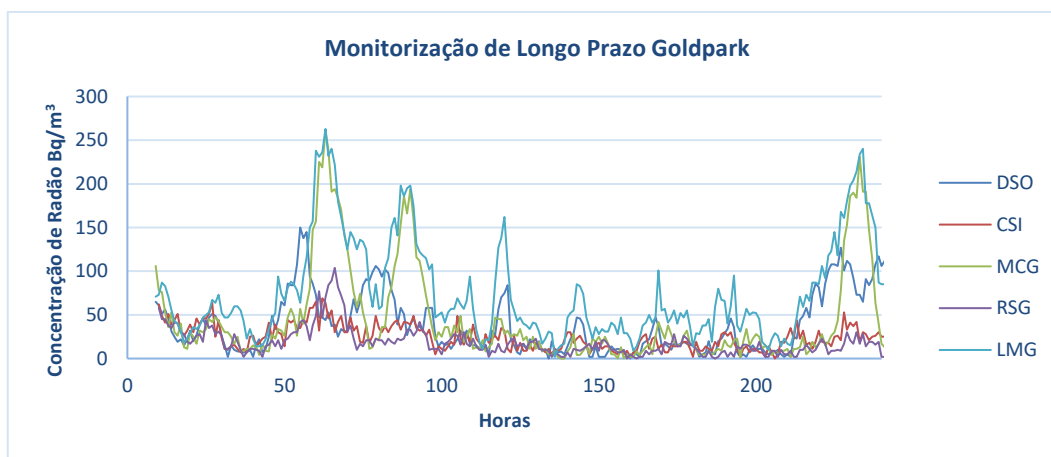


Figura 41 - Monitorização de Longo Prazo, Goldpark.

Na livraria do porto, a análise dos dados recolhidos, ver Tabela 6 (Figura 42), evidencia um comportamento homogêneo em todo o edifício, embora seja na cave onde ocorrem os níveis de radão mais elevados. Os dados também revelam alguma tendência para a acumulação de radão na área não acessível ao público, embora apenas se tenha registado um pico que ultrapassou o valor de referência de 300 Bq/m³.

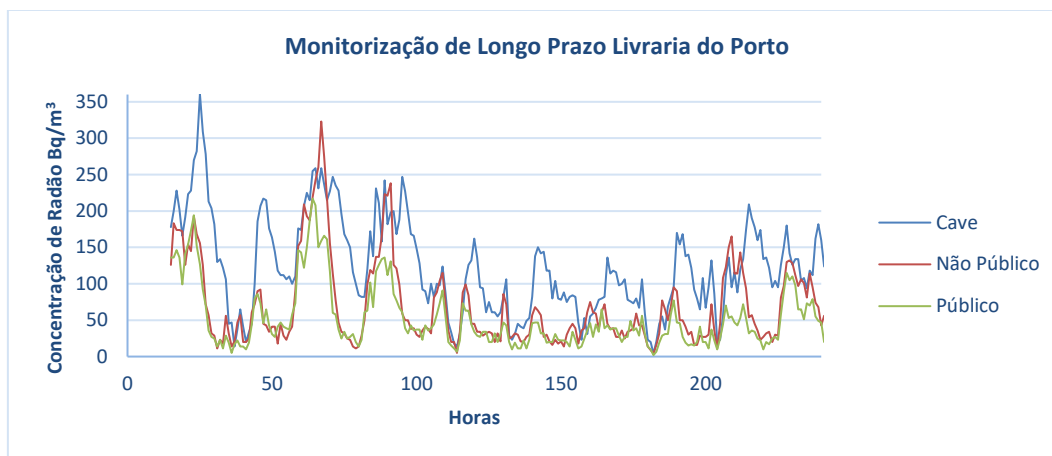


Figura 42 - Monitorização de longo prazo, Livraria do Porto.

3.2.1 Análise compartimento a compartimento

Na RSP os valores oscilaram entre um máximo de 1016 Bq/m³ e um mínimo de 9 Bq/m³, com média global de 421 Bq/m³ e média em dias úteis de 359 Bq/m³ (Figura 43) e (Figura 44).

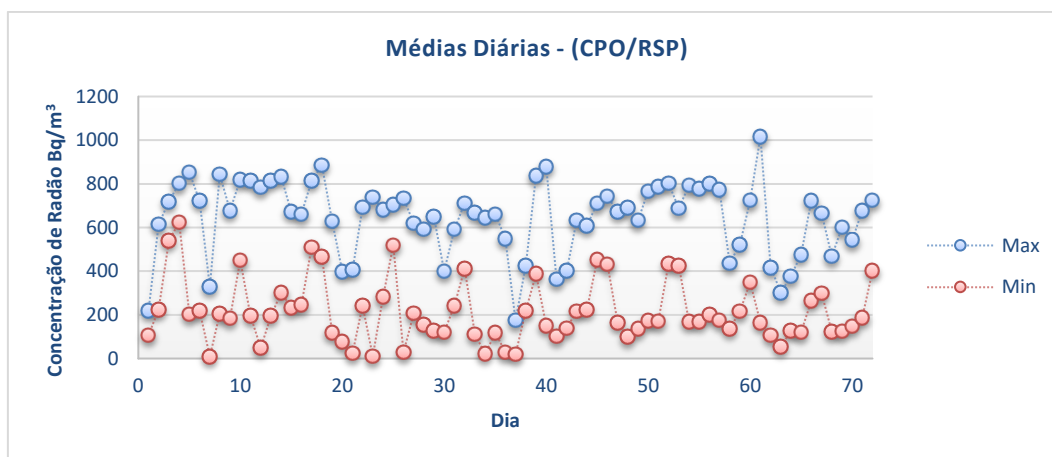


Figura 43 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (CPO/RSP).

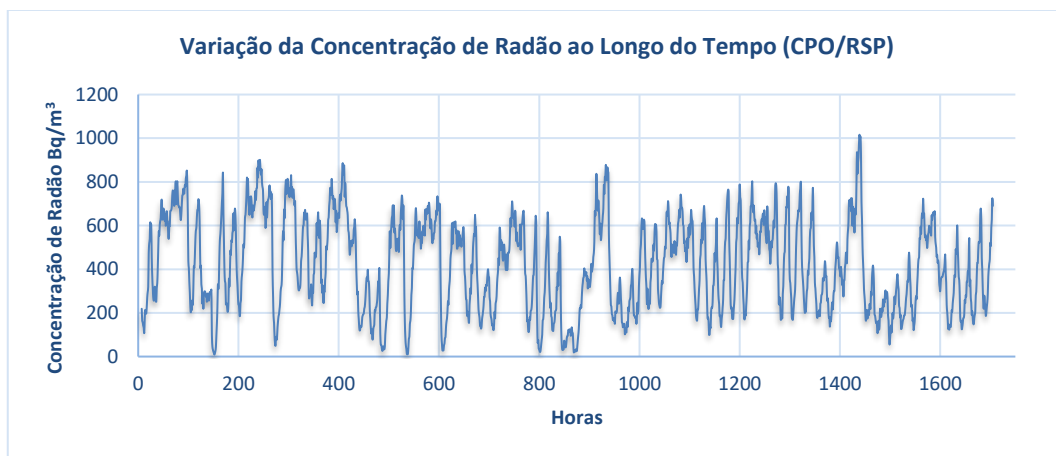


Figura 44 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (CPO/RSP).

No LMP a concentração variou entre 448 Bq/m³ (máximo) e 38 Bq/m³ (mínimo). A média global foi de 137 Bq/m³, enquanto a média em dias úteis atingiu 145 Bq/m³ (Figura 45) e (Figura 46).

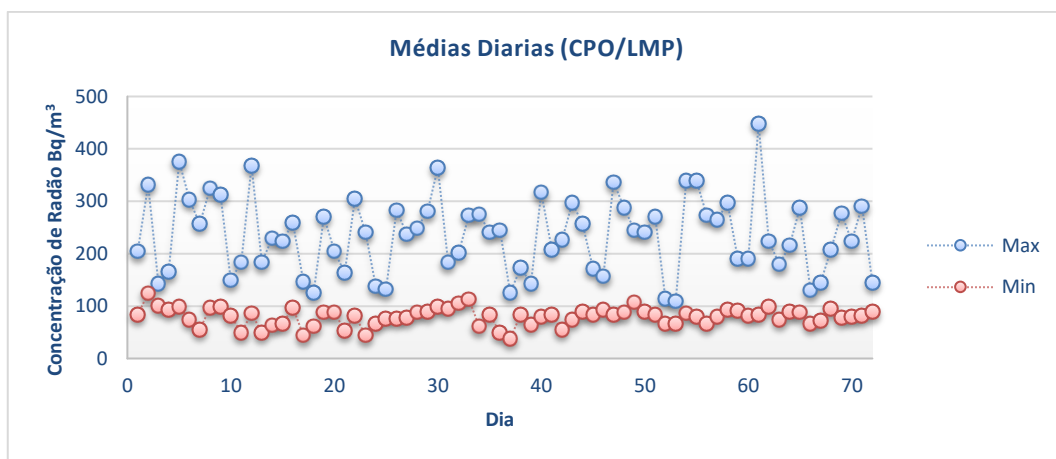


Figura 45 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (CPO/LMP).

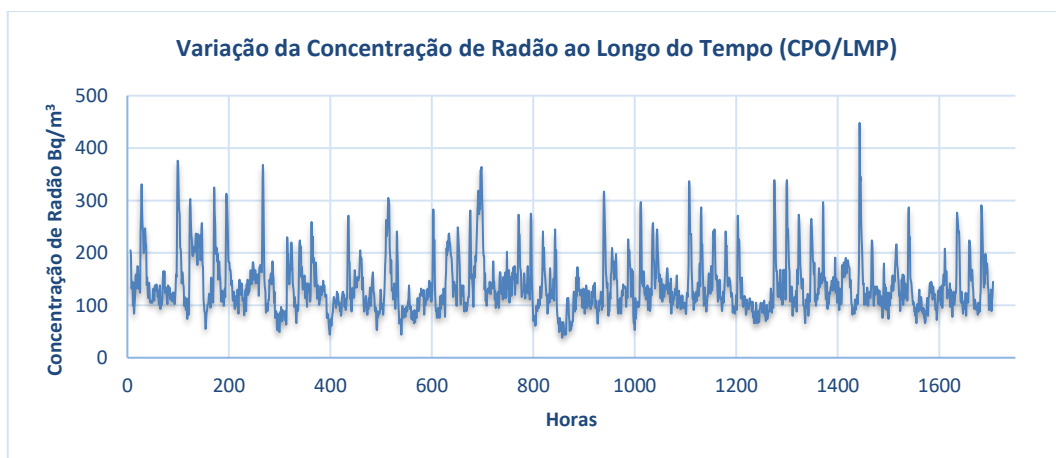


Figura 46 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (CPO/LMP).

No CSI os registos indicaram um máximo de 595 Bq/m³ e um mínimo de 2 Bq/m³, com média global de 149 Bq/m³ e média em dias úteis de 137 Bq/m³ (Figura 47) e (Figura 48).

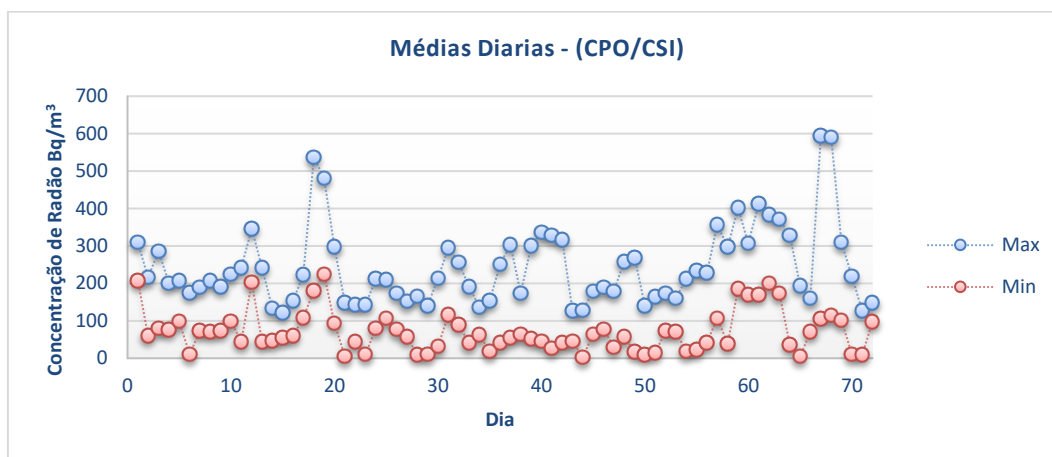


Figura 47 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (CPO/CSI).

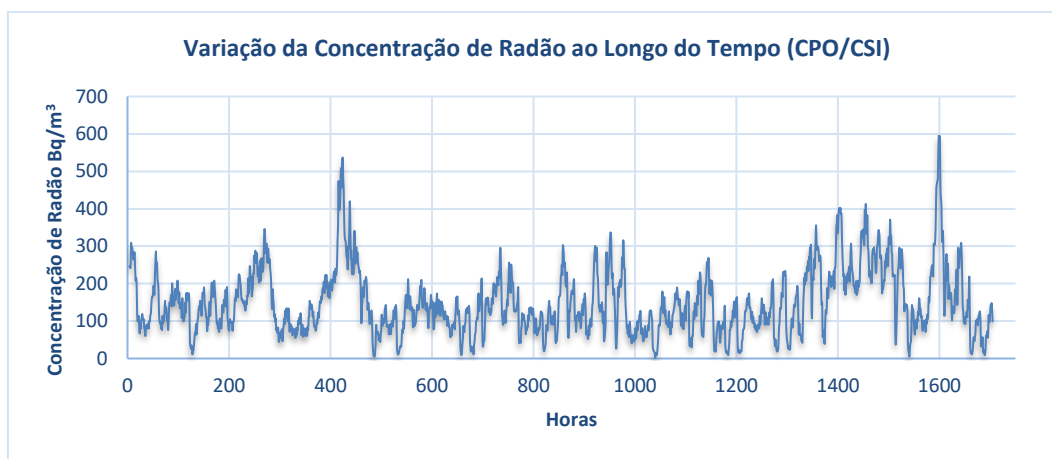


Figura 48 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (CPO/CSI).

Na UGF verificaram-se um máximo de 555 Bq/m³ e um mínimo de 23 Bq/m³. A média global foi de 141 Bq/m³ e a média em dias úteis foi de 160 Bq/m³ (Figura 49) e (Figura 50).

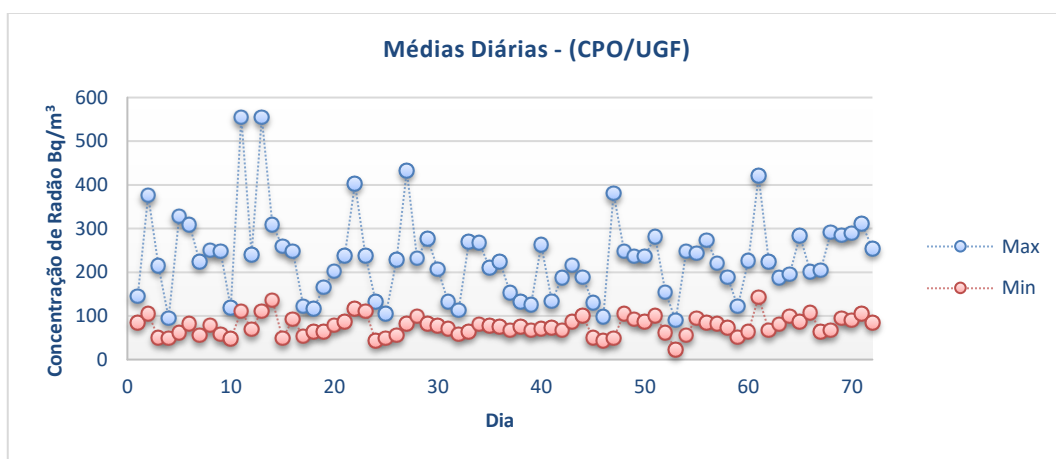


Figura 49 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (CPO/UGF).

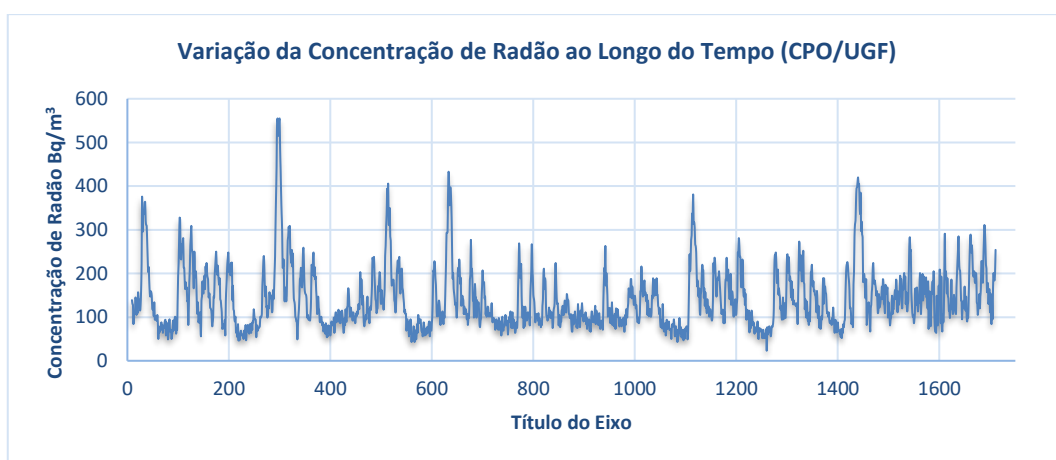


Figura 50 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (CPO/UGF).

Na RSG os teores de radão variaram entre 134 Bq/m³ (máximo) e 0 Bq/m³ (mínimo), com média global de 23 Bq/m³ e média em dias úteis de 18 Bq/m³ (Figura 51) e (Figura 52).

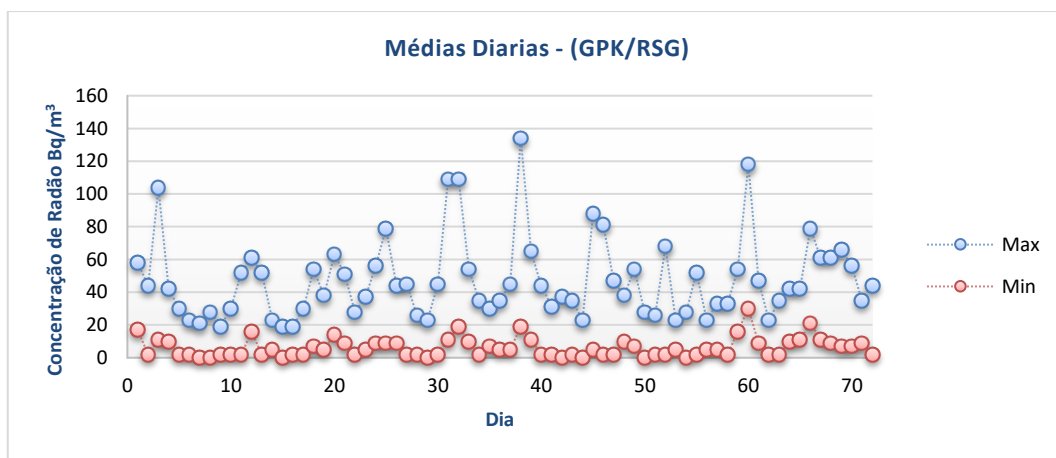


Figura 51 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (GPK/RSG).

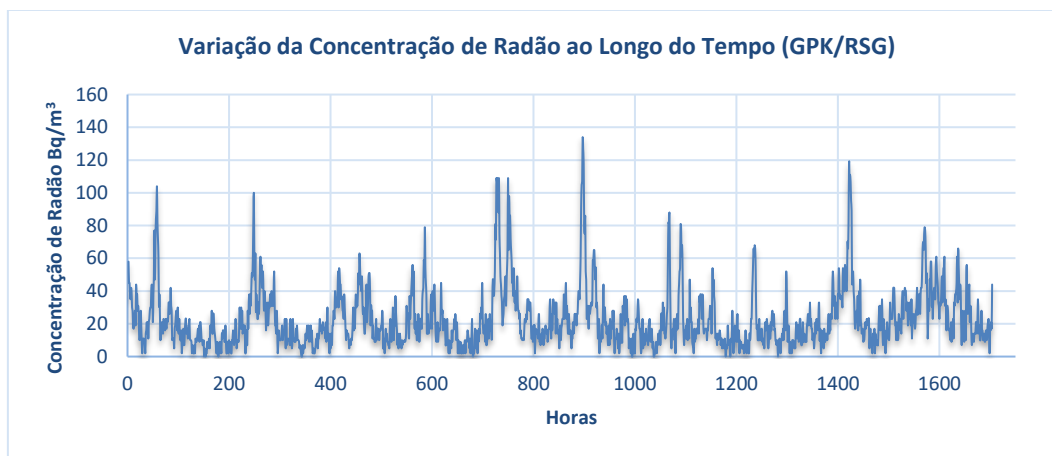


Figura 52 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (GPK/RSG).

Na MCG foram registados valores entre 361 Bq/m³ e 0 Bq/m³, com média global de 45 Bq/m³ e média em dias úteis de 24 Bq/m³ (Figura 54) e (Figura 55).

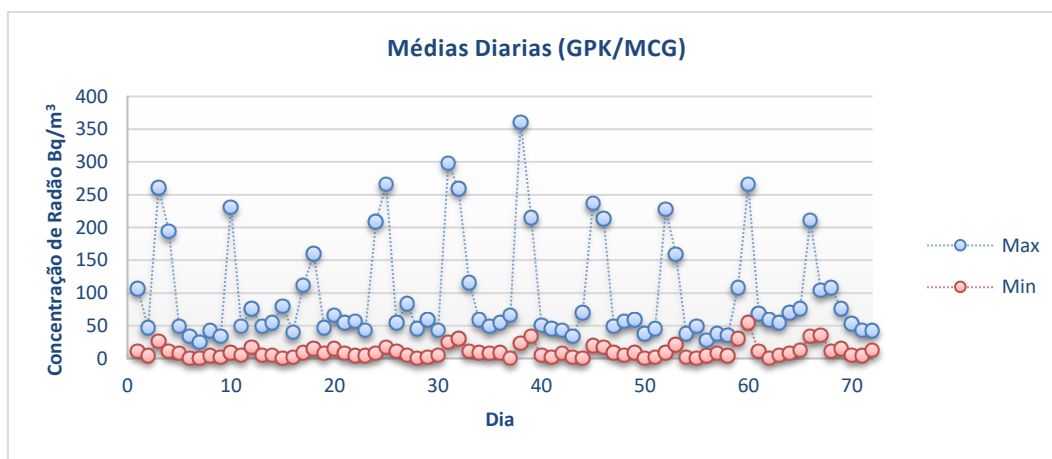


Figura 53 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (GPK/MCG).

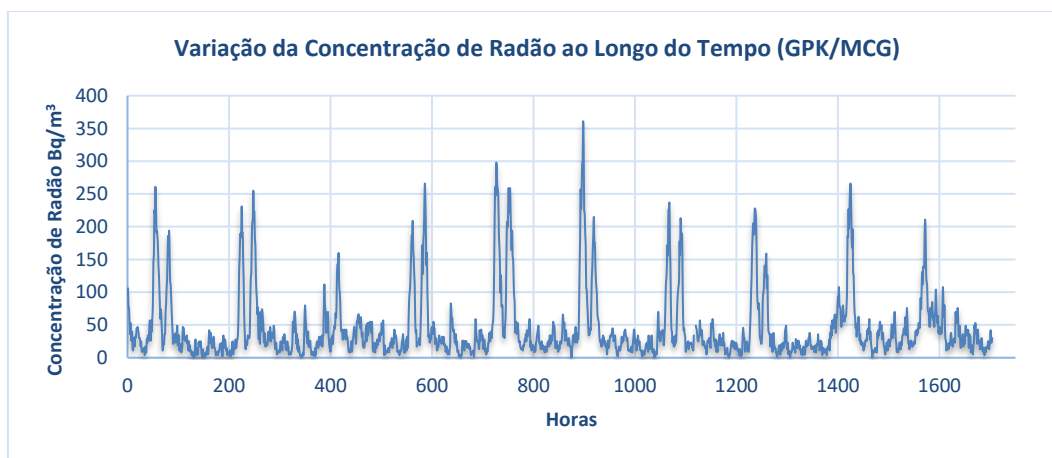


Figura 54 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (GPK/MCG).

No LMG a concentração variou entre 432 Bq/m³ e 2 Bq/m³, resultando numa média global de 91 Bq/m³ e numa média em dias úteis de 63 Bq/m³ (Figura 55) e (Figura 56).

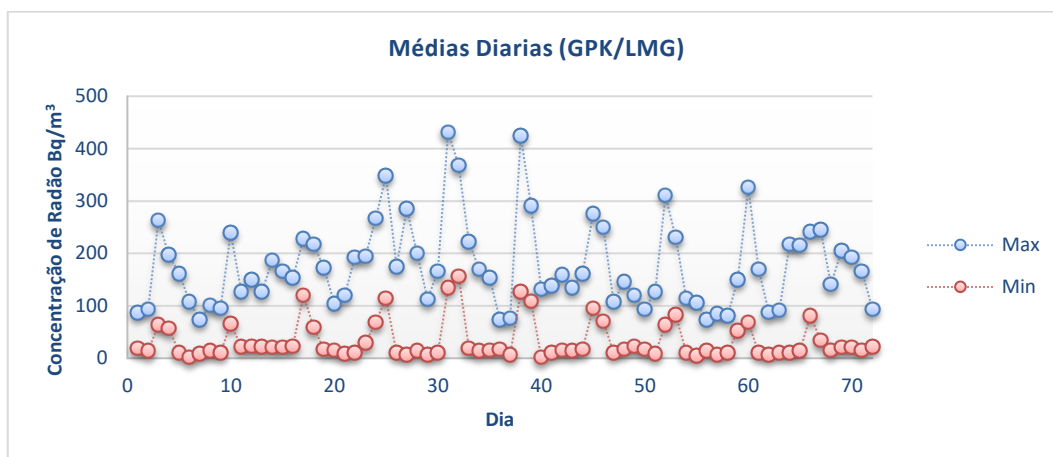


Figura 55 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (GPK/LMG).

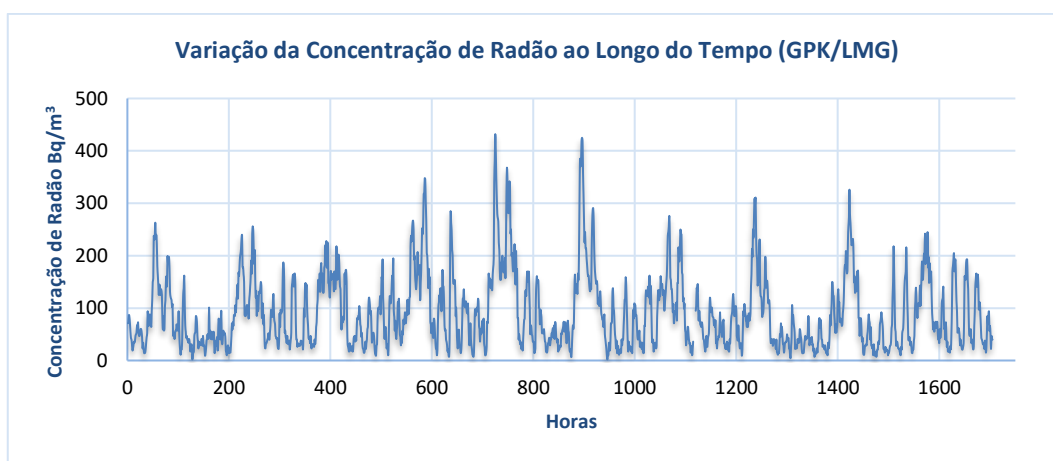


Figura 56 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (GPK/LMG).

No CSI os valores oscilaram entre 95 Bq/m³ e 0 Bq/m³, com média global de 29 Bq/m³ e média em dias úteis de 26 Bq/m³ (Figura 57) e (Figura 58).

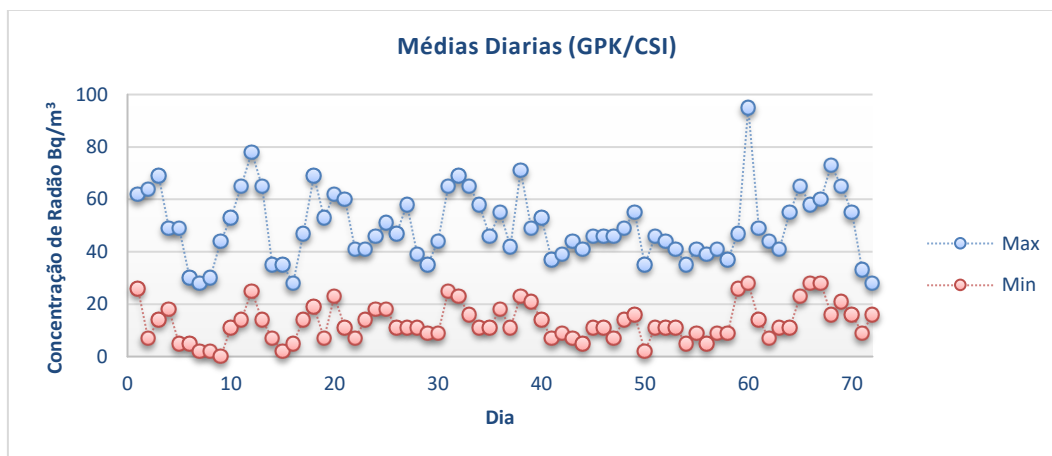


Figura 57 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (GPK/CSI).

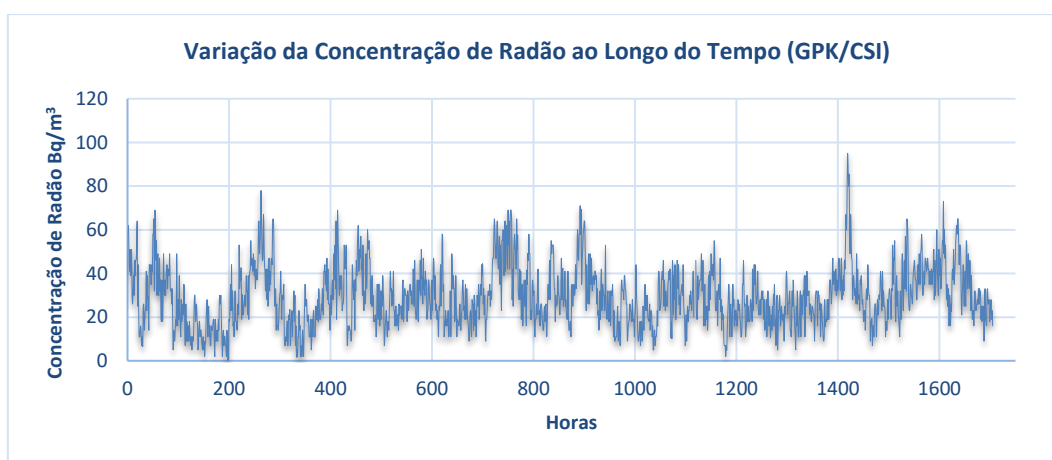


Figura 58 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (GPK/CSI).

No DSO verificaram-se concentrações entre 161 Bq/m³ e 0 Bq/m³, com média global de 43 Bq/m³ e média em dias úteis de 30 Bq/m³ (Figura 57) e (Figura 58)

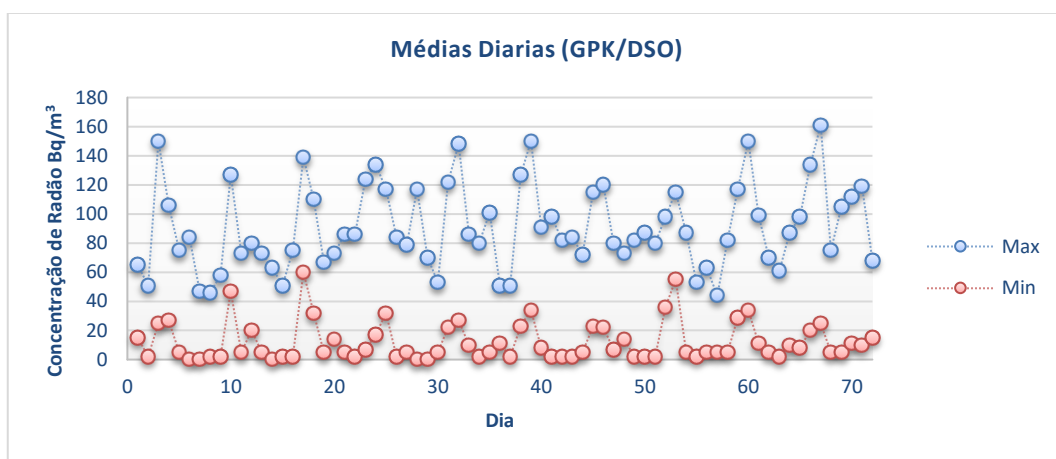


Figura 59 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (GPK/DSO).

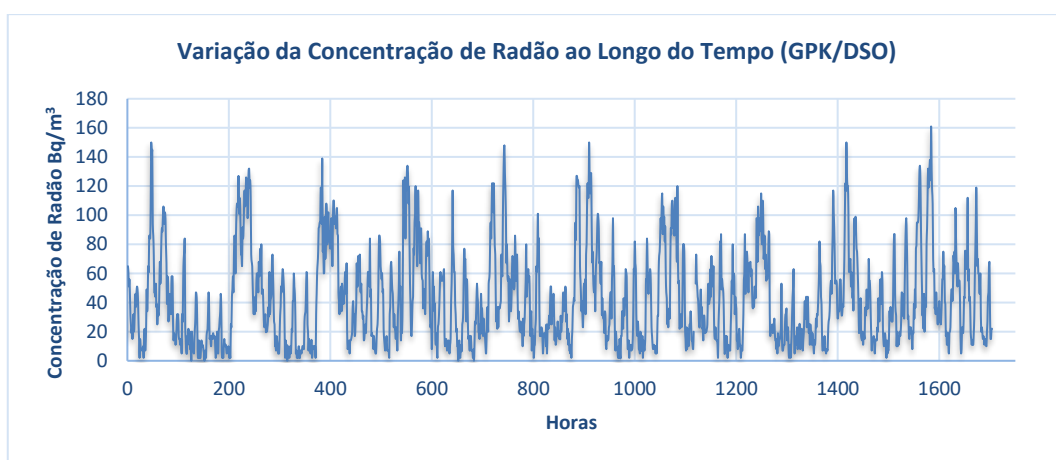


Figura 60 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (GPK/DSO).

Na cave da livraria do porto registou-se um valor máximo de 418 Bq/m³ e um mínimo de 2 Bq/m³, com média global de 158 Bq/m³ e média em dias úteis de 150 Bq/m³ (Figura 61) e (Figura 62).

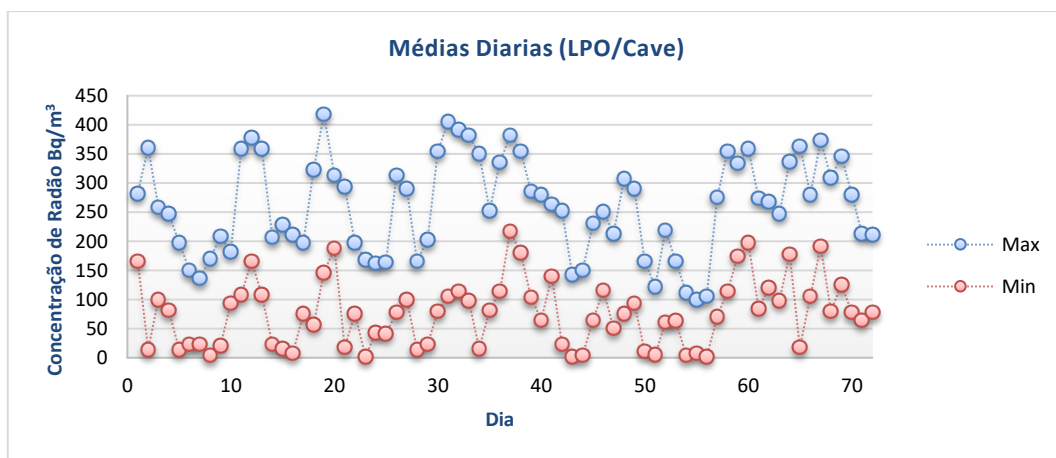


Figura 61 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (LPO/Cave).

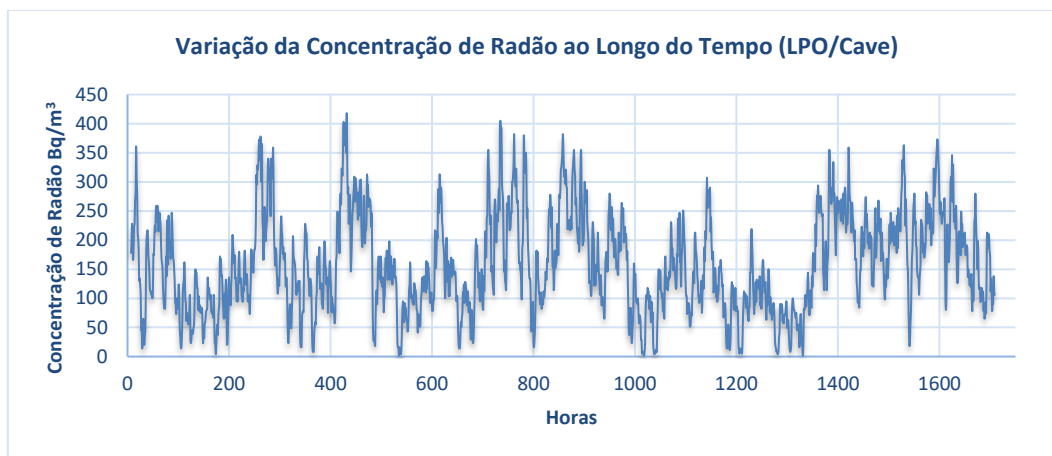


Figura 62 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (LPO/Cave).

Na zona de acesso ao público da livraria do Porto valores oscilaram entre 298 Bq/m³ e 0 Bq/m³, resultando numa média global de 82 Bq/m³ e numa média em dias úteis de 79 Bq/m³ (Figura 63) e (Figura 64).

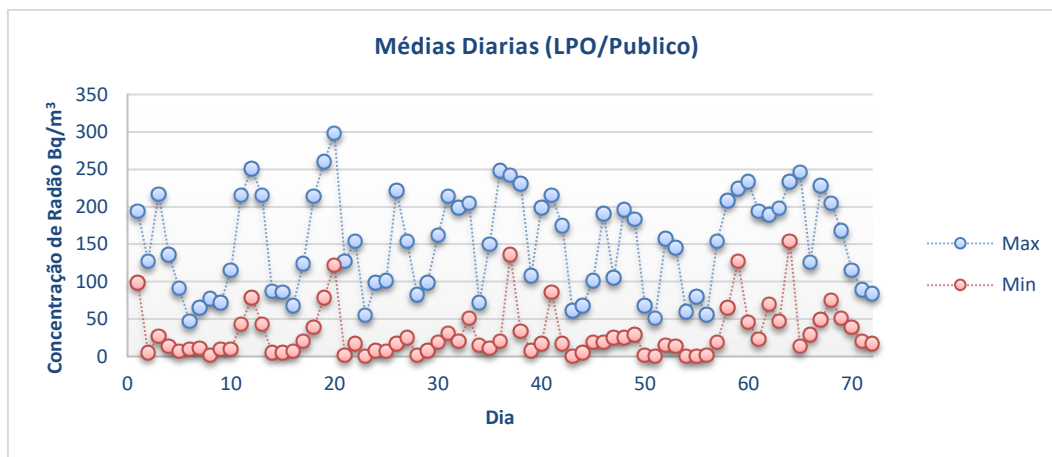


Figura 63 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (LPO/Público).

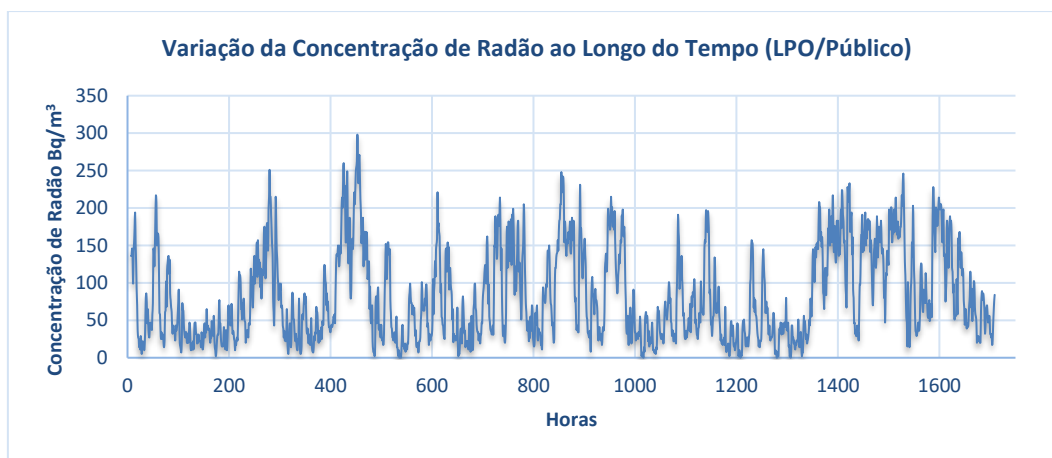


Figura 64 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (LPO/Público).

Na área de acesso restrito da livraria do Porto foram observadas concentrações entre 323 Bq/m³ e 0 Bq/m³, com média global de 98 Bq/m³ e média em dias úteis de 92 Bq/m³ (Figura 65) e (Figura 66).

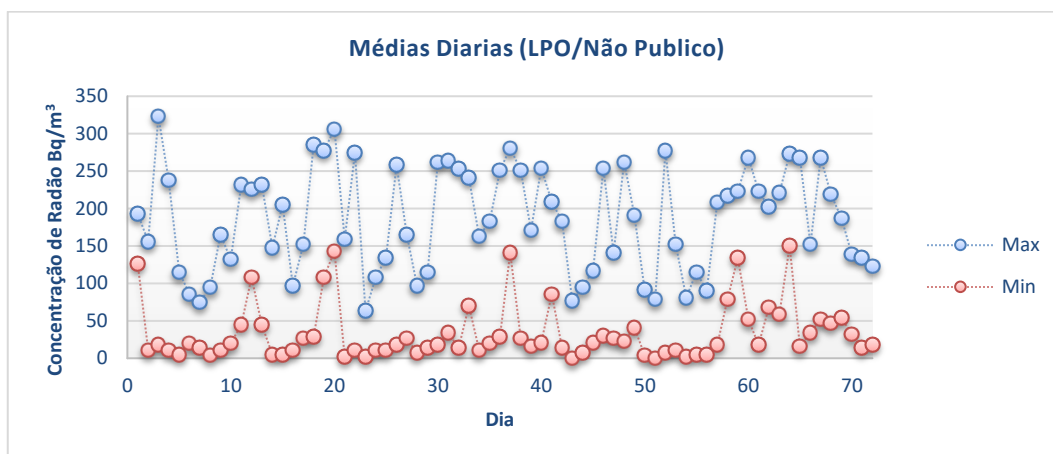


Figura 65 - Variação da concentração máxima e mínima de Rn na 2ª fase (LPO/Não público).

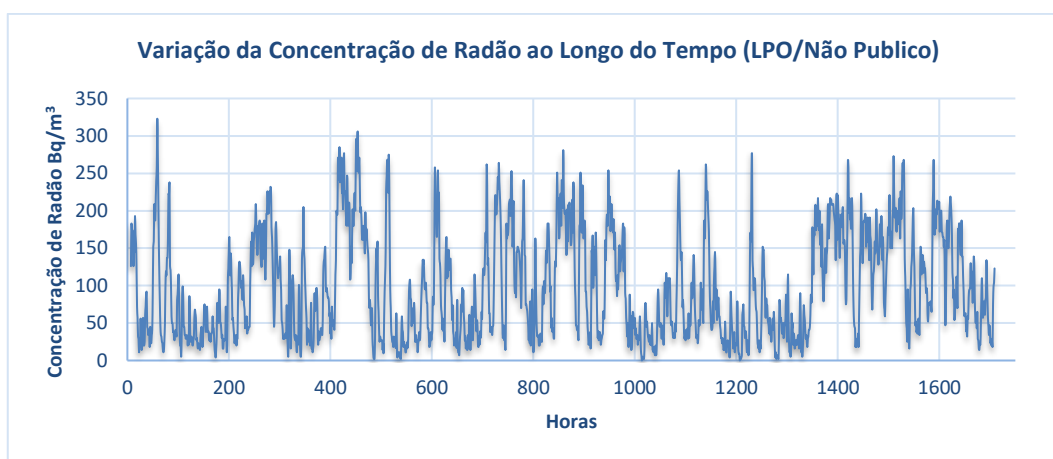


Figura 66 - Variação da concentração de Rn na 2ª fase (LPO/Não público).

3.3 Avaliação Detetores Passivos – 2ª Fase

As atividades de radão determinadas são apresentadas com a incerteza associada em Bq/m³, ver Tabela 7. No edifício da Contrastaria do Porto, foram avaliados quatro locais: a RSP onde se registou uma atividade média de radão de 469 ± 49 Bq/m³, o LMP onde a atividade média de radão registada foi de 140 ± 16 Bq/m³, a CSI com uma atividade média de radão de 162 ± 18 Bq/m³ e a UGF onde a atividade média registada foi de 139 ± 16 Bq/m³. De destacar que a RSP foi o local que registou um maior valor de atividade média. No edifício do Goldpark, a DSO registou um valor de atividade média de $54,4 \pm 7,0$ Bq/m³, e na Livraria do Porto, na cave, foi registado um valor de atividade média de 153 ± 17 Bq/m³.

Tabela 7 - Valores de Radão, CR-39

<i>Edifício</i>	<i>Local</i>	<i>N.º Detetor</i>	<i>Atividade (Bq/m³)</i>	<i>Incerteza (Bq/m³)</i>
CPO	RSP	GK1626	469	49
	LMP	GK2935	140	16
	CSI	GK2988	162	18
	UGF	GK2985	139	16
GPK	DSO	GK2968	54,4	7,0
LPO	Cave	GK2131	153	17

3.4 Cálculo da dose efetiva

3.4.1 Dose efetiva devida apenas ao radão 1º fase (RadonEye+²)

A Tabela 8 apresenta os valores médios de concentração de radão (atividade em Bq/m³), respetiva incerteza e a dose efetiva anual estimada (E, em mSv/ano) para diferentes compartimentos de três edifícios: CPO, GPK e LPO.

No CPO, observaram-se os valores mais elevados de concentração e de dose efetiva. Na RSP foi registada a dose efetiva mais significativa ($4,6 \pm 0,5$ mSv/ano). Também a CSI apresentou concentrações de radão elevadas correspondendo a uma dose de $2,2 \pm 0,2$ mSv/ano. Já o LMP e a UGF apresentaram valores dose inferiores a 1,5 mSv/ano.

No GPK, as concentrações foram, de um modo geral, reduzidas, o que corresponde a doses anuais inferiores a 0,3 mSv/ano.

Na LPO, os valores dose variaram entre 0,5 mSv/ano no piso 0 e 0,7 mSv/ano na cave.

Tabela 8 - Dose efetiva RadonEye+² (mSv/ano), avaliação preliminar.

<i>Edifício</i>	<i>Local</i>	<i>Atividade (Bq/m³)</i>	<i>Incerteza (Bq/m³)</i>	<i>E (mSv/ano)</i>
CPO	RSP	733	73	$4,6 \pm 0,5$
	LMP	190	19	$1,2 \pm 0,1$
	CSI	353	35	$2,2 \pm 0,2$
	UGF	228	23	$1,4 \pm 0,1$
GPK	RSG	19	2	$0,1 \pm 0,0(1)$
	MCG	24	2	$0,1 \pm 0,0(1)$
	LMG	45	4	$0,3 \pm 0,0(3)$
	CSI	24	2	$0,1 \pm 0,0(1)$
	DSO	101	10	$0,6 \pm 0,0(6)$
LPO	Cave	109	11	$0,7 \pm 0,0(7)$
	Público	72	7	$0,5 \pm 0,0(5)$
	Não público	83	8	$0,5 \pm 0,0(5)$

3.4.2 Dose efetiva devida apenas ao radão 2ª fase (RadonEye+²)

A Tabela 9 apresenta os valores médios de concentração de radão (atividade em Bq/m³), respetiva incerteza e a dose efetiva anual estimada (E, em mSv/ano) para diferentes compartimentos de três edifícios: CPO, GPK e LPO.

No CPO, observaram-se os valores mais elevados de concentração e de dose efetiva. Na RSP foi registada a dose efetiva mais significativa ($2,6 \pm 0,3$ mSv/ano). Já o LMP, a CSI e a UGF apresentaram valores dose inferiores a 1,0 mSv/ano.

No GPK, as concentrações foram, de um modo geral, reduzidas, o que corresponde a doses anuais inferiores a 1,0 mSv/ano.

Na LPO, os valores dose variaram entre 0,6 mSv/ano no piso 0 e 1,0 mSv/ano na cave.

Tabela 9 - Dose efetiva – RadonEye⁺2 (mSv/ano), monitorização de longa duração.

<i>Edifício</i>	<i>Local</i>	<i>Atividade (Bq/m³)</i>	<i>Incerteza (Bq/m³)</i>	<i>E (mSv/ano)</i>
CPO	RSP	421	42	$2,6 \pm 0,3$
	LMP	137	14	$0,9 \pm 0,1$
	CSI	149	15	$0,9 \pm 0,1$
	UGF	141	14	$0,9 \pm 0,1$
GPK	RSG	23	2	$0,1 \pm 0,0(1)$
	MCG	45	5	$0,3 \pm 0,0(3)$
	LMG	91	9	$0,6 \pm 0,0(6)$
	CSI	29	3	$0,2 \pm 0,0(2)$
	DSO	43	4	$0,3 \pm 0,0(3)$
LPO	Cave	158	16	$1,0 \pm 0,1$
	Público	82	8	$0,5 \pm 0,1$
	Não público	98	10	$0,6 \pm 0,1$

3.4.3 Dose efetiva devida apenas ao radão (CR-39)

A Tabela 10 apresenta os valores de concentração média de radão (atividade em Bq/m³), respetivas incertezas e a dose efetiva anual estimada (E, em mSv/ano), para diferentes compartimentos dos edifícios CPO, GPK e LPO, monitorizados com detetor CR-39.

Na CPO, verificou-se novamente a maior variabilidade e os níveis mais críticos. A RSP registou a concentração mais elevada (469 Bq/m³), correspondendo a uma dose efetiva anual de $2,9 \pm 0,3$ mSv/ano. Nos restantes compartimentos LMP, CSI e UGF as doses estimadas variam entre 0,9 mSv/ano a 1,0 mSv/ano.

No GPK, apenas o compartimento DSO foi avaliado, tendo sido calculada uma dose $0,3 \pm 0,04$ mSv/ano.

Na LPO, a Cave apresentou uma dose estimada de $0,9 \pm 0,1$ mSv/ano.

Em síntese, o CPO evidencia novamente a situação mais crítica, particularmente no RSP, enquanto o GPK e o LPO apresentam concentrações moderadas ou baixas

Tabela 10 - Dose efetiva - CR-39 (mSv/ano)

<i>Edifício</i>	<i>Local</i>	<i>Atividade (Bq/m³)</i>	<i>Incerteza (Bq/m³)</i>	<i>E (mSv/ano)</i>
CPO	RSP	469	49	$2,9 \pm 0,3$
	LMP	140	16	$0,9 \pm 0,1$
	CSI	162	18	$1,0 \pm 0,1$
	UGF	139	16	$0,9 \pm 0,1$
GPK	DSO	54,4	7,0	$0,3 \pm 0,0(4)$
LPO	Cave	153	17	$0,9 \pm 0,1$

3.5 Condições Meteorológicas

A caracterização dos edifícios decorreu entre os dias 3 e 12 de dezembro de 2024. Durante este período, a cidade do Porto apresentou condições meteorológicas típicas do início da estação invernal, de acordo com os registos do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) e do serviço Meteoblue (Figura 67).

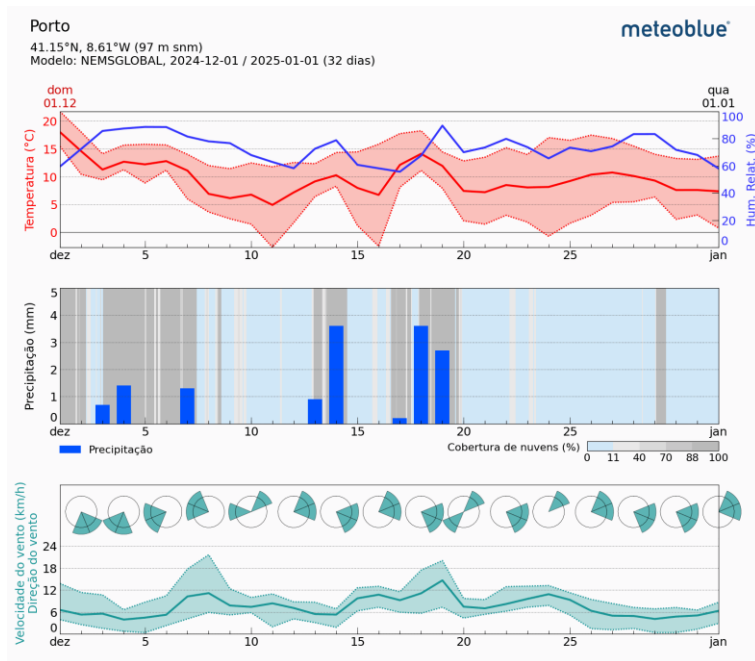


Figura 67 - Condições meteorológicas registadas durante o mês de dezembro de 2024.

Nota: Adaptado de meteoblue.com, 2025

As temperaturas máximas diárias oscilaram entre 13 °C e 17 °C, com uma média próxima dos 14–15 °C, enquanto as mínimas se mantiveram entre 6 °C e 9 °C, revelando uma amplitude térmica diária moderada. Nos últimos três dias do período verificou-se uma descida progressiva da temperatura.

A precipitação ocorreu de forma irregular, com episódios concentrados sobretudo nos dias 4 a 7 e novamente a 9 de dezembro, totalizando entre 15 e 20 mm. A humidade relativa permaneceu elevada, frequentemente acima de 75–80 %, atingindo valores próximos da saturação durante os dias chuvosos.

A velocidade média do vento situou-se entre 10 e 18 km/h, com picos próximos dos 20 km/h, predominando direções de quadrante oeste-noroeste, coerentes com a influência atlântica da região.

Em síntese, o período de 3 a 12 de dezembro de 2024 foi marcado por um quadro meteorológico húmido, estável e relativamente ameno, com precipitação moderada, mas irregular, humidade persistente e um decréscimo térmico nos últimos dias, em linha com as condições climatológicas típicas do Porto no início do inverno.

Entre os dias 7 de maio e 8 de agosto de 2025, a cidade do Porto registou uma evolução meteorológica marcada pela transição gradual das condições primaveris instáveis para um regime estival seco, quente e estável, de acordo com os registos do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) e do serviço Meteoblue. Durante a segunda metade de maio, as temperaturas máximas oscilaram entre 18 °C e 24 °C,

enquanto as mínimas se situaram entre 10 °C e 14 °C, revelando uma amplitude térmica moderada. Este mês foi ainda marcado por precipitação significativa até meados do período, com um acumulado próximo dos 60 mm, em consonância com a normal climatológica, embora com irregularidade espacial e temporal. As condições atmosféricas foram dominadas por humidade relativa elevada (70–85 %) e nebulosidade frequente, intercalando episódios chuvosos com dias de maior insolação (Figura 68).

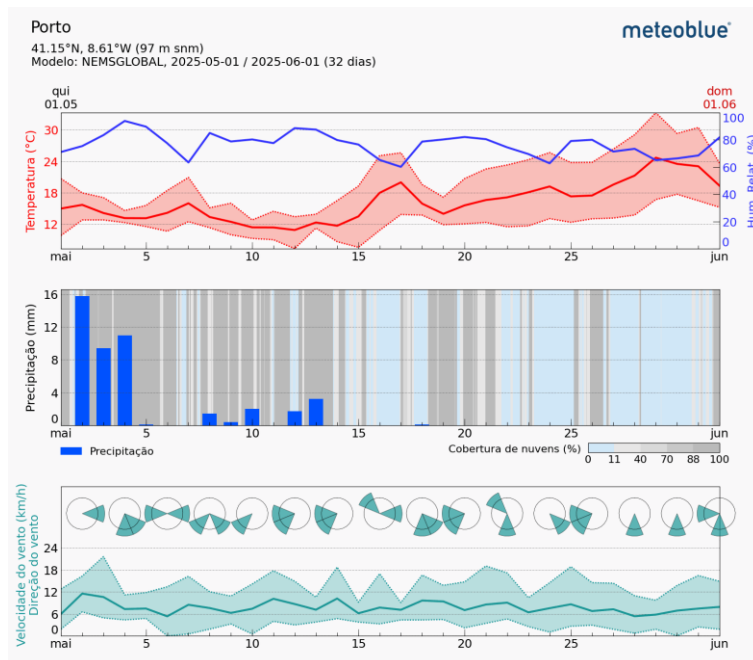


Figura 68 - Condições meteorológicas registadas em maio de 2025.

Nota: Adaptado de meteoblue.com, 2025

A partir de junho, verificou-se uma alteração clara do regime meteorológico, com temperaturas máximas entre 22 °C e 30 °C e mínimas de 13 °C a 17 °C, situando-se globalmente acima da média histórica. A precipitação tornou-se residual, praticamente inexistente após os primeiros dias do mês, enquanto a humidade relativa desceu para valores próximos dos 60–70 %. O vento apresentou velocidades médias de 12 a 20 km/h, predominantemente do quadrante oeste-noroeste, coerente com a influência atlântica (Figura 69).

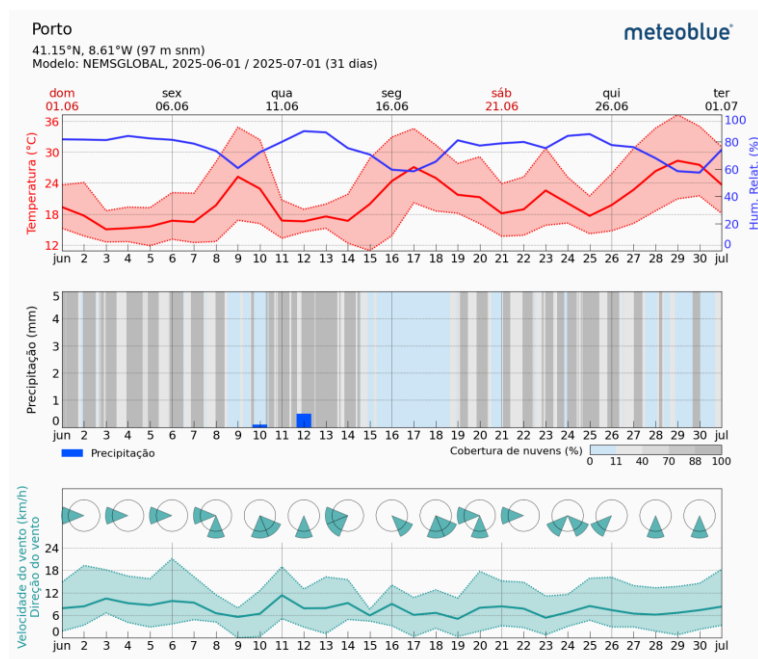


Figura 69 - Condições meteorológicas registadas em junho de 2025.

Nota: Adaptado de meteoblue.com, 2025

O mês de julho consolidou este padrão, registrando temperaturas elevadas, frequentemente entre 28 °C e 32 °C, com episódios pontuais que ultrapassaram os 35 °C, e mínimas médias entre 16 °C e 20 °C, valores claramente superiores às normais climatológicas. A precipitação foi praticamente inexistente, reforçando o carácter seco do período, e a humidade relativa estabilizou em torno dos 55–65 % (Figura 70).

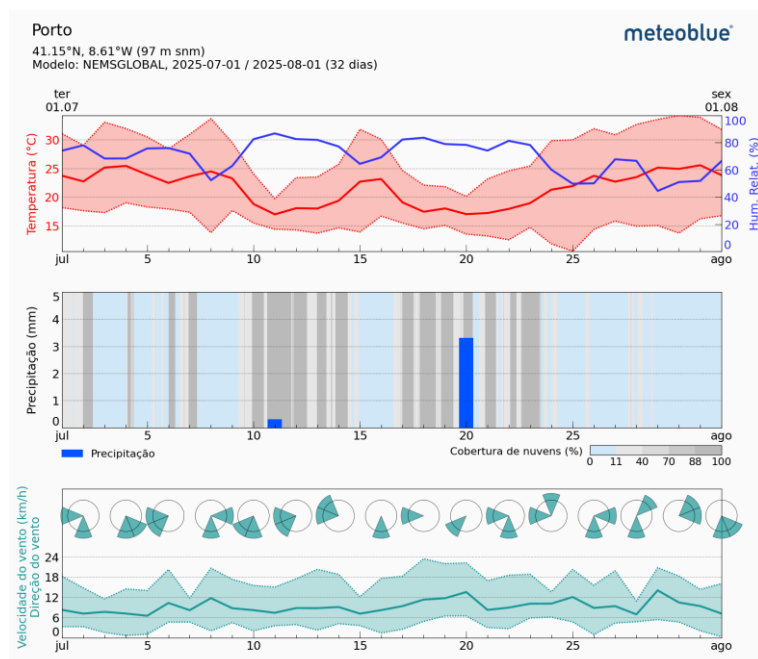


Figura 70 - Condições meteorológicas registadas em julho de 2025.

Nota: Adaptado de meteoblue.com, 2025

Nos primeiros oito dias de agosto manteve-se a configuração atmosférica, com temperaturas máximas entre 26 °C e 32 °C e mínimas de 17 °C a 19 °C, ausência de precipitação relevante e humidade relativa moderada (55–65 %). O céu apresentou-se tendencialmente pouco nublado a limpo, enquanto os ventos, de intensidade média (12–16 km/h), mantiveram a predominância do quadrante oeste-noroeste (Figura 71).

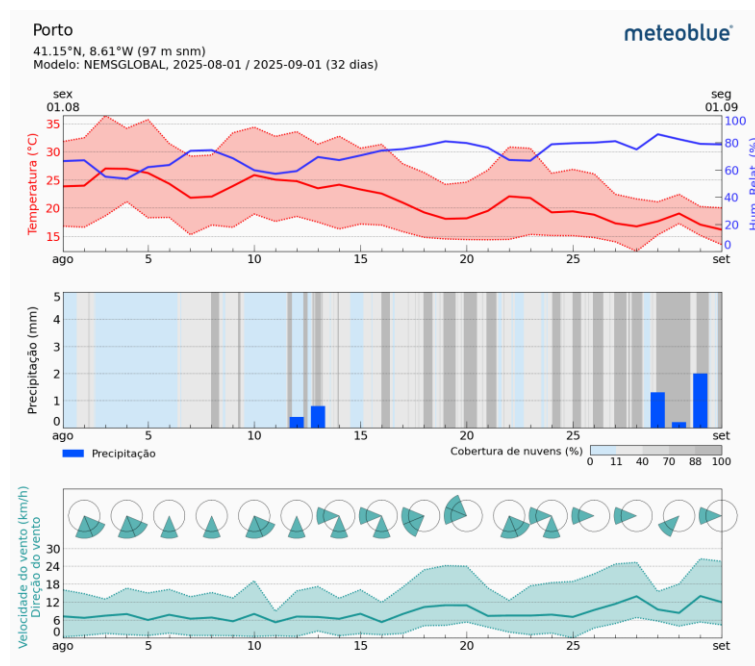


Figura 71 - Condições meteorológicas registadas de 16 junho a 1 julho.

Nota: Adaptado de meteoblue.com, 2025

Em síntese, o período compreendido entre 7 de maio e 8 de agosto de 2025 foi caracterizado por uma transição das condições húmidas e instáveis de primavera, com elevada humidade relativa e precipitação irregular, para um regime estival tipicamente atlântico, marcado por temperaturas persistentemente elevadas, baixa precipitação, humidade moderada e elevada insolação. Estes fatores criaram condições particularmente favoráveis à ventilação natural dos edifícios e, consequentemente, à redução da suscetibilidade de acumulação de radão no ar interior, em contraste com o observado no período invernal.

3.6 Variáveis Ambientais

Na primeira fase da campanha de monitorização, realizada entre 3 e 12 de dezembro de 2024, foram registados os valores de temperatura do ar (θ , °C) e de humidade relativa (Hr, %) nos diferentes compartimentos avaliados dos edifícios da Contrastaria do Porto (CPO), Goldpark (GPK) e Livraria do Porto (LPO), ver Tabela 11.

Tabela 11 - Resumo das variáveis ambientais registradas - 1ª Fase

<i>Edifício</i>	<i>Local</i>	<i>θ (°C)</i>			<i>Hr (%)</i>		
		<i>Max.</i>	<i>Min.</i>	<i>Média</i>	<i>Max.</i>	<i>Min</i>	<i>Média</i>
CPO	RSP	20,5	17,0	18,9	60	42	52
	LMP	22,5	17,5	19,5	60	38	48
	CSI	17,5	14,5	16,3	69	45	57
	UGF	22,0	18,0	19,6	61	36	48
GPK	RSG	21,5	13,0	17,6	63	32	47
	MCG	22,5	15,5	19,3	59	29	43
	LMG	22,5	17,5	20,1	58	29	42
	CSI	21,5	18,0	20,5	58	31	43
	DSO	20,5	14,5	18,0	62	34	47
LPO	Cave	20,5	19,0	20,1	56	36	46
	Público	21,0	18,5	20,1	58	34	45
	Não Público	21,0	19,0	20,4	57	34	44

No edifício da Contrastaria do Porto (CPO), as temperaturas máximas variaram entre 17,5 °C (CSI) e 22,5 °C (LMP), enquanto as mínimas oscilaram entre 14,5 °C (CSI) e 18,0 °C (UGF). As médias situaram-se entre 16,3 °C (CSI) e 19,6 °C (UGF). A humidade relativa máxima registada foi de 69 % (CSI) e a mínima de 36 % (UGF), com valores médios entre 48 % (LMP e UGF) e 57 % (CSI).

No Goldpark (GPK), as temperaturas máximas variaram entre 20,5 °C (DSO) e 22,5 °C (MCG e LMG), as mínimas entre 13,0 °C (RSG) e 18,0 °C (CSI), e as médias entre 17,6 °C (RSG) e 20,5 °C (CSI). A humidade relativa apresentou máximos entre 63 % (RSG) e mínimos entre 29 % (MCG e LMG), e médias de 42 % (LMG) a 47 % (RSG e DSO).

Na Livraria do Porto (LPO), as temperaturas máximas oscilaram entre 20,5 °C (Cave) e 21,0 °C (no piso principal), as mínimas foram de cerca de 19 °C, e as médias de aproximadamente 20 °C. A humidade relativa máxima variou entre 56 % (cave) e 58 % (piso principal), a mínima entre 34 % (no piso principal) e 36 % (na cave), a médias entre 46 % (cave) e 44 % (piso principal).

Durante a segunda fase da campanha de monitorização, decorrida entre 29 de maio e 8 de agosto de 2025, foram registados os valores de temperatura do ar (θ , °C) e de humidade relativa (Hr, %) em diferentes compartimentos dos edifícios avaliados: Contrastaria do Porto (CPO), Goldpark (GPK) e Livraria do Porto (LPO), ver Tabela 12.

Tabela 12 - Resumo das variáveis ambientais registradas - 2ª Fase

<i>Edifício</i>	<i>Local</i>	<i>θ (°C)</i>			<i>Hr (%)</i>		
		<i>Max.</i>	<i>Min.</i>	<i>Média</i>	<i>Max.</i>	<i>Min</i>	<i>Média</i>
CPO	RSP	26,0	21,5	24,0	56	36	48
	LMP	26,5	21,0	24,0	60	35	50
	CSI	28,5	21,5	25,0	66	30	52
	UGF	26,0	21,5	23,4	64	40	52
GPK	RSG	28,0	19,5	23,3	61	37	50
	MCG	29,0	20,5	24,1	60	34	47
	LMG	27,5	20,5	23,5	61	37	50
	CSI	25,5	21,0	23,6	62	39	52
	DSO	24,5	16,5	21,6	71	43	56
LPO	Cave	23,5	19,0	22,4	63	40	54
	Público	25,5	22,0	24,1	61	43	52
	Não Público	25,5	22,5	24,1	61	43	52

No edifício da Contrastaria do Porto (CPO), as temperaturas máximas variaram entre 28,5 °C (CSI) e 26,0 °C (RSP), enquanto as mínimas oscilaram entre 21,0 °C (LMP) e 21,5 °C (RSP, CSI e UGF). As médias

situaram-se entre 23,4 °C (UGF) e 25,0 °C (CSI). A humidade relativa máxima registada foi de 66 % (CSI) e a mínima de 30 % (CSI), com valores médios entre 48 % (RSP) e 52 % (CSI e UGF).

No Goldpark (GPK), as temperaturas máximas variaram entre 24,5 °C (DSO) e 29,0 °C (MCG), as mínimas entre 16,5 °C (DSO) e 21,0 °C (CSI), e as médias entre 21,6 °C (DSO) e 24,1 °C (MCG). A humidade relativa apresentou máximos entre 71 % (DSO) e 60 % (MCG), mínimos entre 34 % (MCG) e 43 % (DSO), e médias de 47 % (MCG) a 56 % (DSO). As temperaturas mais elevadas neste edifício foram registadas em dias de fim de semana, período em que o sistema de climatização permaneceu desligado.

Na Livraria do Porto (LPO), as temperaturas máximas oscilaram entre 23,5 °C, na cave e 25,5 °C no piso principal, as mínimas entre 19,0 °C na cave e 22,5 °C no piso principal na zona não acessível ao público, e as médias entre 22,4 °C na cave e 24,1 °C no piso principal. A humidade relativa máxima variou entre 61 % no piso principal e 63 % na cave, as mínimas entre 40 % na cave e 43 % no piso principal, e as médias entre 54 % na cave e 52 % no piso principal.

4 DISCUSSÃO

4.1 Caracterização técnica dos edifícios

A caracterização arquitetônica e construtiva dos edifícios revelou-se fundamental para a interpretação dos resultados obtidos, na medida em que permite relacionar a tipologia estrutural, a idade da construção e as condições de ventilação com os níveis de acumulação de radão. Nos edifícios mais antigos, como a Contrastaria do Porto (década de 1940) e a Livraria do Porto (1906), observou-se a presença de fatores intrínsecos de vulnerabilidade, nomeadamente o uso de fundações e paredes em granito, a existência de compartimentos subterrâneos (no caso da Livraria) e a ventilação naturalmente limitada. Estas características, amplamente documentadas na literatura como potenciadoras da infiltração e retenção de radão (Ferreira et al., 2014; UNSCEAR, 2020), explicam a maior propensão para concentrações elevadas do gás nestas estruturas.

No caso da Contrastaria do Porto, importa ainda destacar diferenças significativas entre compartimentos: enquanto as janelas da sala RSP foram já substituídas, oferecendo maior estanqueidade, as da sala LMP permanecem antigas e apresentam múltiplas fugas de ar. Esta disparidade contribui para variações internas na circulação e retenção do radão, demonstrando a influência direta da integridade dos vãos envidraçados na qualidade do ar interior. Adicionalmente, a presença de sistemas de ventilação específicos (hottes laboratoriais em funcionamento durante o horário laboral) e a comunicação entre compartimentos criam dinâmicas de corrente de ar que condicionam a distribuição do gás.

Por contraste, o edifício mais recente da Delegação da Contrastaria de Gondomar (2016), situado no Goldpark, apresenta uma conceção construtiva moderna, com melhores soluções de impermeabilização e ventilação mecânica controlada (sistema HAVAC), o que contribui para a redução global das concentrações médias de radão. Apesar de possuir um rés-do-chão parcialmente enterrado, condição que pode favorecer a infiltração do gás devido à pressão exercida pelo solo (IAEA, 2014) a existência de barreiras construtivas mais eficazes e de sistemas de climatização permanentes mitiga este risco.

De forma global, este padrão está em consonância com evidência internacional, que associa a ventilação controlada, a estanqueidade do solo e a qualidade dos materiais de construção a menores concentrações médias de radão (Kojo & Kurtio, 2020; Lopes et al., 2021; Voltattorni et al., 2023). Assim, a análise comparativa entre edifícios de tipologia antiga e moderna corrobora a influência direta das opções arquitetónicas e construtivas na mitigação ou agravamento da exposição ao radão em ambiente laboral.

4.2 Monitorização ativa de curto prazo

As medições realizadas com detetores ativos RadonEye+² permitiram identificar compartimentos críticos em cada um dos edifícios avaliados, evidenciando comportamentos distintos, mas consistentes com a literatura internacional.

Na Livraria do Porto, os resultados iniciais confirmaram que a cave apresentava as maiores concentrações de radão, em conformidade com o que está descrito em diversos estudos que apontam os espaços subterrâneos como os mais propensos à acumulação do gás (Dicu et al., 2024; UNSCEAR, 2000). Observou-se ainda uma tendência de acumulação acrescida durante os fins de semana, período em que o edifício permanece encerrado e sem ventilação, o que reforça a importância da ocupação e da renovação de ar como fatores mitigadores.

Na Contrastaria do Porto, verificou-se igualmente uma tendência de acumulação ao longo dos fins de semana, associada ao encerramento do edifício e consequente ausência de ventilação. A análise em contínuo demonstrou ainda uma flutuação clara ao longo do ciclo diário, concentrações mais elevadas durante o período noturno, com redução progressiva ao longo do dia laboral, em resultado da ventilação induzida pela ocupação e pelos sistemas em funcionamento. O compartimento RSP destacou-se como o mais crítico, registando concentrações superiores a 1300 Bq/m³. Não obstante, a variabilidade intrínseca do edifício marcada pela coexistência de zonas com ventilação forçada (hottes laboratoriais), compartimentos com caixilharias antigas e permeáveis, áreas renovadas (ex.: UGF) e espaços com acesso direto ao exterior justificou a decisão de instalar detetores passivos CR-39 em todos os compartimentos, de modo a obter uma caracterização mais abrangente e representativa.

No Posto de Gondomar, situado no Goldpark, também se constatou a acumulação de radão durante os fins de semana, coincidindo com a ausência de ocupação. Destacou-se ainda a relação direta entre o funcionamento do sistema HAVAC e a variação das concentrações, a acumulação iniciava-se após o desligar do sistema, ao final do dia, e diminuía de forma evidente aquando do arranque matinal. Verificou-se também um gradiente espacial, com concentrações mais elevadas nos compartimentos localizados em zonas mais interiores e parcialmente enterradas, o que pode ser explicado pela maior pressão exercida pelo solo (IAEA, 2014). Estes resultados justificaram a seleção da DSO como compartimento de referência para a monitorização subsequente com detetores CR-39.

De forma global, a monitorização de curto prazo confirmou a sua relevância como ferramenta para identificar não apenas os compartimentos mais críticos, mas também os padrões temporais de acumulação (flutuações horárias, diárias e sazonais) e a influência da ventilação natural e mecânica. Tal como é referido na literatura, estes dados são fundamentais para orientar a seleção de pontos de monitorização de longo prazo (Dimitrova et al., 2023).

4.3 Monitorização passiva de longo prazo e quantificação da dose efetiva

- **Edifício da Contrastaria do Porto**

Na RSP, a concentração média de atividade de radão foi 469 Bq/m³, correspondendo a uma dose efetiva anual de 2,9 mSv/ano, este valor de exposição mesmo considerando o pior cenário, e atendendo à incerteza associada não 6 mSv/ano, no máximo os trabalhadores estão expostos a 3,2 mSv/ano. Este foi o único compartimento a exceder o nível de referência de 300 Bq/m³ aplicável a locais de trabalho, situando-se numa faixa associada a incremento material do risco relativo, ou seja, locais onde a atividade de radão é >100 Bq/m³ (Darby et al., 2005; Decreto-Lei n.º 108/2018 de 3 de Dezembro, 2018; EURATOM, 2014).

Na CSI, a concentração foi 162 Bq/m³ (dose efetiva 1,0 mSv/ano), enquadrando-se no intervalo 100 a 300 Bq/m³, para o qual a evidência residencial e ocupacional demonstra contributo mensurável para o risco, ainda que de magnitude moderada (Darby et al., 2005; Krewski et al., 2005).

Na UGF, observou-se 139 Bq/m³ (exposição anual 0,9 mSv/ano), e no LMP um valor muito semelhante (140 Bq/m³, 0,9 mSv/ano), sugerindo comportamento ambiental convergente entre estes dois espaços.

Em síntese, a Contrastaria do Porto apresenta três compartimentos com concentrações na ordem de 140 a 162 Bq/m³ (UGF/LMP/CSI) e um que se destaca na concentração da atividade de radão (RSP com 469 Bq/m³). Esta discrepância evidencia variabilidade espacial, ou seja, os vários compartimentos do edifício aparentam ter propensões diferentes para a acumulação de radão no seu interior. Do ponto de vista de exposição, é na RSP que se concentra o maior contributo para o risco dentro do edifício, enquanto UGF/LMP/CSI permanecem na faixa em que a relação dose é estatisticamente compatível com aumento de risco, mas de magnitude substancialmente inferior (Darby et al., 2005; Krewski et al., 2005).

Os trabalhadores da Contrastaria do Porto face à concentração de radão no edifício (469 Bq/m³) e à exposição a que estão sujeitos (2,9 mSv/ano), consideram-se trabalhadores expostos, sendo que a sua exposição é ser mantida sob observação uma vez que não ultrapassa os 6 mSv/ano (APA, 2022a; Decreto-Lei n.º 108/2018 de 3 de Dezembro, 2018; Resolução do Conselho de Ministros 150-A, 2022).

- **Livraria do Porto**

Na cave da LPO foi registada uma concentração da atividade de radão de 153 Bq/m³, equivalente a 1,0 mSv/ano. A concentração de atividade de radão situa-se no intervalo 100 a 300 Bq/m³. Embora o valor verificado seja inferior à referência nacional, o risco encontra-se presente, uma vez que, por cada incremento de 100 Bq/m³ aumenta o risco associado. (Darby et al., 2005).

Os trabalhadores da Livraria do Porto face à concentração de radão no edifício (153 Bq/m³) e à exposição a que estão sujeitos (1,0 mSv/ano), consideram-se trabalhadores não expostos (APA, 2022a; Decreto-Lei n.º 108/2018 de 3 de Dezembro, 2018; Resolução do Conselho de Ministros 150-A, 2022).

- **Goldpark (local: DSO)**

Na DSO foi registada uma concentração de atividade de radão de 54,4 Bq/m³, o que corresponde a uma dose efetiva de 0,3 mSv/ano. Em termos de risco, este nível situa-se em níveis baixos em virtude da atividade de radão registada ser inferior a 100 Bq/m³ logo com contributo reduzido para o risco absoluto (Harrison & Marsh, 2019; WHO, 2009).

Os trabalhadores do Goldpark face à concentração de radão no edifício (54,4 Bq/m³) e à exposição a que estão sujeitos (0,3 mSv/ano), consideram-se trabalhadores não expostos (APA, 2022a; Decreto-Lei n.º 108/2018 de 3 de Dezembro, 2018; Resolução do Conselho de Ministros 150-A, 2022).

4.4 Validação cruzada dos resultados: Radoneye+² versus CR-39

Pela análise dos resultados obtidos com o RadonEye+² e com os CR-39, ver Tabela 13, verifica-se a existência de uma forte concordância entre ambos os métodos de monitorização de radão, ainda que com diferenças naturais no modo de funcionamento e nas incertezas associadas.

Observa-se que os valores de concentração medidos com o Radoneye+² (2.^a fase) se mantêm próximos dos obtidos com os detetores CR-39, não apresentando discrepâncias significativas. Esta proximidade é particularmente evidente quando se analisam as incertezas. Enquanto o CR-39 apresenta incertezas absolutas específicas para cada medição (variando entre 7 e 49 Bq/m³, conforme os locais), o Radoneye+² apresenta uma incerteza relativa de aproximadamente $\pm 10\%$. Como demonstrado no gráfico comparativo, estas incertezas são sobreponíveis, pelo que os intervalos de confiança de ambos os métodos coincidem, reforçando a robustez dos resultados (Figura 72).

Este comportamento é relevante porque confirma que os Radoneye+² podem ser utilizados como complemento dos CR-39. Sendo que os primeiros oferecem resultados quase imediatos, úteis para ajustar estratégias de ventilação e afinar sistemas de mitigação, enquanto os segundos fornecem medições integradas de longo prazo, com elevada fiabilidade. Assim, os Radoneye+² desempenham um papel operacional de elevada utilidade, permitindo intervenções rápidas, mas mantendo-se validados pela consistência com os resultados dos CR-39.

Tabela 13 - Comparação da variação das incertezas, Radoneye+² versus CR-39.

<i>Edifício</i>	<i>Local</i>	<i>Radoneye+² (2.^a Fase)</i>		<i>CR-39</i>	
		<i>Atividade (Bq/m³)</i>	<i>E</i>	<i>Atividade (Bq/m³)</i>	<i>E</i>
CPO	<i>RSP</i>	421	$\pm 10\%$	469	49
	<i>LMP</i>	137		140	16
	<i>CSI</i>	149		162	16
	<i>UGF</i>	141		139	18
GPK	<i>DSO</i>	43		54,4	7
LPO	<i>Cave</i>	158		153	17

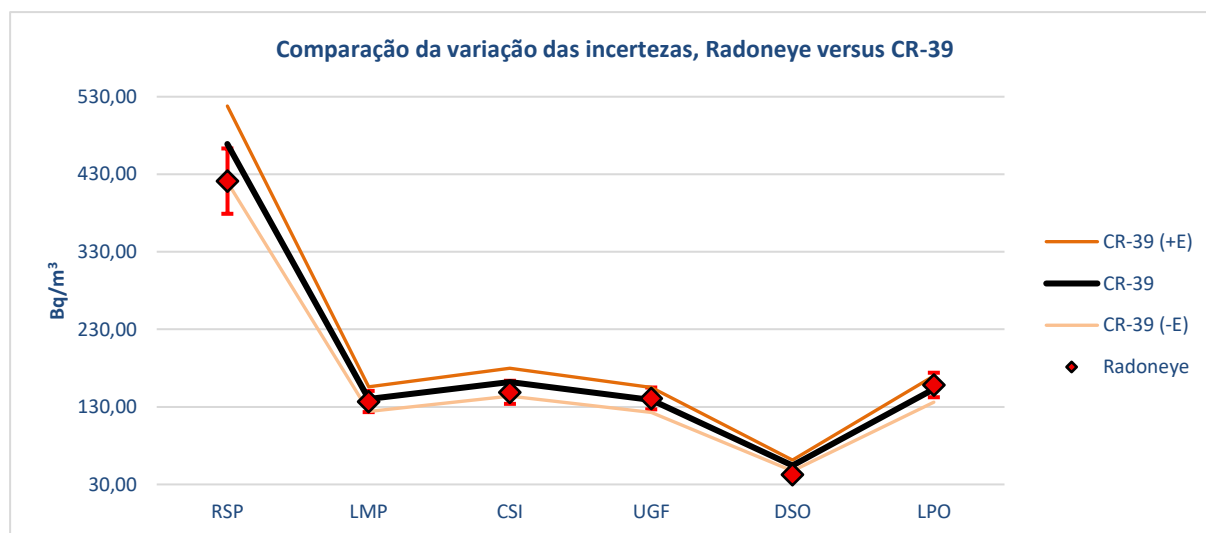


Figura 72 - Comparação da variação das incertezas, Radoneye+² versus CR-39.

4.5 Estratégias de mitigação

Na Contrastaria do Porto verificou-se que a RSP registou valores de concentração de atividade de radão de 469 Bq/m³, excedendo o valor de referência de 300 Bq/m³.

Na implementação de uma estratégia de mitigação devemos estabelecer como objetivo principal a redução de forma robusta e sustentada da atividade de radão para valores <300 Bq/m³, em simultâneo deve ser estabelecida a meta operacional de valores de atividade ≈ 100 Bq/m³ se for exequível.

Para a definição das medidas a adotar deve ser efetuado um diagnóstico dirigido; este diagnóstico visa traçar vias de entrada, juntas das lajes e paredes, atravessamentos, caixas técnicas, cavidades e câmaras de ar nas paredes, medição das pressões diferenciais e os padrões de ventilação do edifício.

Através da análise dos dados recolhidos pelos detetores ativos, como exemplo na (Figura 73) encontra-se representada a variação horária da atividade de radão entre os dias 2 e 10 junho de 2025, verificou-se que a maior acumulação de radão ocorre essencialmente durante o período noturno com tendência a baixar durante o horário em que o edifício se encontra em utilização. Verifica-se ainda que entre o dia 7 e o dia 8 de junho, fim de semana, e no dia 10, feriado nacional, dias em que o edifício não teve ocupação, os níveis de radão subiram durante a noite e mantiveram-se elevados mesmo durante o dia. Este comportamento revela a importância da ventilação na diminuição dos níveis de radão, ventilação esta que não ocorre quando o edifício não está ocupado.

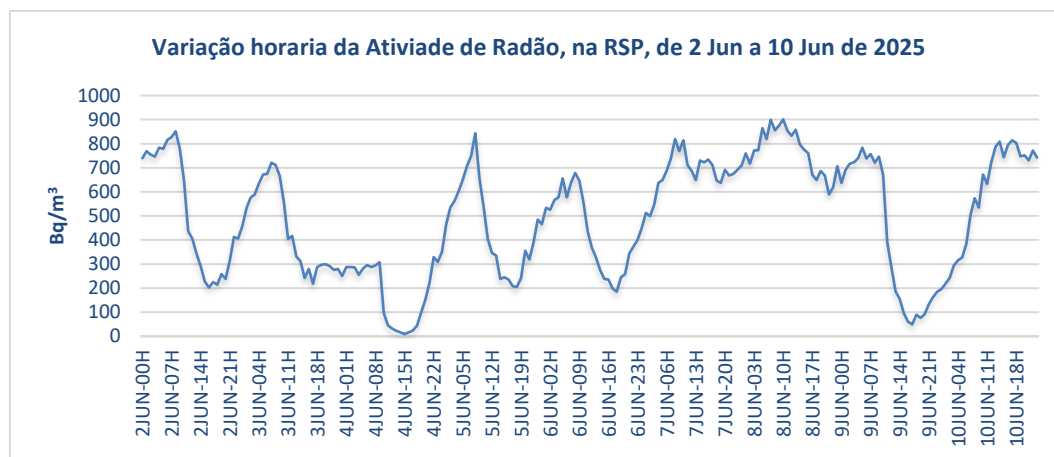


Figura 73 - Variação horária da atividade de radão entre os dias 2 e 10 junho de 2025.

Na (Figura 74), que representa a variação da atividade de radão entre os dias 4 e 11 de dezembro de 2024, podemos verificar um comportamento semelhante na variação de níveis de radão durante o inverno.

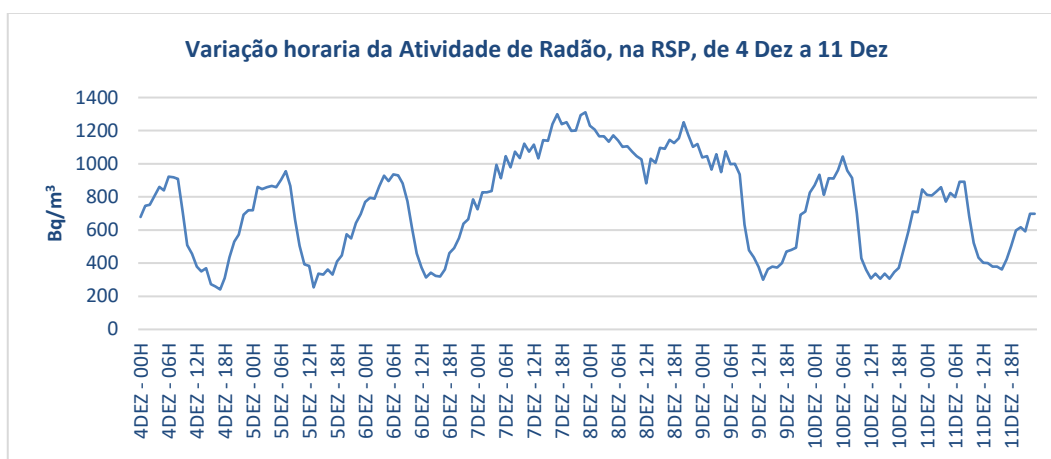


Figura 74 - Variação horária da atividade de radão entre os dias 4 e 11 dezembro de 2024.

Na (Figura 75), podemos ver um comportamento típico da variação de radão ao longo do dia bem como ao longo do ano. No entanto, ao verificar o comportamento da variação de radão ao longo do dia para o LMP, verifica-se que ocorre um aumento dos níveis de radão no período diurno, contrariando o comportamento típico espetável (Figura 76) e (Figura 77).

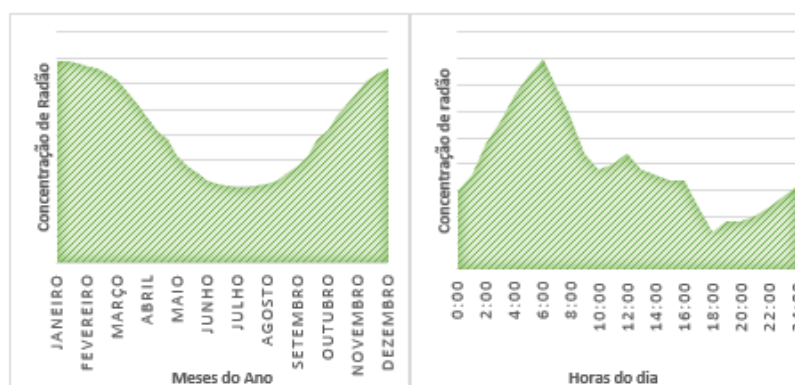


Figura 75 - Exemplo de variações sazonais da atividade de radão.

Nota: Adaptado de APA, 2025

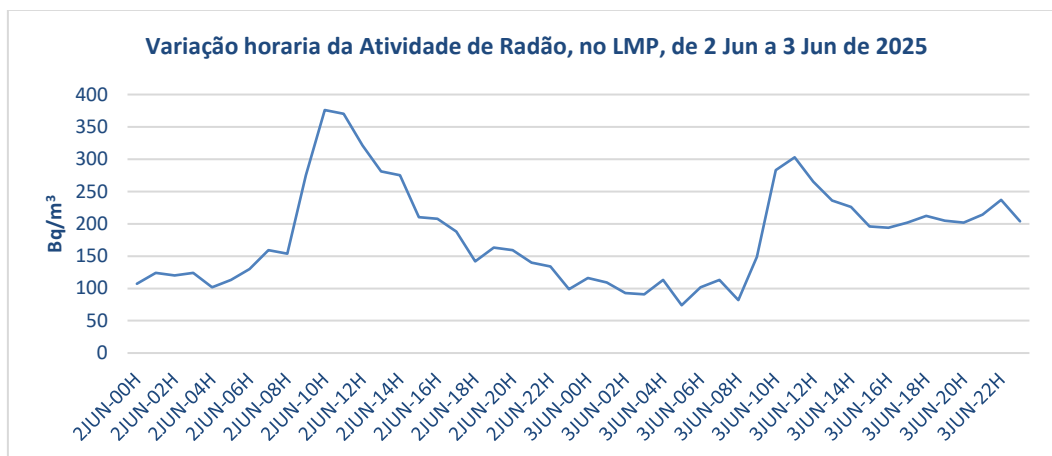


Figura 76 - Variação horária da Atividade de Radão, no LMP, de 2 a 3 junho de 2025.

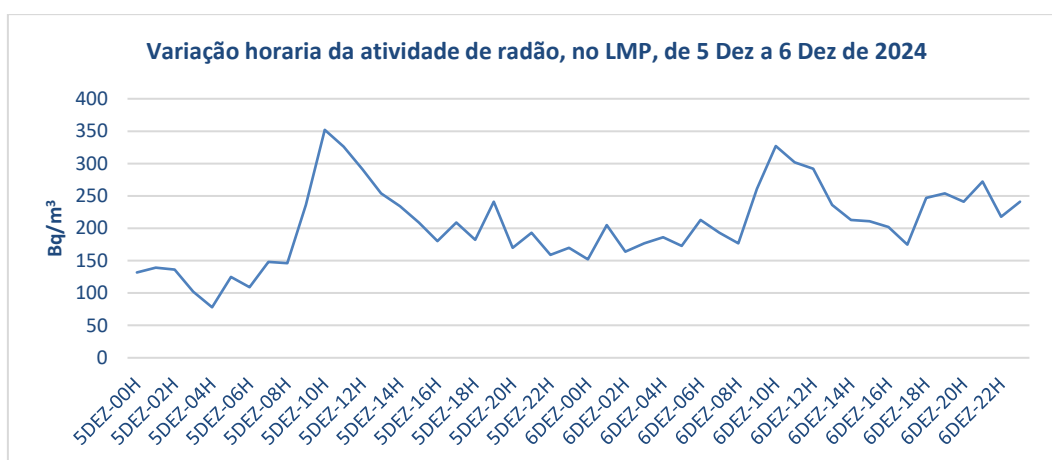


Figura 77 - Variação horária da atividade de radão, no LMP, de 5 a 6 de dezembro de 2024.

Quando analisamos a variação dos níveis de radão ao longo do dia na UGF, verificamos o mesmo comportamento, atípico, que se verificou no LMP (Figura 78) e (Figura 79).

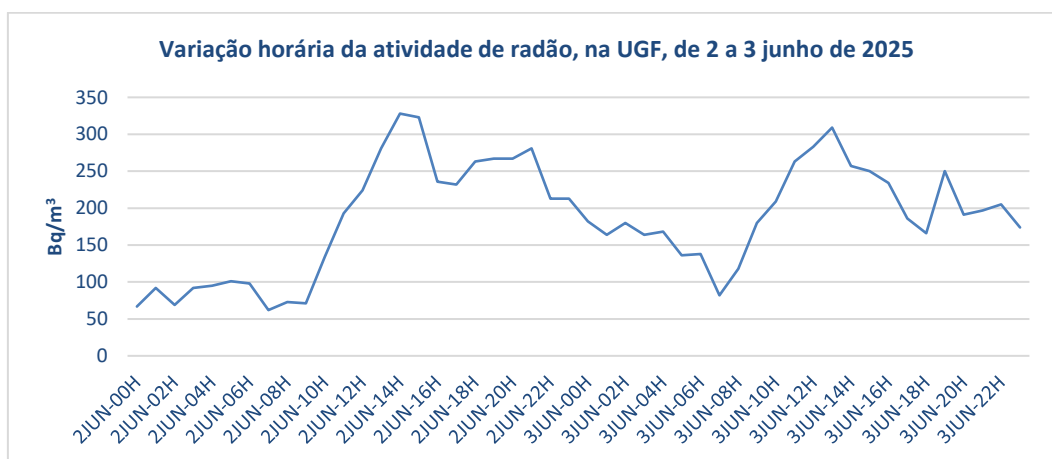


Figura 78 - Variação horária da atividade de radão, na UGF, de 2 a 3 junho de 2025

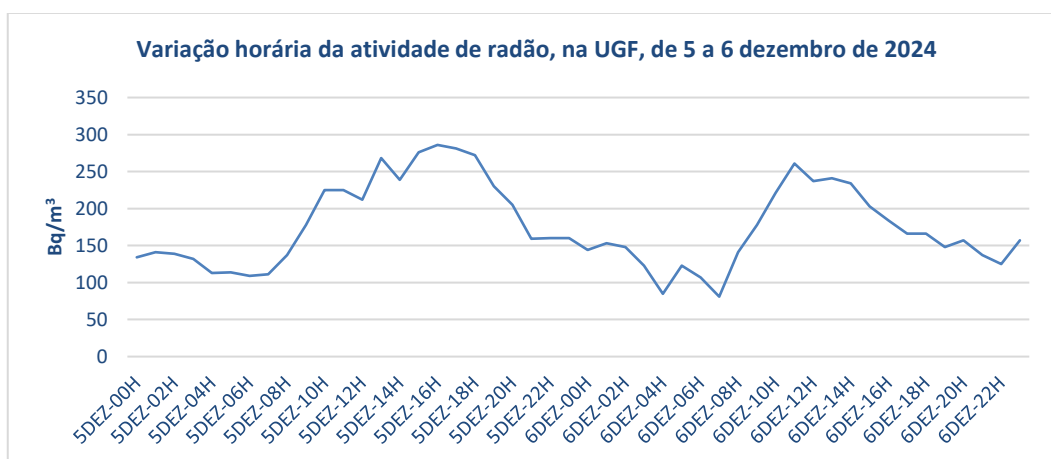


Figura 79 - Variação horária da atividade de radão, na UGF, de 5 a 6 dezembro de 2024.

É sabido que os valores de radão tendem a variar ao longo do dia, e também, ao longo do ano, sendo que no inverno e durante a noite são registadas as maiores concentrações de radão (Resolução do Conselho de Ministros 150-A, 2022; WHO, 2009). Na contrastaria do Porto, verificou-se um aumento ao longo do dia em dois compartimentos o que aparentemente contraria o comportamento típico da acumulação de radão (Figura 80). O LMP e na UGF registam o maior aumento de radão após as 8H até próximo das 12H. Na RSP verifica-se que após a 8H a concentração de radão começa a diminuir até próximo das 18H, hora onde se volta a verificar um aumento nos níveis de radão.

Analisando as características do edifício, verificamos que os compartimentos se encontram dispostos ao longo do edifício, RSP na zona mais frontal, o LMP e a UGF em paralelo numa zona mais interior, embora o LMP com comunicação direta com a RSP, e a UGF comunicando com a RSP através de uma antecâmara, mas com comunicação direta com o LMP. O LMP está equipado numa zona mais interior de um sistema de extração de gases de grande volume, Hottes, este sistema provoca uma “corrente” de ar ao longo do edifício. Este efeito, associado ao facto dos compartimentos serem comunicantes entre si, sugere que o radão acumulado na RSP esteja a ser retirado por este sistema. Este sistema de exaustão encontra-se ligado durante o período laboral entre as 9H e as 18H. Assim consegue-se explicar a rápida diminuição dos níveis de radão presentes na RSP, bem como a “contaminação” do LMP e da UGF provocando a inversão do comportamento típico. A (Figura 80) representa a variação de radão ao longo do dia, nos três compartimentos, RSP, LMP e UGF, onde se pode visualizar claramente o comportamento “atípico”.

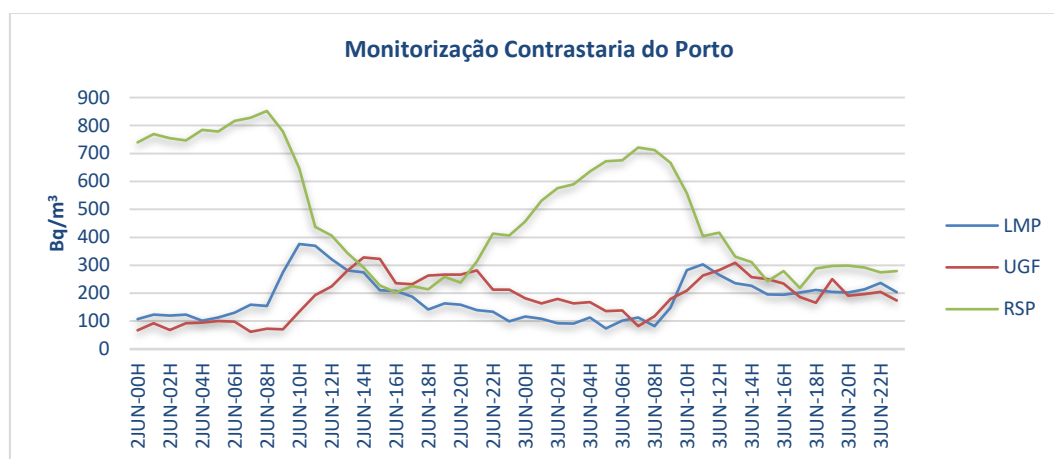


Figura 80 - Variação comparativa dos níveis de radão ao longo do dia, LMP, RSP e UGF.

Na contrastaria do Porto, deve ser avaliada a praticabilidade da implementação de técnicas e mitigação, destacando-se para este caso a vedação com selantes e a melhoria da ventilação, que se encontra adequada para valores de radão de até 400 Bq/m³ (Luís Eduardo Pimentel Real & Jorge M. Grandão Lopes, 2020). Implementação de sistemas de pressurização positiva e ventilação natural por baixo do pavimento, tem eficácias semelhantes embora onerosos e tem-se revelado eficazes para contrações de radão de até 700 Bq/m³ (Luís Eduardo Pimentel Real & Jorge M. Grandão Lopes, 2020). Ventilação mecânica por baixo do pavimento por aspiração, embora onerosa é adequada para níveis de radão de 850 Bq/m³ (Luís Eduardo Pimentel Real & Jorge M. Grandão Lopes, 2020). E sistemas de despressurização do terreno, embora o mais oneroso tem níveis de eficácia comprovados até 2000 Bq/m³ (Luís Eduardo Pimentel Real & Jorge M. Grandão Lopes, 2020).

Na fase de remediação que deve ser implementada em edifícios que ultrapassem os 300 Bq/m³, deve ser tida em conta o Guia da APA Gestão da exposição ao radão nos locais de trabalho Guia para empregadores, onde se encontram elencadas as medias corretivas de remediação consideradas, são elas: Melhoria da ventilação natural por baixo do pavimento térreo junto ao terreno; Melhoria da ventilação mecânica por baixo do pavimento térreo junto ao terreno; Pressurização positiva no interior do edifício; Despressurização do terreno sob o pavimento térreo; Membranas ou filmes contra o radão sobre pavimentos; Membranas ou filmes contra o radão em paredes (APA, 2022a).

Na Tabela 14, podemos consultar as diversas técnicas de mitigação para a redução de radão bem como as taxas típicas de redução conseguidas para cada técnica.

Tabela 14 - Técnicas de mitigação para redução da concentração de radão nos edifícios

Técnica	Taxa típica de redução de radão	Comentários
Aspiração/despressurização ativa sob a laje térrea	50 a 99%	Funciona melhor se o ar puder fluir facilmente nos materiais sob a laje.
Aspiração passiva sob a laje térrea	30 a 70	Pode ser mais eficaz em climas frios; não é tão eficaz como a depressurização ativa sob a laje.
Aspiração através de conduta perfurada (drenos sob a laje térrea)	50 a 99	Pode funcionar em sistemas de drenagem de águas pluviais.
Despressurização em paredes com tijolos ou blocos perfurados	50 a 99	Somente em edifícios com estes elementos nas paredes; requer vedação às maiores aberturas.
Despressurização através de câmara de infiltração de água construído sob a laje térrea	50 a 99	Funciona melhor se o ar fluir facilmente para a câmara.
Despressurização sob membrana barreira contra o radão em desvão sanitário	50 a 99	Em climas frios origina menos perda de calor do que a ventilação natural.
Ventilação natural em desvão sanitário	0 a 50	Realça-se para esta técnica a grande variabilidade dos custos para a implementação.
Selagem das aberturas, fendas e fissuras de entrada do radão	Ver comentários	Normalmente usado apenas em conjunto com outras técnicas; exige materiais e instalações adequados.
Pressurização da habitação ou da cave	50 a 99%	Funciona melhor em caves de pequena dimensão, isoladas do exterior e dos pisos superiores. Existe o risco de escoamento de poluentes para os pisos superiores.
Ventilação natural	Variável/temporária	Perda significativa do ar aquecido ou arrefecido, se não houver isolamento térmico adequado; os custos operacionais dependem das taxas de utilização e do caudal de ventilação.
Ventilador com recuperador de calor (VRC)	Variável (ver comentários)	Uso limitado; eficácia dependente da concentração de radão existente ou da quantidade de ar para ventilação disponível para diluição através da técnica VRC. Mais bem aplicado em áreas de espaço limitado, como embasamentos.

Nota: adaptado de LNEC, 2020.

Sendo equipamentos de baixo custo, os detetores ativos permitem uma monitorização acessível e contínua. Para além de possibilitarem a avaliação da eficácia das medidas de mitigação implementadas, o facto de produzirem resultados imediatos torna-os particularmente úteis para ajustar e otimizar o funcionamento dos sistemas de ventilação, garantindo um controlo mais eficaz da qualidade do ar interior.

Livraria do Porto, o valor de atividade de radão foi de 153 Bq/m³ embora esteja abaixo do valor de referência ainda se encontra num nível de risco acrescido para os ocupantes (WHO, 2009).

O objetivo é o da redução dos níveis de radão para valores inferiores a 100 Bq/m³, melhorias ou ajustes nos caudais da ventilação do espaço, associados à selagem de juntas e atravessamentos podem revelar-se suficientes (Luís Eduardo Pimentel Real & Jorge M. Grandão Lopes, 2020).

A implementação de medidas de mitigação deve ser acompanhada de nova monitorização, caso contrário uma vez que os valores de radão são $<250\text{Bq/m}^3$, a nova monitorização deve ocorrer até agosto de 2030, de cinco em cinco anos, de acordo com o PNRn (Resolução do Conselho de Ministros 150-A, 2022).

No Goldpark verificou-se uma grande variabilidade nos níveis de radão ao longo dos vários compartimentos do edifício (Tabela 6), uma vez que o edifício vai ser alvo de obras recomenda-se a avaliação da possibilidade de implementação de medidas de mitigação como barreiras anti radão e selagem de fissuras e atravessamentos e após a conclusão das obras deve ser efetuada nova monitorização.

4.6 Plano de monitorização periódica e comunicação de risco

De acordo com o PNRn é espetável que ocorram variações sazonais nos níveis de radão de até 20%, ou seja, os níveis de radão podem ser até 20% superiores durante o inverno. Atendendo aos resultados obtidos na avaliação inicial (Tabela 5), bem como os resultados da avaliação de longa duração (Tabela 6), verificamos que na Contrastaria do Porto passamos de uma concentração de radão média de 733Bq/m^3 no período invernal para uma concentração média de 421Bq/m^3 no período estival, significa uma diferença de cerca de 42% entre estações do ano. Deste modo recomenda-se que, após a implementação de medidas de mitigação e verificação da sua eficácia, caso os valores de radão permaneçam com níveis superiores a 250Bq/m^3 , em virtude da sazonalidade dos níveis de radão e atendendo a que o edifício se encontra numa zona de índice de suscetibilidade elevada, que a medição de radão por CR-39 seja repetida com um período de amostragem de 12 meses ou que aos resultados sejam incorporados fatores de correção à sazonalidade. (Heloísa Fonseca, 2025)

Nos casos em que os níveis de radão sejam $>250\text{Bq/m}^3$ a monitorização tem de ocorrer a cada 12 meses (Resolução do Conselho de Ministros 150-A, 2022). e nos casos em que após a implementação de medidas de mitigação os valores de atividade média de radão permaneçam superiores a 300Bq/m^3 , é necessário efetuar a comunicação de valores dose resultantes da exposição ao radão à APA (APA, 2022b).

Na livraria do Porto uma vez que a concentração de radão foi $<250\text{Bq/m}^3$ a monitorização tem de ocorrer a cada 5 anos, (Resolução do Conselho de Ministros 150-A, 2022). Recomenda-se vigilância periódica com detetores ativos para confirmar a manutenção de níveis reduzidos de radão, atendendo ao perfil de risco do edifício, implantação em zona de suscetibilidade elevada, antiguidade e existência de cave.

No Goldpark os valores da monitorização foram de $54,4\text{Bq/m}^3$, bastante inferiores ao valor de referência nacional, deste modo e como este valor é $<250\text{Bq/m}^3$ a nova monitorização deve ocorrer de cinco em cinco anos, de acordo com o PNRn (Resolução do Conselho de Ministros 150-A, 2022).

No entanto, verificou-se uma grande variabilidade nos níveis de radão ao longo dos vários compartimentos do edifício, sendo que consistentemente sempre que o sistema HAVAC desliga, os níveis de radão aumentam. Recomenda-se que sejam implementados detetores ativos para a monitorização contínua dos níveis de radão especialmente em virtude do risco acrescido do edifício. Uma vez que o edifício vai ser alvo de obras, recomenda-se a avaliação da implementação de medidas de mitigação como barreiras anti-

radão e selagem de fissuras e atravessamentos e após a conclusão das obras deve ser efetuada nova monitorização.

A continuidade da monitorização é essencial para garantir o controlo do risco a longo prazo. O Plano Nacional para o Radão (Resolução do Conselho de Ministros 150-A, 2022), destaca a necessidade de integração de sistemas de vigilância periódica, especialmente em edifícios ocupacionais situados em zonas de risco geológico elevado. Recomenda-se a repetição das medições em intervalos regulares, com especial atenção a compartimentos críticos e à correlação com variáveis ambientais (Vienneau et al., 2021). Paralelamente, a gestão da exposição ao radão nos locais de trabalho implica também a comunicação clara dos riscos aos trabalhadores e empregadores (Resolução do Conselho de Ministros 150-A, 2022), seguindo os princípios de transparência e envolvimento (IAEA, 2014; ICRP, 2014).

4.7 Limitações e vieses

A interpretação dos resultados está condicionada por fontes de viés temporal e operacional. Em primeiro lugar, a sazonalidade da concentração de radão é bem documentada, os níveis tendem a ser mais elevados nas estações frias e mais baixos nas estações quentes, refletindo diferenças de ventilação e gradientes de pressão entre o interior e o exterior. Dado que a colocação dos CR-39 ocorreu em período estival, é plausível que as médias obtidas estejam subestimadas face à média anual verdadeira. Estudos comparativos com campanhas de 3 a 6 meses mostram valores mais altos nos meses mais frios e mais baixos nos meses mais quentes, com diferenças estatisticamente significativas, em Portugal essas diferenças podem em média chegar aos 20%. Por isso, medições de maior duração reduzem a incerteza associada a estas correções.

Em segundo lugar, os valores de exposição foram calculados a partir da concentração média de radão, não tendo sido possível determinar a concentração equivalente de produtos de decaimento (EEDC). Este facto implica assumir um fator de equilíbrio típico (frequentemente $F \approx 0,4$ em interiores), sendo sabido que desvios locais do F (por ventilação, deposição de aerossóis, padrões de ocupação) podem enviesar a estimativa de dose.

Em terceiro lugar, na Contrastaria do Porto os padrões de ventilação foram inferidos indiretamente a partir de relatos dos trabalhadores (p. ex., impacto de portas abertas nas balanças da RSP), complementados pelos perfis horários obtidos com detetores ativos. Embora seja coerente com a literatura que alterações na ventilação, intermitência de sistemas HVAC e diferenças de pressão condicionem a dispersão do radão (com acumulação noturna e redução em ocupação diurna), a ausência de um registo instrumental contínuo de caudais e pressões nos diversos compartimentos deixa margem para ocorra um efeito de espúrio podendo haver outros fatores concorrentes (efeito chaminé, infiltrações, exaustões localizadas) que possam explicar parte do comportamento “atípico” observado nalguns compartimentos. Assim, a atribuição causal dos padrões exclusivamente à ventilação deve ser lida com prudência metodológica.

Em quarto lugar, a comparabilidade espacial entre momentos de avaliação na DSO fica limitada, uma vez que a localização da sala mudou entre a campanha preliminar e a de longa duração. Optou-se, deliberadamente, por manter a monitorização na nova DSO, por se tratar de um ponto mais interior no edifício e, portanto, potencialmente mais influenciado pela pressão do solo, alinhado com a orientação de

priorizar pisos térreos e inferiores e zonas interiores. Ainda assim, a mudança de localização introduz uma não equivalência entre séries.

Os coeficientes de dose constituem também uma limitação relevante do presente estudo, uma vez que a avaliação da dose efetiva associada à exposição ao radão e aos seus descendentes depende fortemente dos valores adotados. Estes coeficientes expressam a relação entre a exposição física e a dose efetiva correspondente (mSv), traduzindo, assim, o impacto biológico da radiação absorvida.

Historicamente, as estimativas de dose basearam-se na Publicação 65 da ICRP (ICRP 65, 1993), que recomendava um coeficiente de conversão de 5 mSv/WLM para trabalhadores expostos ao radão. Este valor foi determinado com base em dados epidemiológicos provenientes de populações de mineiros de urânio, refletindo uma abordagem essencialmente empírica, centrada na correlação entre a exposição cumulativa ao radão e a incidência de cancro do pulmão (ICRP, 1993). Embora esta publicação tenha constituído uma referência internacional sólida durante mais de duas décadas, o modelo subjacente apresentava limitações significativas, nomeadamente por não considerar de forma detalhada os mecanismos de deposição, transporte e retenção dos descendentes do radão no trato respiratório, nem as variações anatómicas e fisiológicas entre indivíduos.

O ICRP 137 (ICRP, 2017) veio introduzir uma revisão substancial da metodologia de cálculo dos coeficientes de dose, apoiada em modelos biocinéticos e dosimétricos atualizados, bem como numa caracterização mais precisa do comportamento dos radionuclídeos descendentes do radão (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po). Estes novos modelos consideram, de forma mais rigorosa, os mecanismos de deposição nas diferentes regiões do trato respiratório, bem como as taxas de absorção, retenção e excreção.

Com base nestes avanços metodológicos e fisiológicos, o ICRP 137 propõe novos coeficientes de dose efetiva obtidos por via dosimétrica direta, estimando valores médios de cerca de 10 mSv/WLM para ambientes mineiros e locais interiores com baixa atividade física, e 20 mSv/WLM para locais onde predomina o trabalho físico intenso. Estes valores representam um aumento de aproximadamente duas a quatro vezes face ao coeficiente recomendado pela ICRP 65, refletindo um conhecimento mais aprofundado dos processos de deposição e retenção das partículas radioativas e, consequentemente, uma avaliação mais realista do risco biológico (ICRP, 2017).

A adoção dos novos coeficientes propostos pelo ICRP 137 teria, portanto, um impacto direto na quantificação das doses efetivas associadas à exposição ao radão, resultando em valores superiores para as mesmas concentrações e implicando, potencialmente, a reavaliação dos níveis de referência e das estratégias de mitigação existentes. Não obstante, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) mantém atualmente como referência os coeficientes da ICRP 65, que foram igualmente utilizados neste estudo, garantindo assim a conformidade com o enquadramento regulamentar vigente em Portugal.

5 CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

5.1 Conclusões

A presente dissertação teve como propósito central a caracterização da exposição ocupacional ao radão em três edifícios da Imprensa Nacional Casa da Moeda (INCM), situados na Área Metropolitana do Porto, região classificada como de suscetibilidade elevada. O trabalho permitiu avaliar de forma rigorosa o risco associado à presença deste gás radioativo em diferentes contextos construtivos e funcionais, contribuindo para uma melhor compreensão do impacto que o radão pode ter na saúde dos trabalhadores e para a definição de estratégias de mitigação adequadas. Para tal, foi adotada uma abordagem metodológica que integrou medições ativas de curto prazo e medições passivas de longo prazo, garantindo simultaneamente a robustez estatística, a representatividade temporal e a comparabilidade com o enquadramento legal vigente.

Os resultados obtidos evidenciam de forma inequívoca a relevância do radão enquanto risco ocupacional e de saúde pública, corroborando as conclusões de trabalhos de (Darby et al., 2005; Harrison & Marsh, 2020; Krewski et al., 2005; WHO, 2009). No caso do edifício Goldpark e da Livraria, verificou-se que os valores médios de concentração de radão se situaram abaixo do nível de referência nacional fixado em 300 Bq/m³, não se justificando a adoção de medidas corretivas imediatas, ainda que se recomende a continuidade da monitorização periódica, em conformidade com o Decreto-Lei n.º 108/2018 e com o Plano Nacional para o Radão.

Por outro lado, no edifício da Contrastaria do Porto, os resultados evidenciaram concentrações de radão superiores ao nível de referência nacional, salientando a influência determinante dos fatores construtivos e das condições de ventilação no agravamento do risco de exposição.

Perante situações em que se verificam valores acima do nível de referência de 300 Bq/m³, a prioridade deve centrar-se na adoção imediata de medidas de remediação, de modo a reduzir a concentração de radão tanto quanto possível. Esta abordagem preventiva decorre do princípio de que não existe um limiar seguro de exposição abaixo do qual o radão deixe de representar risco para a saúde humana, impondo-se, por isso, uma gestão proativa e contínua do risco radiológico.

Numa primeira fase, a ênfase não deve ser colocada na estimativa da dose efetiva, mas sim na implementação célere de ações corretivas tais como o reforço da ventilação natural ou mecânica, a vedação de fissuras no pavimento ou nas fundações e a melhoria da estanquidade das ligações ao solo. Após a execução dessas medidas, deve ser realizada nova monitorização nos mesmos pontos de amostragem onde se registaram concentrações elevadas, de modo a avaliar a eficácia das intervenções.

Se, apesar das ações de remediação, os valores se mantiverem acima de 300 Bq/m³, a instituição deve notificar a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), conforme previsto no artigo 21.º do Decreto-Lei n.º 108/2018, iniciando-se então a avaliação da exposição dos trabalhadores através do cálculo da dose efetiva anual.

No caso concreto do edifício da Contrastaria, o cálculo da dose efetiva resultante foi de 2,9 mSv/ano, valor inferior ao limiar de 6 mSv/ano definido pela APA como referência para efeitos de gestão da exposição

ocupacional. Nesta situação, e de acordo com o Guia para Empregadores da Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2022a), a exposição deve ser considerada aceitável desde que mantida sob observação contínua, sendo obrigatória a revisão periódica dos resultados, a implementação de medidas de mitigação permanentes e a sensibilização dos trabalhadores para a natureza e persistência do risco.

Apenas nos casos em que exista risco de ultrapassar a dose anual de 6 mSv, aplicam-se os requisitos formais de gestão da exposição ocupacional, incluindo a avaliação individual das doses, a classificação de áreas controladas e a implementação de um programa de monitorização pessoal.

Esta abordagem integrada assegura que, mesmo perante concentrações de radão acima do nível de referência, a gestão do risco privilegia a intervenção preventiva e a redução das concentrações na origem, em consonância com os princípios da otimização e da precaução que regem a proteção radiológica.

Em síntese, as conclusões deste estudo confirmam a pertinência da investigação realizada e a sua coerência com os objetivos definidos, assegurando a confiança nos resultados alcançados. A metodologia aplicada mostrou-se adequada à realidade em análise e os dados obtidos enquadram-se de forma consistente na literatura científica existente, fornecendo um contributo relevante para a gestão integrada do risco associado ao radão em locais de trabalho. Estes resultados permitem ainda reforçar a importância de manter programas de monitorização regulares, de promover a comunicação eficaz do risco e de alinhar a prática institucional com as recomendações nacionais e internacionais, garantindo assim a proteção da saúde dos trabalhadores e o cumprimento das obrigações legais aplicáveis.

5.2 Perspetivas Futuras

No contexto da presente investigação, várias linhas de desenvolvimento futuro podem ser identificadas. Em primeiro lugar, destaca-se a necessidade de alargar a monitorização do radão a outros edifícios da INCM, com diferentes tipologias construtivas e funcionais. Este alargamento permitiria consolidar uma base de dados mais abrangente e representativa, reforçando a capacidade da instituição de gerir riscos ocupacionais de forma integrada e sustentada. Associada a este ponto, a inclusão de variáveis ambientais complementares, como pressão diferencial, caudais de ventilação e deposição de aerossóis, permitiria reduzir a incerteza na análise dos resultados e compreender de forma mais precisa a dinâmica do radão em ambientes interiores.

Outra vertente essencial prende-se com a realização de estudos longitudinais e sazonais. A variabilidade temporal da concentração de radão, influenciada por fatores meteorológicos e padrões de utilização dos edifícios, justifica a realização de campanhas de monitorização mais prolongadas. Estas permitiriam validar correções temporais e minimizar potenciais enviesamentos associados a medições realizadas em períodos limitados, assegurando assim maior fiabilidade nos diagnósticos de risco. Assim, um estudo com a duração de 12 meses, mas fracionado em duas partes, uma direcionada aos meses inverniais e outra aos meses estivais, permitiria obter um conjunto de informação relevante sobre o comportamento de disseminação do radão nos edifícios nas diferentes épocas do ano.

Do ponto de vista aplicado, importa salientar a relevância de desenvolver e avaliar medidas de mitigação, nomeadamente através da instalação de barreiras anti-radão, da selagem de fissuras ou da utilização de sistemas de ventilação mecânica adaptados à realidade de cada edifício. A realização de ensaios pós-intervenção seria fundamental para aferir a eficácia destas medidas e fornecer dados de referência para futuras intervenções, permitindo à INCM posicionar-se como exemplo de boas práticas no contexto nacional (WHO, 2009).

Uma outra dimensão de elevada importância prende-se com a comunicação de risco. A experiência demonstrou que o sucesso das medidas de monitorização e mitigação depende não apenas da robustez técnica, mas também da sensibilização e do envolvimento ativo dos trabalhadores. Assim, é crucial investir no desenvolvimento de estratégias de comunicação claras, acessíveis e fundamentadas, alinhadas com as recomendações de organismos internacionais como a Agência Internacional de Energia Atómica, Comissão Internacional de Proteção Radiológica e a Organização Mundial da Saúde (IAEA, 2014; ICRP, 2014; WHO, 2009). Estas estratégias devem promover a literacia em saúde ambiental e estimular uma cultura organizacional preventiva e participativa.

Finalmente, as perspetivas futuras incluem a exploração de ferramentas digitais e de inteligência artificial para a análise preditiva e a gestão integrada da qualidade do ar interior. A aplicação de modelos de aprendizagem computacional (*machine learning*), capazes de identificar padrões complexos e prever cenários de risco, possibilita o acionamento de mecanismos com vista à manutenção dos níveis de radão e poderá constituir um avanço significativo na prevenção e controlo da exposição ao radão. Esta vertente abre espaço para a criação de projetos de impacto global, que articulem inovação tecnológica, saúde ocupacional e sustentabilidade ambiental (Valcarce et al., 2022)

Em síntese, as perspetivas futuras aqui delineadas demonstram que este trabalho constitui não apenas um diagnóstico rigoroso da situação atual, mas também um ponto de partida para investigações e intervenções de maior alcance. A continuidade desta linha de investigação permitirá reforçar a proteção da saúde ocupacional, assegurar o cumprimento da legislação vigente e contribuir para o avanço do conhecimento científico e tecnológico no domínio da qualidade do ar interior e da segurança radiológica.

6 BIBLIOGRAFIA

- Akkaş, A., Mor, H. B., Ataksor, B., Bingöldağ, N., Duhan, F., Köseoğlu, Ş., & Altunbayrak, A. S. (2025). Measurement of radon concentration in metro stations of Istanbul, Türkiye. *Applied Radiation and Isotopes*, 217. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2024.111617>
- APA. (2021). *Mapa de Suscetibilidade*. <https://Apambiente.Pt/Prevencao-e-Gestao-de-Riscos/Mapa-de-Suscetibilidade-Ao-Radao>.
- APA. (2022a). *Gestão da exposição ao radão nos locais de trabalho - Guia para empregadores*.
- APA. (2022b). *Guia comunicação de valores de dose resultantes da exposição ao radão*.
- APA. (2022c). *Guia para a prestação de serviços na medição de radão por detetores passivos no ar interior de edifícios*.
- APA. (2024). *Nota Interpretativa no 1*.
- Appleton, J. D., Jones, D. G., Miles, J. C. H., & Scivyer, C. (2020). Chapter 18 Radon gas hazard. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 29(1). <https://doi.org/10.1144/egsp29.18>
- Assembleia da República. (2009). Lei n. 102/2009 de 10 de Setembro. Regime jurídico da promoção da segurança e saúde no trabalho. *Diário Da República*, n.o 176(1a Série).
- Beldean-Galea, M. S., Dicu, T., Cucos, A., Burghel, B. D., Catalina, T., Botoş, M., Ţenter, A., Szacsvai, K., Lupulescu, A., Pap, I., Dobrei, G., Moldovan, M., Tunyagi, A., Florică, Ş., Pănescu, V., & Sainz, C. (2020). Evaluation of indoor air pollutants in 100 retrofit residential buildings from Romania during cold season. *Journal of Cleaner Production*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124098>
- Celen, Y. Y., Oncul, S., Narin, B., & Gunay, O. (2023). Measuring radon concentration and investigation of it's effects on lung cancer. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 16(4). <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2023.100716>
- Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J. M., Baysson, H., Bochicchio, F., Deo, H., Falk, R., Forastiere, F., Hakama, M., Heid, I., Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Lagarde, F., Mäkeläinen, I., Muirhead, C., Oberaigner, W., Pershagen, G., Ruano-Ravina, A., ... Doll, R. (2005). Radon in homes and risk of lung cancer: Collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical Journal*, 330(7485). <https://doi.org/10.1136/bmj.38308.477650.63>
- Dicu, T., Botoş, M., Cucos, A., Grecu, Ş., Florică, Ş., & Tunyagi, A. (2024). Evaluating radon concentration and temporal correction factors in residential and workplace buildings: A comparison of passive and active methods. *Heliyon*, 10(17). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37144>
- Dimitrova, I., Georgiev, S., Mitev, K., Todorov, V., Dutsov, C., & Sabot, B. (2023). Study of the performance and time response of the RadonEye Plus2 continuous radon monitor. *Measurement*:

-
- Journal of the International Measurement Confederation*, 207.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112409>
- Dimitrova, I., Georgiev, S., Todorov, V., Daraktchieva, Z., Howarth, C. B., Wasikiewicz, J. M., Sabot, B., & Mitev, K. (2024). Calibration and metrological test of the RadonEye Plus2 electronic monitor. *Radiation Measurements*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2024.107169>
- EURATOM. (2014). Diretiva 2013/59/Euratom Do Conselho. *Jornal Oficial Da União Europeia*, 13.
- European Cancer Inequalities Registry. (2023). *Perfil sobre cancro por país 2023 European Cancer Inequalities Registry*. <https://www.oecd.org/termsand->
- Ferreira, J. A., Ribeiro, M. A., & Martins, H. C. B. (2014). The Pedregal granite (Portugal): Petrographic and geochemical characterization of a peculiar granitoid. *Estudios Geologicos*, 70(2). <https://doi.org/10.3989/egeol.41730.321>
- Gillmore, G. K., Crockett, R. G. M., & Phillips, P. S. (2018). Radon as a carcinogenic built-environmental pollutant. *Geological Society Special Publication*, 451(1). <https://doi.org/10.1144/SP451.5>
- Gopalakrishnan, P., & Jeyanthi, J. (2022). Importance of radon assessment in indoor Environment-a review. *Materials Today: Proceedings*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.534>
- Grzywa-Celińska, A., Krusiński, A., Mazur, J., Szweczyk, K., & Kozak, K. (2020). Radon—the element of risk. The impact of radon exposure on human health. *Toxics*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/toxics8040120>
- Hansen, V., Petersen, D., Søgaard-Hansen, J., Rigét, F. F., Mosbech, A., Clausen, D. S., Mulvad, G., & Rönnqvist, T. (2023). Indoor radon survey in Greenland and dose assessment. *Journal of Environmental Radioactivity*, 257. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.107080>
- Harrison, J. D., & Marsh, J. W. (2019). ICRP recommendations on radon; ICRP 2019 Proceedings. *Annals of the ICRP*, 49. <https://doi.org/10.1177/0146645320931974>
- Heloísa Fonseca. (2025). *Fatores de correção sazonal para medições de radão no interior de edifícios em Portugal continental*.
- IAEA. (2014). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standard Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna (2014)*.
- IARC. (1988). IARC Monographs on the Evaluation of the carcinogenic risks to humans: Man-made Mineral Fibres and Radon. In *World Health Organization* (Vol. 43). World Health Organization.
- ICRP. (1993). Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. *Annals of the ICRP*, Ann. ICRP 23 N.o 2, 45.
- ICRP. (2014). *Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126: Vol. Ann. ICRP 43(3)* (ICRP, Ed.). IRCP. <http://pij.sagepub.com>
- ICRP. (2017). Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. In *Annals of the ICRP: Vol. 46(3/4)*.
-

-
- Kojo, K., & Kurttio, P. (2020). Indoor radon measurements in finnish daycare centers and schools-enforcement of the radiation act. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8). <https://doi.org/10.3390/ijerph17082877>
- Krewski, D., Lubin, J. H., Zielinski, J. M., Alavanja, M., Catalan, V. S., Field, R. W., Klotz, J. B., Létourneau, E. G., Lynch, C. F., Lyon, J. I., Sandler, D. P., Schoenberg, J. B., Steck, D. J., Stolwijk, J. A., Weinberg, C., & Wilcox, H. B. (2005). Residential radon and risk of lung cancer: A combined analysis of 7 North American case-control studies. *Epidemiology*, 16(2). <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000152522.80261.e3>
- Kurkela, O., Nevalainen, J., Pätsi, S. M., Kojo, K., Holmgren, O., & Auvinen, A. (2023). Lung cancer incidence attributable to residential radon exposure in Finland. *Radiation and Environmental Biophysics*, 62(1). <https://doi.org/10.1007/s00411-022-01004-1>
- Lopes, S. I., Nunes, L. J. R., & Curado, A. (2021). Designing an indoor radon risk exposure indicator (Irrei): An evaluation tool for risk management and communication in the iot age. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(15). <https://doi.org/10.3390/ijerph18157907>
- Luís Eduardo Pimentel Real, & Jorge M. Grandão Lopes. (2020). *LNEC*. www.lnec.pt
- Milner, J., Shrubsole, C., Das, P., Jones, B., Ridley, I., Chalabi, Z., Hamilton, I., Armstrong, B., Davies Prof., M., & Wilkinson, P. (2014). Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer: Modelling study. *BMJ (Online)*, 348, 1–12. <https://doi.org/10.1136/bmj.f7493>
- Nunes, L. J. R., Curado, A., da Graça, L. C. C., Soares, S., & Lopes, S. I. (2022). Impacts of Indoor Radon on Health: A Comprehensive Review on Causes, Assessment and Remediation Strategies. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 19, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/ijerph19073929>
- Presidência do Conselho de Ministros. (2018). Decreto-Lei n. 108/2018 de 3 de dezembro. *Diário Da República*, n.o 232(1.a série).
- Resolução do Conselho de Ministros 150-A. (2022). Plano Nacional para o Radão. *Diário Da República*, n.o 250(1a Série).
- Reste, J., Pavlovskā, I., Martinsone, Z., Romans, A., Martinsone, I., & Vanadzins, I. (2022). Indoor Air Radon Concentration in Premises of Public Companies and Workplaces in Latvia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph19041993>
- Richardson, D. B., Rage, E., Demers, P. A., Do, M. T., Fenske, N., Deffner, V., Kreuzer, M., Samet, J., Bertke, S. J., Kelly-Reif, K., Schubauer-Berigan, M. K., Tomasek, L., Zablotska, L. B., Wiggins, C., & Laurier, D. (2022). Lung Cancer and Radon: Pooled Analysis of Uranium Miners Hired in 1960 or Later. *Environmental Health Perspectives*, 130(5). <https://doi.org/10.1289/EHP10669>
- Silva, A. S., & Dinis, M. de L. (2022). Assessment of indoor radon concentration and time-series analysis of gamma dose rate in three thermal spas from Portugal. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(9). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10157-x>
-

-
- Simms, J. A., Pearson, D. D., Cholowsky, N. L., Irvine, J. L., Nielsen, M. E., Jacques, W. R., Taron, J. M., Peters, C. E., Carlson, L. E., & Goodarzi, A. A. (2021). Younger North Americans are exposed to more radon gas due to occupancy biases within the residential built environment. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86096-3>
- Torres-Durán, M., Ruano-Ravina, A., Parente-Lamelas, I., Leiro-Fernández, V., Abal-Arca, J., Montero-Martínez, C., Pena-Álvarez, C., González-Barcala, F. J., Castro-Añón, O., Golpe-Gómez, A., Martínez, C., Mejuto-Martí, M. J., Fernández-Villar, A., & Barros-Dios, J. M. (2014). Lung cancer in never-smokers: A case-control study in a radon-prone area (Galicia, Spain). *European Respiratory Journal*, 44(4), 994–1001. <https://doi.org/10.1183/09031936.00017114>
- UNSCEAR. (2000). *Sources and effects of ionizing radiation - Report to the General Assembly, with Scientific Annexes: Vol. I*.
- UNSCEAR. (2020). *Sources, effects and risks of ionizing radiation. Scientific Annex A: Evaluation of medical exposure to ionizing radiation*.
- Valcarce, D., Alvarellos, A., Rabuñal, J. R., Dorado, J., & Gestal, M. (2022). Machine Learning-Based Radon Monitoring System. *Chemosensors*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/chemosensors10070239>
- Veloso, B., Nogueira, J. R., & Cardoso, M. F. (2012). Lung cancer and indoor radon exposure in the north of Portugal - An ecological study. *Cancer Epidemiology*, 36(1). <https://doi.org/10.1016/j.canep.2011.10.005>
- Vienneau, D., Boz, S., Forlin, L., Flückiger, B., de Hoogh, K., Berlin, C., Bochud, M., Bulliard, J. L., Zwahlen, M., & Röösli, M. (2021). Residential radon – Comparative analysis of exposure models in Switzerland. *Environmental Pollution*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116356>
- Voltattorni, N., Gasparini, A., & Galli, G. (2023). The Analysis of ²²²Rn and ²²⁰Rn Natural Radioactivity for Local Hazard Estimation: The Case Study of Cerveteri (Central Italy). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(14). <https://doi.org/10.3390/ijerph20146420>
- Wang, Z., Koutrakis, P., Liu, M., Vieira, C. L. Z., Coull, B. A., Maher, E. F., Moy, M. L., Huang, S., & Garshick, E. (2024). Residential radon decay products are associated with cough and phlegm in patients with COPD. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116693>
- Warkentin, P., Curry, E., Michael, O., & Bjorndal, B. (2020). A comparison of consumer-grade electronic radon monitors. *Journal of Radiological Protection*, 40(4). <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab96d6>
- WHO. (2009). *WHO Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective*. World Health Organization.
-

APENDICES

ANEXOS

ANEXO I. Aviso medição de Radão em curso (RadonEye+²)



INFORMAÇÃO – MEDIÇÃO DE RADÃO A DECORRER – NÃO MEXER

O radão é um gás radioativo que não tem cheiro e apenas é detetado com equipamento adequado.

A medição da concentração de radão no ar interior do edifício é a única forma de aferir se a concentração excede o nível de referência nacional.

O detetor está a medir a concentração do gás radão neste espaço. Durante o período de medição não alterar a sua posição, o local e as condições de medição.

Local	Detetor Nº	Data de colocação	Data de remoção
		__/__/__ __:__	__/__/__ __:__

Em caso de dúvida, contacte: André Filipe Silva, telefone 913732122,
andre.silva@incm.pt



INFORMAÇÃO – MEDIÇÃO DE RADÃO A DECORRER – NÃO MEXER

O radão é um gás radioativo que não tem cheiro e apenas é detetado com equipamento adequado.

A medição da concentração de radão no ar interior do edifício é a única forma de aferir se a concentração excede o nível de referência nacional.

O detetor está a medir a concentração do gás radão neste espaço. Durante o período de medição não alterar a sua posição, o local e as condições de medição.

Local	Detetor N°	Data de colocação	Data de remoção
		__/__/__ __:__	__/__/__ __:__

Em caso de dúvida, contacte: André Filipe Silva, telefone 913732122,
andre.silva@incm.pt

Tabela 15 - Quadro resumo valores de radão - 1º fase, detetores ativos.

<i>Edifício</i>	<i>Local</i>	<i>Valores de Radão (Bq/m³)</i>			
		<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Média</i>	<i>Média Corrigida (dias uteis)</i>
CPO	RSP	1311	241	783	629
	LMP	352	78	190	199
	CSI	664	42	353	322
	UGF	560	79	228	271
GPK	RSG	60	0	19	21
	MCG	68	4	24	25
	LMG	95	10	45	46
	CSI	55	5	24	24
LPO	DSO	291	2	101	83
	Cave	251	55	109	105
	Público	168	23	72	71
	Não público	191	26	83	84

Tabela 16 - Quadro resumo valores de radão - 2ª fase, detetores ativos.

<i>Edifício</i>	<i>Local</i>	<i>Valores de Radão (Bq/m³)</i>			
		<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Média</i>	<i>Média Corrigida (dias uteis)</i>
CPO	RSP	1016	9	421	359
	LMP	448	38	137	145
	CSI	664	42	353	322
	UGF	555	23	141	160
GPK	RSG	134	0	23	18
	MCG	361	0	45	24
	LMG	432	2	91	63
	CSI	95	0	29	26
LPO	DSO	161	0	43	30
	Cave	418	2	158	150
	Público	298	0	82	79
	Não público	323	0	98	92

Tabela 17 - Dose efetiva - CR-39 (mSv/ano)

<i>Edifício</i>	<i>Local</i>	<i>Atividade (Bq/m³)</i>	<i>Incerteza (Bq/m³)</i>	<i>E (mSv/ano)</i>
CPO	RSP	469	49	$2,9 \pm 0,3$
	LMP	140	16	$0,9 \pm 0,1$
	CSI	162	18	$1,0 \pm 0,1$
	UGF	139	16	$0,9 \pm 0,1$
GPK	DSO	54,4	7,0	$0,3 \pm 0,0(4)$
LPO	Cave	153	17	$0,9 \pm 0,1$

Tabela 18 - Resumo das variáveis ambientais registradas - 1ª Fase

<i>Edifício</i>	<i>Local</i>	<i>θ (°C)</i>			<i>Hr (%)</i>		
		<i>Max.</i>	<i>Min.</i>	<i>Média</i>	<i>Max.</i>	<i>Min</i>	<i>Média</i>
CPO	RSP	20,5	17,0	18,9	60	42	52
	LMP	22,5	17,5	19,5	60	38	48
	CSI	17,5	14,5	16,3	69	45	57
	UGF	22,0	18,0	19,6	61	36	48
GPK	RSG	21,5	13,0	17,6	63	32	47
	MCG	22,5	15,5	19,3	59	29	43
	LMG	22,5	17,5	20,1	58	29	42
	CSI	21,5	18,0	20,5	58	31	43
	DSO	20,5	14,5	18,0	62	34	47
LPO	Cave	20,5	19,0	20,1	56	36	46
	Público	21,0	18,5	20,1	58	34	45
	Não Público	21,0	19,0	20,4	57	34	44

Tabela 19 - Resumo das variáveis ambientais registradas - 2ª Fase

<i>Edifício</i>	<i>Local</i>	<i>θ (°C)</i>			<i>Hr (%)</i>		
		<i>Max.</i>	<i>Min.</i>	<i>Média</i>	<i>Max.</i>	<i>Min</i>	<i>Média</i>
CPO	RSP	26,0	21,5	24,0	56	36	48
	LMP	26,5	21,0	24,0	60	35	50
	CSI	28,5	21,5	25,0	66	30	52
	UGF	26,0	21,5	23,4	64	40	52
GPK	RSG	28,0	19,5	23,3	61	37	50
	MCG	29,0	20,5	24,1	60	34	47
	LMG	27,5	20,5	23,5	61	37	50
	CSI	25,5	21,0	23,6	62	39	52
	DSO	24,5	16,5	21,6	71	43	56
LPO	Cave	23,5	19,0	22,4	63	40	54
	Público	25,5	22,0	24,1	61	43	52
	Não Público	25,5	22,5	24,1	61	43	52