

**As exposições potenciais na classificação de  
trabalhadores e de locais de trabalho em práticas  
industriais**

**Rita Alexandra Candeias Belo**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Proteção e Segurança Radiológica**

Orientadores: Eng.º Louis Filipe Pereira Castelo Branco, Dr. Nuno Rombert Pinhão

**Júri**

Presidente: Dr. José Pedro Miragaia Trancoso Vaz

Orientador: Louis Filipe Pereira Castelo Branco

Vogais: Dr. Francisco José Cerqueira Alves

**Outubro 2021**



## **Declaração**

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

## **Declaration**

I declare that this document is an original work of my own authorship and that it fulfills all the requirements of the Code of Conduct and Good Practices of the Universidade de Lisboa.

# Agradecimentos

À minha família e amigos, o meu maior agradecimento por todo o apoio ao longo do meu percurso académico. Sei que qualquer etapa concluída na minha vida académica e profissional se deve aos incríveis exemplos de empenho e dedicação pelos quais sempre estive rodeada.

Aos pais, irmão, avós, tios e primos, por todo o amor, por todas as vezes que demonstraram orgulho em mim e por serem fontes inesgotáveis de força e motivação.

Aos amigos que são família e com os quais espero vir a partilhar tantas outras conquistas pessoais, académicas e profissionais: Mariana, Francisco, Rui, Diogo, Beatriz e Gonçalo. E ainda à Maria, à Cláudia e à Cristiana, que estiveram aqui desde o meu primeiro dia no mundo universitário.

Agradeço em particular à Cristiana e ao Francisco, pelo apoio na revisão da dissertação, na identificação de pequenas incongruências e oportunidades de melhoria.

Aos docentes do MPSR, que são exemplos de valores pessoais e profissionais que levarei sempre comigo, agradeço toda a disponibilidade e partilha, em especial aos professores Pedro Vaz e Nuno Pinhão, não só pela disponibilidade e empatia ao longo do curso mas em especial nesta reta final.

Aos meus colegas do MPSR agradeço a constante partilha de experiências, a entreaajuda e companheirismo. Tornaram esta experiência melhor do que alguma vez previ.

Por último, à Cláudia e ao Louis, colegas com os quais trabalhei diretamente na obtenção dos resultados desta dissertação, que são o meu suporte no trabalho e que são grandes exemplos como colegas e profissionais. Um especial obrigado ao Louis pela orientação ao longo deste último ano.

## Abstract

**Introduction:** A prior safety assessment should be submitted to the regulatory body as part of the licensing process. The mentioned assessment should estimate normal and potential occupational exposures. This study aims to assess the influence of potential exposures on the final categorisation of workers and classification of workplaces. **Methods:** Based on prior radiological evaluations of 92 industrial radiation sources, 56 of them being sealed radioactive sources and 36 being radiation generators, the classifications of workers and workplaces based only on normal exposures were compared with the final classifications that additionally considered the contribution of potential exposures (probability and magnitude). **Results:** Potential exposures changed the categorisation of workers in 31 of the 56 sealed radioactive sources considered (55.4 %) from members of the public to exposed workers of category B and changed the workplace classification from non-classified to supervised area in 32 cases (57.1 %). Regarding X-ray generators, potential exposures changed the categorisation of workers in 5 cases (13.9 %) and the classification of 5 workplaces (13.9 %). **Conclusion:** Potential exposures presented a greater impact on the classification of workers and workplaces involved in the practice of operating equipment that incorporates sealed radioactive sources, due to the greater risk they pose. This was not verified for X-ray generators, where there was a lower magnitude and probability of potential exposures, since most of the generators had engineering controls robust enough to be operated by members of the public and do not present any risk of exposure when switched off.

**Keywords:** Occupational exposure, potential exposure, sealed source, radiation generator, radiation protection, prior radiological evaluation.



## Resumo

**Introdução:** O pedido de licenciamento de práticas deve incluir uma estimativa das exposições ocupacionais normais e potenciais. O presente estudo aferiu a influência das exposições potenciais na classificação final de trabalhadores e locais de trabalho. **Metodologia:** Compararam-se as classificações dos profissionais e dos locais de trabalho com base nas estimativas das exposições normais, com as classificações finais que consideraram adicionalmente a contribuição das exposições potenciais de 92 fontes de radiação utilizadas em contexto industrial, sendo 56 delas fontes radioativas seladas e 36 geradores de radiações ionizantes. **Resultados:** A consideração das exposições potenciais alterou a classificação dos profissionais afetos a 31 das 56 fontes radioativas seladas (55,4 %) de membros do público para trabalhadores expostos de categoria B e alterou a classificação dos locais onde operam 32 delas (57,1 %) de zona não classificada para zona vigiada. Quanto aos geradores de raios X, foram alteradas as classificações dos profissionais afetos a 5 aparelhos (13,9 %) e de 5 locais de trabalho (13,9 %). **Conclusão:** As exposições potenciais apresentaram maior impacto na classificação dos profissionais e dos locais de trabalho afetos à prática que envolve fontes radioativas seladas devido ao maior risco que comportam. Já para os geradores de raios X, verificou-se um impacto inferior uma vez que a maioria dos equipamentos apresenta soluções de engenharia de segurança suficientemente robustas para serem operados por membros do público e não representam risco radiológico quando se encontram inativos.

**Palavras-chave:** Exposição ocupacional, exposição potencial, fonte radioativa selada, gerador de radiações ionizantes, proteção radiológica.





# Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Contextualização .....	1
1.2.	Motivação .....	2
1.3.	Objetivo.....	3
1.4.	Estrutura da dissertação.....	3
2.	Enquadramento teórico e legal .....	5
2.1.	O sistema internacional de proteção radiológica .....	5
2.2.	Novo paradigma da proteção radiológica.....	6
2.3.	Tipos de situações de exposição .....	8
2.4.	Grandezas físicas e de proteção.....	9
2.5.	Exposição ocupacional e grandezas operacionais .....	11
2.6.	Controlo regulador .....	13
2.7.	Avaliação prévia de segurança .....	13
2.8.	Classificação de profissionais .....	16
2.9.	Classificação de locais de trabalho .....	18
2.10.	Aplicações industriais .....	19
2.11.	Exposições potenciais em contexto industrial.....	24
2.11.1.	Prática que envolve fontes radioativas seladas .....	26
2.11.2.	Prática de operação de geradores de radiações ionizantes .....	26
2.11.3.	Resultados do sistema de registo e análise de incidentes australiano.....	27
3.	Metodologia .....	29
3.1.	Amostra .....	29
3.2.	Etapas do trabalho .....	31
3.3.	Materiais .....	32
3.4.	Métodos .....	32
3.4.1.	Estimativa das exposições ocupacionais normais .....	32
3.4.2.	Estimativa das exposições ocupacionais potenciais.....	35
3.4.3.	Estimativa das exposições normais e potenciais nos locais de trabalho.....	40
4.	Resultados e discussão.....	42

4.1.	Classificação dos profissionais expostos .....	42
4.2.	Classificação dos locais de trabalho .....	55
5.	Conclusão.....	61
	Referências bibliográficas .....	65
	Anexos.....	69
	A – Exemplo da estimativa das exposições ocupacionais e potenciais para a prática que envolve fontes radioativas seladas incorporadas num gamadensímetro .....	69
a)	Erro humano .....	73
b)	Degradação do sistema de recolha da fonte radioativa selada .....	73
c)	Sismos, condições climatéricas extremas, corrosão, choque mecânico, queda de cargas pesadas, esmagamento, incêndio ou explosão .....	74
d)	Falha e avaria dos equipamentos .....	76
e)	Incêndio e explosão.....	76
	B – Exemplo da estimativa das exposições ocupacionais e potenciais para a prática de operação de geradores de radiação ionizante .....	77
a)	Exposição externa pela radiação primária: irradiação do feixe direto.....	79
b)	Exposição externa pela radiação secundária: radiação dispersa e de fuga .....	80



## Lista de tabelas

<i>Tabela 1 – Limites de dose recomendados na publicação 103 da ICRP para situações de exposição planeada.</i> .....	7
<i>Tabela 2 – Fatores de ponderação da radiação.</i> .....	10
<i>Tabela 3 – Fatores de ponderação tecidual.</i> .....	10
<i>Tabela 4 – Grandezas operacionais para monitorização da exposição externa.</i> .....	12
<i>Tabela 5 – Doses suscetíveis de serem recebidas por um profissional e respetiva categorização.</i> ....	17
<i>Tabela 6 – Número e tipo de equipamentos existentes na amostra considerada.</i> .....	30
<i>Tabela 7 – Fontes de radiação e respetivas emissões consideradas.</i> .....	32
<i>Tabela 8 – Equipamentos utilizados na monitorização dos locais de trabalho.</i> .....	32
<i>Tabela 9 – Energias média e máxima para cada radionuclídeo emissor beta considerado.</i> .....	34
<i>Tabela 10 – Descrição dos cenários de exposição potencial para a prática que envolve um gamadensímetro.</i> .....	36
<i>Tabela 11 – Descrição dos cenários de exposição potencial para a prática que envolve medidores nucleares.</i> .....	37
<i>Tabela 12 – Descrição dos cenários de exposição potencial para a prática de operação de geradores de radiação ionizante (XRF, inspetores e raio X em cabine).</i> .....	38
<i>Tabela 13 – Valor da contante gama determinado a 1 m para cada radionuclídeo de interesse.</i> .....	39
<i>Tabela 14 – Resumo das classificações iniciais e finais dos trabalhadores afetos às práticas.</i> .....	60
<i>Tabela 15 – Resumo das classificações iniciais e finais dos locais de trabalho.</i> .....	60



## Lista de figuras

<i>Figura 1 – Princípio de funcionamento de aquisição de imagem planar.</i> .....	20
<i>Figura 2 – Princípio de funcionamento de aquisição de imagens tomográficas.</i> .....	20
<i>Figura 3 – Princípio de funcionamento da inspeção de nível com geradores de radiações ionizantes.</i> 21	
<i>Figura 4 – Princípio de funcionamento da fluorescência por raios X.</i> .....	21
<i>Figura 5 – Princípio de funcionamento típico dos medidores nucleares de nível.</i> .....	22
<i>Figura 6 – Princípio de funcionamento típico de um gamadensímetro.</i> .....	22
<i>Figura 7 – Princípio de funcionamento típico de um detetor de captura de elétrons.</i> .....	23
<i>Figura 8 – Descrição da amostra.</i> .....	30
<i>Figura 9 – Classificação dos trabalhadores com base nas exposições normais.</i> .....	42
<i>Figura 10 – Classificação dos trabalhadores com base nas exposições normais para cada tipo de fonte de radiação considerada.</i> .....	42
<i>Figura 11 – Pontos de medição dos débitos de equivalente de dose ambiente devido a fótons e a nêutrons para estimativa das doses ocupacionais devido aos cenários de operação (a), transporte (b) e armazenamento (c).</i> .....	43
<i>Figura 12 – Doses efetivas máximas estimadas para os trabalhadores afetos aos 4 gamadensímetros considerados.</i> .....	44
<i>Figura 13 – Simulação da situação de normal aproximação às fontes de <sup>60</sup>Co.</i> .....	44
<i>Figura 14 – Doses efetivas máximas estimadas para os trabalhadores afetos aos medidores nucleares com <sup>60</sup>Co.</i> .....	44
<i>Figura 15 – Doses efetivas máximas estimadas para os trabalhadores afetos aos geradores de raios X em cabine.</i> .....	45
<i>Figura 16 – Equipamento e pontos de monitorização dos locais de trabalho (a), controlador à distância (b) e encravamento de segurança existente na porta de acesso ao feixe direto (c).</i> .....	46
<i>Figura 17 – Doses efetivas máximas estimadas para os trabalhadores afetos aos geradores de raios X utilizados para inspeção de nível e de corpos estranhos.</i> .....	46
<i>Figura 18 – Ponto de monitorização dos locais de trabalho para estimativa das doses ocupacionais normais devido à operação de um inspetor de corpos estranhos sem acesso ao feixe direto.</i> .....	47
<i>Figura 19 – Doses efetivas e doses equivalentes na pele máximas estimadas para os trabalhadores afetos aos medidores nucleares com <sup>85</sup>Kr e <sup>147</sup>Pm.</i> .....	47
<i>Figura 20 – Doses efetivas máximas estimadas para os trabalhadores afetos aos medidores nucleares com <sup>137</sup>Cs e <sup>241</sup>Am.</i> .....	48
<i>Figura 21 – Classificação inicial e final dos trabalhadores.</i> .....	49

<i>Figura 22 – Classificação final dos trabalhadores com base nas exposições normais e potenciais para cada tipo de fonte de radiação considerada. ....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 23 – Estimativa das exposições normais e potenciais dos trabalhadores expostos de categoria B. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 24 – Sinalizações de aviso, luminosa e botão de paragem de emergência no comando de controlo à distância (a) e botão de paragem de emergência e chave de segurança (b).....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 25 – Sinalização luminosa, chave de segurança, botão de paragem de emergência, sinalização de aviso de radiações ionizantes incluindo para grávidas e para não introdução de extremidades na zona de entrada e saída de produto (a) e encravamentos mecânicos de segurança existentes nas tampas das esteiras transportadoras (b).....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 26 – Estimativa das exposições normais e potenciais dos trabalhadores classificados como membros do público. ....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 27 – Classificação dos locais de trabalho com base nas ocupações normais.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 28 – Classificação dos locais de trabalho de cada tipo de fonte de radiação com base nas ocupações normais. ....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 29 – Equipamento em causa (a) e equipamento utilizado para o mesmo fim mas com tampa de acesso à zona proximal ao feixe direto com encravamentos de segurança (b).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 30 – Classificação inicial e final dos locais de trabalho. ....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 31 – Classificação inicial e final dos locais de trabalho para cada tipo de fonte considerada. .</i>	<i>58</i>

## **Lista de abreviaturas**

**APA** – Agência Portuguesa do Ambiente

**ARPANSA** – *Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency*

**ECD** – Detetor de captura de eletrões

**FMEA** – Análises de modo de falhas e efeitos

**FTA** – Análise de árvore de falhas

**HAZOP** – Estudo de perigos e operabilidade

**IAEA** – Agência Internacional de Energia Atómica

**ICRP** – Comissão Internacional de Proteção Radiológica

**ICRU** – Comissão Internacional de Medidas e Unidades de Radiação

**ILO** – Organização Internacional do Trabalho

**OMS** – Organização Mundial da Saúde

**NEA** – Agência de Energia Nuclear

**SI** – Sistema Internacional

**UNSCEAR** – Comitê Científico das Nações Unidas para os Efeitos da Radiação Atómica

**XRF** – Fluorescência por raios X



# 1. Introdução

## 1.1. Contextualização

A exposição a fontes naturais de radiação ionizante é um fenómeno sempiterno, devido à existência de raios cósmicos e à presença de radionuclídeos naturais no meio ambiente, seja no solo, água ou atmosfera, e ainda em alimentos e tecidos biológicos. <sup>[1-3]</sup>

Atualmente, verifica-se não só a exposição humana a estas fontes naturais, mas também a fontes artificiais como os radionuclídeos antropogénicos que sofreram dispersão atmosférica devido a ações humanas e que contribuem para a radiação de fundo, e às restantes fontes antropogénicas, sejam elas fontes radioativas ou geradores de raios X, empregues em inúmeros setores como os da indústria, ambiente, investigação, serviços, segurança, energia e saúde. <sup>[1-3]</sup>

Graças à sua elevada energia e conseqüente capacidade de atravessar a matéria, as radiações ionizantes, ao interagirem com a matéria, têm a capacidade de ionizar átomos, quebrar ligações químicas e, conseqüentemente, lesar tecidos biológicos. <sup>[4,5]</sup>

Daí que o risco da exposição à radiação para os trabalhadores, membros do público e ambiente que advém destas aplicações deva ser avaliado, por forma a aferir se esse risco é aceitável, se pode e/ou deve ser reduzido a partir da otimização da proteção para níveis aceitáveis. <sup>[2,3]</sup>

Em contexto industrial, as fontes radioativas e geradores de radiações ionizantes apresentam diversas aplicações como a realização de ensaios não destrutivos, técnicas analíticas de determinação da composição elementar de uma amostra, a irradiação de alimento e material para esterilização, inspeção de corpos estranhos em produtos, medição de densidade, humidade, espessura e nível.

A realização destas práticas é sujeita a controlo administrativo prévio através de licenciamento, uma vez que, de acordo com o Artigo 22.º do Decreto-Lei N.º 108/2018, de 3 de dezembro, é obrigatório o licenciamento de qualquer prática que envolva fontes radioativas seladas que não se encontrem abaixo dos valores de isenção previstos na Portaria N.º 138/2019 e ainda a operação de geradores de radiações ionizantes para fins não médicos.

O Decreto-Lei N.º 108/2018 transpõe a Diretiva 2013/59/Euratom que fixa as normas de segurança de base relativas à proteção contra os perigos resultantes da exposição a radiações ionizantes e pelas quais se rege o atual sistema regulador em Portugal.

De acordo com o referido Decreto-Lei, aquando da instrução do processo de licenciamento, o titular deve apresentar, entre outros elementos, um documento de avaliação prévia de segurança. Este documento tem como objetivo avaliar se o titular salvaguarda a proteção dos trabalhadores, membros do público e do meio ambiente contra os efeitos deletérios da radiação ionizante, através da verificação do cumprimento dos requisitos legais, de segurança e orientações da autoridade competente – a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) aplicáveis. <sup>[2,3]</sup>

Parte das avaliações e estimativas realizadas neste documento incidem sobre as situações de exposição planeada, situações de exposição decorrentes do normal funcionamento e operação de uma fonte de radiação, e que incluem as exposições normais e as exposições potenciais. [5,6]

As exposições normais são aquelas que se perspectiva que decorram sob condições operacionais normais de uma instalação ou prática radiológica. Espera-se que este tipo de exposição resulte em doses inferiores às dos limites estabelecidos para os profissionais. Por outro lado, a exposição potencial refere-se a uma exposição que não é esperada com certeza, mas que pode resultar de um evento ou sequência de eventos de natureza probabilística que podem ser previamente identificados como possíveis cenários de acidentes, como falhas nos equipamentos ou erros operacionais. [5,7]

Assim, a avaliação prévia de segurança deve incluir uma estimativa das exposições dos trabalhadores em condições normais de funcionamento, identificar a forma como podem ocorrer exposições potenciais e estimar, na medida do possível, a sua probabilidade de ocorrência e respetiva magnitude.

## 1.2. Motivação

A realização destas estimativas é especialmente relevante uma vez que tem impacto direto na classificação dos profissionais afetos às práticas e na classificação dos locais de trabalho onde opera cada fonte. [5,6,8]

Para efeitos de proteção radiológica, o titular da prática deve adotar medidas ajustadas às instalações, às fontes utilizadas e ao risco radiológico existente em cada local de trabalho e a que cada trabalhador é exposto. Como tal, com base na avaliação das doses anuais expectáveis para os operadores das fontes de radiação e na probabilidade e magnitude das exposições potenciais no local, classificam-se os locais de trabalho em zonas vigiadas, zonas controladas, ou não classificadas radiologicamente, e os trabalhadores em membros do público ou profissionais expostos de categoria A ou B. [5,8]

Os trabalhadores são classificados em categorias A e B, de acordo com os níveis de exposição ocupacional normal e potencial estimados. Na Categoria A encontram-se os trabalhadores expostos suscetíveis de receber uma dose efetiva anual superior a 6 mSv, uma dose equivalente anual superior a 15 mSv para o cristalino ou superior a 150 mSv para a pele e extremidades dos membros. Na Categoria B encontram-se os restantes trabalhadores expostos não classificados como de Categoria A mas suscetíveis de receber doses superiores às dos limites para membros do público. [5]

As zonas controladas são aquelas em que, por virtude das condições de trabalho existentes, seja provável que a exposição a que os trabalhadores estão sujeitos anualmente possa ultrapassar

doses efetivas superiores a 6 mSv ou uma dose equivalente superior a 3/10 dos limites de dose fixados para o cristalino, para a pele e para as extremidades dos membros dos trabalhadores expostos. As zonas vigiadas são aquelas em que é provável que a exposição a que os trabalhadores estão sujeitos possa ultrapassar uma dose efetiva anual de 1 mSv ou a uma dose equivalente anual de 15 mSv para o cristalino ou de 50 mSv para a pele e extremidades dos membros, mas que no entanto não se prevê que ultrapasse uma dose efetiva de 6 mSv ou uma dose equivalente superior a 3/10 dos limites de dose fixados para o cristalino, para a pele e para as extremidades dos membros. [5]

Estas classificações, que têm por base a avaliação das exposições normais e potenciais de cada profissional e de cada local de trabalho, têm implicações diretas na formação que os profissionais devem realizar, na periodicidade da monitorização individual e da vigilância de saúde por parte da saúde ocupacional.

As zonas controladas apresentam restrições e controlos de acesso e devem recorrer a limites físicos que condicionem o acesso aos locais de realização das práticas, enquanto as zonas vigiadas são aquelas nas quais se deve realizar uma vigilância das condições de segurança ainda que não exijam a adoção de medidas de proteção específicas, devendo ser sujeitas a uma supervisão frequente.

Deste modo, a classificação dos trabalhadores expostos e dos locais de trabalho deve ser proporcional aos riscos envolvidos na realização das práticas, por forma a que as consequentes monitorizações e medidas de proteção a adotar sejam adequadas.

### **1.3. Objetivo**

A presente dissertação tem como objetivo, com base nos resultados das estimativas das exposições normais e potenciais, aferir a influência da estimativa das exposições potenciais na classificação final de profissionais e de locais de trabalho em práticas não-médicas realizadas em contexto industrial onde operam fontes radioativas seladas e geradores de radiações ionizantes.

Nenhuma das práticas consideradas incluiu fontes não seladas nem descargas autorizadas.

### **1.4. Estrutura da dissertação**

A presente dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

O capítulo 2 procede a um enquadramento das recomendações em proteção radiológica até à sua transposição para a legislação, descreve a importância das estimativas das exposições ocupacionais e descreve achados bibliográficos no que respeita às exposições potenciais em contexto industrial.

O capítulo 3 apresenta os materiais, métodos e etapas do trabalho realizado.

O capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos.

O capítulo 5 evidencia conclusões e tece recomendações e propostas de trabalhos futuros.

## 2. Enquadramento teórico e legal

### 2.1. O sistema internacional de proteção radiológica

O sistema de proteção radiológica nasce após os primeiros efeitos biológicos documentados associados às radiações ionizantes, mais concretamente, os efeitos decorrentes da exposição aos raios X e às partículas  $\alpha$  emitidas por isótopos de rádio.<sup>[11]</sup>

Foi no Segundo Congresso Internacional de Radiologia em 1928 realizado em Estocolmo que surgiram as primeiras recomendações em proteção radiológica.<sup>[11]</sup>

Este sistema foi-se reajustando à medida que surgiam novas fontes de radiação e a comunidade científica aprofundava os seus estudos sobre os efeitos biológicos das radiações ionizantes.<sup>[11]</sup>

A crescente exigência da proteção contra estes riscos biológicos fez com que tivessem de ser criadas grandezas mensuráveis para que se estabelecessem limites de dose e fossem associando alguns valores aos efeitos documentados até então.<sup>[11]</sup>

Assim, o sistema internacional de proteção radiológica surge da necessidade de se estabelecerem critérios e padrões internacionais que orientem a tomada de decisão em proteção radiológica e que traduzam um consenso de todas as partes interessadas. Estes padrões são revistos e atualizados considerando as atuais evidências científicas sobre os efeitos biológicos das radiações ionizantes, experiência prática, aspetos éticos e necessidades sociais.<sup>[9-11]</sup>

O principal objetivo deste sistema é contribuir para um nível adequado de proteção das pessoas e do meio ambiente contra os efeitos prejudiciais da exposição à radiação, sem limitar os benefícios das práticas radiológicas.<sup>[10]</sup>

Para efetivar este sistema, existem várias organizações com diferentes papéis para elaborar e implementar políticas de proteção contra os efeitos deletérios das radiações ionizantes.

A Comissão Internacional de Medidas e Unidades de Radiação (ICRU) define e padroniza as medidas e unidades que quantificam as grandezas relacionadas com a radiação, a sua interação com a matéria e os efeitos biológicos que esta produz.<sup>[11]</sup>

O Comitê Científico das Nações Unidas para os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR) recolhe e analisa dados e literatura científica relevante sobre os efeitos da exposição à radiação ionizante e produz avaliações científicas acerca das mesmas.<sup>[9,12]</sup>

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), a partir das avaliações do UNSCEAR, desenvolve princípios, recomendações e guias transversais a todas as práticas que envolvem radiações ionizantes, servindo como base do atual sistema de proteção radiológica. Estas recomendações fornecem um nível adequado de proteção para o homem e ambiente, sem limitar

indevidamente as atividades benéficas das práticas, e consideram os princípios fundamentais para o estabelecimento de medidas de proteção adequadas. Adicionalmente, estas recomendações regem-se pelas unidades definidas pela ICRU. <sup>[9,12,13]</sup>

Esta recomendações do ICRP são seguidas por diversas entidades, como a Organização Mundial da Saúde (OMS), Organização Internacional do Trabalho (ILO), Agência de Energia Nuclear (NEA), Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), a Comissão Europeia, entre outras, para desenvolver normas e diretivas internacionais para a proteção radiológica de pacientes, do público e dos trabalhadores. <sup>[9,12]</sup>

Por último, as autoridades competentes em matéria de proteção contra radiações em cada país adaptam estas recomendações à sua realidade, transpondo-as para a sua legislação nacional. Assim, embora as recomendações da ICRP não sejam vinculativas, a legislação na maioria dos países rege-se pelas mesmas. <sup>[9,12,13]</sup>

## **2.2. Novo paradigma da proteção radiológica**

Em 2007, a ICRP publicou a “*ICRP Publication 103*” com novas recomendações que estabelecem o atual paradigma da proteção radiológica. Esta publicação substitui a anterior “*ICRP Publication 60*” (1990) com objetivo de atualizar as recomendações em função da evolução científica e tecnológica, de novas diretrizes publicadas até então, melhorar a compreensão e aplicação das recomendações e adequação das mesmas às situações práticas prevalentes. <sup>[10]</sup>

O processo de atualização destas recomendações envolveu um diálogo aberto com a comunidade internacional de proteção radiológica, as várias organizações envolvidas no sistema de proteção radiológica, por forma a assegurar que estas tinham em conta as necessidades práticas de várias partes interessadas, sejam elas autoridades competentes, grupos profissionais de vários setores ou organizações não-governamentais. <sup>[9]</sup>

Esta nova publicação mantém os três princípios fundamentais e basilares da proteção radiológica: os princípios da justificação, otimização e limitação de doses. <sup>[10]</sup>

O princípio da justificação estabelece que só deve ser realizada uma prática suscetível de aumentar a exposição humana a radiações ionizantes se o benefício resultante da mesma, para o indivíduo ou para a sociedade, suplantam o detrimento para a saúde que dela possa resultar. <sup>[6]</sup>

O princípio da otimização estabelece que se deve otimizar a proteção contra radiação dos indivíduos por forma a reduzir, tanto quanto razoavelmente possível, as doses decorrentes da exposição à radiação, a probabilidade da ocorrência das exposições e o número de pessoas expostas, sem comprometer os objetivos da sua aplicação, tendo em conta fatores económicos e sociais. <sup>[6]</sup>

O princípio da limitação de dose prevê que as doses a que um indivíduo é exposto em situações de exposição planeada, devem ser mantidas abaixo dos limites de dose estabelecidos para profissionais expostos ou membros do público. Este princípio não se aplica às exposições médicas dos pacientes, para as quais não estão definidos limites de dose, dado que são práticas justificadas nas quais o benefício suplanta o risco. Caso o indivíduo sujeito à exposição médica seja uma mulher grávida, devem-se aplicar os limites de dose para membros do público ao feto. [6]

No que respeita às alterações em relação à anterior publicação n.º 60 (1990), salienta-se que as novas recomendações passam a adequar a proteção a situações de exposição e não a cada tipo de prática ou intervenção. Realizou-se igualmente uma alteração da classificação das situações de exposição, passando de situações de exposição do público, dos profissionais e de pacientes (ICRP 60) para situações de exposição planeada, existente e de emergência (ICRP 103), às quais se aplicam os princípios da justificação e otimização da proteção. Mantiveram-se os limites de dose para situações de exposição planeada (tabela 1), tanto de profissionais expostos como de membros do público, surgiram restrições de dose e risco para situações de exposição planeada e níveis de referência para situações de exposição existentes e de emergência. Por último, foi reforçada a importância da otimização da proteção e foi incluída uma abordagem à proteção radiológica do meio ambiente. [10]

*Tabela 1 – Limites de dose recomendados na publicação 103 da ICRP para situações de exposição planeada.*

<b>Tipo de limite</b>	<b>Exposição ocupacional</b>	<b>Exposição do público</b>
<b>Dose efetiva</b>	20 mSv/ano	1 mSv/ano
<b>Dose equivalente para o cristalino</b>	20 mSv/ano	15 mSv/ano
<b>Dose equivalente para a pele</b>	500 mSv/ano	50 mSv/ano
<b>Dose equivalente para as extremidades</b>	500 mSv/ano	Não aplicável

Salvaguarda-se que é admissível que um profissional exposto seja sujeito a uma dose efetiva de 50 mSv/ano desde que a média anual dos 5 anos subsequentes não exceda 20 mSv/ano.

A 5 de dezembro de 2013, o Conselho da União Europeia publicou a Diretiva 2013/59/Euratom que fixa as normas de segurança de base relativas à proteção contra os perigos resultantes da exposição a radiações ionizantes e que tem como base as recomendações previstas na Publicação 103 da ICRP. Esta Diretiva deve ser adotada pelos Estados-Membro através da sua transposição para a legislação nacional. [6]

Em Portugal, a presente diretiva foi transposta para a legislação nacional a 3 de dezembro de 2013 através do Decreto-Lei N.º 108/2018. [5]

## 2.3. Tipos de situações de exposição

As disposições da Diretiva 2013/59/Euratom, e consequentemente do Decreto-Lei N.º 108/2018, encontram-se de acordo com as recomendações previstas na Publicação 103 da ICPR, nomeadamente no que respeita à distinção entre situações de exposição existentes, planeadas e de emergência, sendo estas definidas como: [6]

- Situação de exposição de emergência: situação de exposição decorrente de uma emergência, nomeadamente situações inesperadas que surgem no decurso de uma situação planeada ou que resultem de ações com fins maliciosos, e que exigem a adoção de medidas urgentes a fim de minimizar as consequências;
- Situação de exposição existente: aquela que já existe quando têm de ser tomadas decisões para a controlar e que não exige ou já não exige a adoção de medidas urgentes;
- Situação de exposição planeada: exposição de pessoas ou do ambiente originada pelo funcionamento planeado de uma fonte de radiação ou por uma atividade humana que altera as vias de exposição, e que inclui as exposições normais e potenciais.

Contudo, nem sempre é possível atribuir um destes tipos de situação de exposição e nem sempre essa definição é estanque e aplicável a determinadas situações. São exemplos disso situações em que existe um período transitório entre uma situação de exposição de emergência para uma situação de exposição existente, que ocorre progressivamente ao longo do tempo e não num instante em concreto. Adicionalmente, algumas situações de exposição devido a fontes naturais podem ter características tanto de situação de exposição planeada como de situação de exposição existente. [14]

Considerando as situações de exposição planeada, as exposições normais são aquelas que se perspetiva que decorram sob condições operacionais normais de uma instalação ou prática radiológica. Espera-se que este tipo de exposição resulte em doses inferiores às dos limites estabelecidos para os profissionais expostos ou membros do público, e incluem, por exemplo, ações de operação, manutenção, inspeção e ocorrências operacionais previsíveis. [5,6]

Por outro lado, relativamente às exposições potenciais, a sua ocorrência não é esperada com certeza, mas pode ser prevista, uma vez que podem resultar de eventos previamente identificados como possíveis cenários acidentais, como por exemplo falhas nos equipamentos ou erros operacionais. [5,6,14]

Caso um evento ou sequência de eventos considerados nos possíveis cenários de exposição potencial realmente ocorrer, tanto pode ser descrito como uma situação de exposição planeada, ou caso seja declarada emergência, como uma situação de exposição de emergência. [14]

Estas definições aplicam-se a situações que envolvem exposição a fontes de radiação que podem ser mantidas sob controlo. Por exemplo, cenários como a quantidade de <sup>40</sup>K existente no organismo humano ou a radiação cósmica que atinge a superfície terrestre excetuam-se dos cenários passíveis de manter sob controlo. [14]



## 2.4. Grandezas físicas e de proteção

Para quantificar a radiação ionizante e os seus potenciais efeitos perante qualquer tipo de situação de exposição, é necessário definir um conjunto de grandezas e as suas respetivas unidades. Estas grandezas dividem-se em grandezas físicas, de proteção e operacionais. [10,15]

As grandezas físicas compreendem a fluência ( $\Phi$ ), a dose absorvida ( $D$ ) e o kerma ( $K$ ). [15]

A fluência consiste no quociente entre o número de partículas incidentes,  $dN$ , por unidade de área,  $dA$ , sendo geralmente indicada em  $m^{-2}$ . [10,15-17]

$$\Phi = \frac{dN}{dA} \quad (2.1)$$

A dose absorvida diz respeito à energia média,  $d\bar{\epsilon}$ , depositada pela radiação ionizante num meio com uma massa,  $dm$ . A unidade do sistema internacional (SI) é o gray (Gy), definido como um joule (J) por quilograma (kg) ( $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$ ). [10,15-17]

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (2.2)$$

Por último, o *kerma* é a soma das energias cinéticas iniciais de todas as partículas ionizantes com carga libertadas pela interação indireta de partículas sem carga como os fótons e neutrões,  $dE_{tr}$ , num material de massa  $dm$  e é dado em Gy. [10,15-17]

$$K = \frac{d\bar{\epsilon}_{tr}}{dm} \quad (2.3)$$

As grandezas de proteção radiológica consistem na dose absorvida média num órgão ou tecido ( $D_T$ ), a dose equivalente num órgão ou tecido ( $H_T$ ) e a dose efetiva ( $E$ ). [10,15-17]

A dose absorvida média numa região de um órgão ou tecido T ou “dose no órgão”  $D_T$  é definida pelo quociente entre a energia média depositada pela radiação ionizante no órgão ou tecido,  $\bar{\epsilon}_T$ , e a massa desse órgão ou tecido,  $m_T$ , e é dada em Gy. [10,15-17]

$$D_T = \frac{\bar{\epsilon}_T}{m_T} \quad (2.4)$$

A dose absorvida apresenta a lacuna de não considerar o risco biológico decorrente da dose determinada, pelo que se definiu a dose equivalente num órgão ou tecido, que tem em conta o efeito da natureza da radiação ou partícula ionizante, e a dose efetiva que considera não só o efeito biológico de cada tipo de radiação ou partícula ionizante como a radiosensibilidade dos diversos tecidos biológicos. [10,15]

Assim, a dose equivalente num órgão ou tecido, T, devida à radiação, R, define-se como:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (2.5)$$

Em que  $w_R$  é o fator de ponderação da radiação ou partícula R e  $D_{T,R}$  é a dose absorvida média no órgão ou tecido T. [10,15-17]

Os fatores de ponderação da radiação encontram-se definidos também pela publicação nº 103 da ICRP e, na legislação portuguesa, encontram-se definidos na Portaria N.º 137/2019 de 10 de maio e podem ser observados na tabela 2.

Tabela 2 – Fatores de ponderação da radiação.

Tipo de radiação ou partícula	Fator de ponderação da radiação
Fotões, elétrões, muões	1
Protões e piões carregados	2
Partículas alfa, fragmentos de fissão ou iões pesados	20
Neutrões com energia inferior a 1 MeV	$w_r = 2,5 + 18,2e^{-[\ln(E_n)]^2/6}$ em que $E_n$ é a energia do neutrão
Neutrões com energias compreendidas entre 1 a 50 MeV	$w_r = 5,0 + 17,0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}$ em que $E_n$ é a energia do neutrão
Neutrões com energia superior a 50 MeV	$w_r = 2,5 + 3,25e^{-[\ln(0,04E_n)]^2/6}$ em que $E_n$ é a energia do neutrão

E a dose efetiva é a soma das doses equivalentes ponderadas em todos os tecidos e órgãos do organismo humano, sejam elas decorrentes de exposição interna ou externa.

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_{T,R} w_T w_R D_{T,R} \quad (2.6)$$

Em que  $w_R$  é o fator de ponderação da radiação ou partícula R e  $D_{T,R}$  é a dose absorvida média no órgão ou tecido T e  $w_T$  é o fator de ponderação tecidular para o órgão ou tecido T.

Os fatores de ponderação tecidular encontram-se igualmente definidos pela publicação nº 103 da ICRP e, na legislação portuguesa, encontram-se definidos na Portaria N.º 137/2019 de 10 de maio e podem ser observados na tabela 3.

Tabela 3 – Fatores de ponderação tecidular.

Tecido ou órgão	$w_T$	$\Sigma w_T$
Medula óssea vermelha, cólon, pulmão, estômago, mama, restantes tecidos	0,12	0,72
Gónadas	0,08	0,08
Bexiga, esófago, fígado, tiroide	0,04	0,16
Superfície óssea, cérebro, glândulas salivares, pele	0,01	0,04
Total (organismo)		1

No SI, tanto a dose efetiva como a dose equivalente são dadas em Sievert (Sv), que equivale a um joule por quilograma ( $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$ ).<sup>[10,15-17]</sup>

## 2.5. Exposição ocupacional e grandezas operacionais

A exposição ocupacional à radiação é a exposição de trabalhadores durante o desempenho das suas funções profissionais, independentemente da situação de exposição verificada.<sup>[5,6,18]</sup>

Esta pode ocorrer como resultado das atividades humanas nos vários setores onde são aplicadas as radiações ionizantes ou como resultado da exposição a fontes naturais.<sup>[18]</sup>

As entidades empregadoras que são também titulares responsáveis por uma prática, atividade ou fonte de radiação, são os responsáveis pela proteção dos trabalhadores contra a exposição ocupacional, devendo assegurar uma otimização da proteção e da segurança adequadas por forma a que não sejam excedidos limites de dose em todas as fases de vida útil dos equipamentos e das instalações, ou seja, desde o seu planeamento até ao seu desmantelamento. Como tal, devem ser previamente identificadas e ser estudada a possibilidade de se adotarem medidas preventivas adicionais que diminuam a sua probabilidade de ocorrência e a magnitude das suas consequências.<sup>[14,18]</sup>

Neste sentido, as doses a que os trabalhadores incorrem devido à exposição externa devem ser alvo de uma avaliação periódica. De um modo geral, os trabalhadores devem ser objeto de monitorização individual adequada, preferencialmente através de dosimetria individual. Nas situações em que não existe controlo por dosimetria individual, a exposição dos trabalhadores pode ser estimada a partir da monitorização do local de trabalho.<sup>[18]</sup>

As grandezas de proteção como a dose equivalente ou a dose efetiva não são diretamente mensuráveis pelo que a sua estimativa deve recorrer às grandezas operacionais, que são o equivalente de dose ambiente, o equivalente de dose direcional e o equivalente de dose individual.<sup>[16]</sup>

A grandeza operacional para a monitorização individual, é o equivalente de dose individual,  $H_p(d)$ , que é o equivalente de dose no tecido mole ICRU, a uma determinada profundidade ( $d$ ) do corpo humano.<sup>[16]</sup>

A ICRU criou uma esfera de referência composta por um material equivalente a tecido mole, a “esfera ICRU”. Esta possui uma massa composta por 76,2% de oxigénio, 11,1% de carbono, 10,1% de hidrogénio e 2,6% de azoto, e uma densidade de  $1 \text{ g.cm}^{-3}$ . É uma esfera de referência no que respeita à sua constituição e ao seu comportamento em termos de dispersão e atenuação dos campos de radiação.<sup>[16]</sup>

A profundidade  $d$  onde se calcula o equivalente de dose individual utilizada para monitorizar a dose efetiva é  $d=10$  mm,  $d=0,07$  mm para monitorizar a dose equivalente na pele e extremidades, e  $d=3$  mm para monitorizar a dose equivalente no cristalino. [16]

A monitorização a partir da medição do  $H_p(10)$  com recurso a um dosímetro individual de leitura indireta é a tipologia mais comum, principalmente quando existe exposição a campos de radiação de fótons  $\gamma$  ou raios X. No entanto, se o profissional puder ser exposto a radiações com fraco poder de penetração como partículas beta ou fótons com energia inferior a 15 keV, a monitorização a realizar deve ser capaz de medir o equivalente de dose individual a uma profundidade de 0,07 mm ( $H_p(0,07)$ ). [6,16,18]

A monitorização dos locais de trabalho recorre ao equivalente de dose ambiente,  $H^*(10)$ , para estimar a dose efetiva. O equivalente de dose ambiente, num ponto do campo de radiação, é o equivalente de dose que seria produzido pelo campo alinhado na “esfera ICRU” a uma profundidade de 10 mm num raio oposto à direção do campo alinhado. A unidade de equivalente de dose ambiente é o Sievert (Sv). [16]

O equivalente de dose direcional,  $H'(d,\Omega)$ , é a grandeza operacional utilizada para estimar a dose na pele, extremidades e no cristalino. O equivalente de dose direcional, num ponto do campo de radiação, é o equivalente de dose que seria produzido pelo campo expandido correspondente na esfera ICRU a uma profundidade,  $d$  (em mm), num raio numa direção específica,  $\Omega$ . A unidade de equivalente de dose direcional é o Sievert (Sv). Para monitorização da dose na pele e extremidades utiliza-se  $d=0,07$  mm e  $d=3$  mm para o cristalino. [16]

As grandezas operacionais para monitorização da exposição externa encontram-se resumidas na tabela 4, adaptada a partir da Portaria N.º 137/219. [16]

Tabela 4 – Grandezas operacionais para monitorização da exposição externa.

	Monitorização de área	Monitorização individual
<b>Estimativa da dose efetiva</b>	Equivalente de dose ambiente $H^*(10)$	Equivalente de dose individual $H_p(10)$
<b>Estimativa das doses na pele, mãos, pulsos e pés</b>	Equivalente de dose direcional $H(0,07,\Omega)$	Equivalente de dose individual $H_p(0,07)$
<b>Estimativa da dose no cristalino</b>	Equivalente de dose direcional $H(3,\Omega)$	Equivalente de dose individual $H_p(3)$

A proteção operacional dos trabalhadores tem por base uma avaliação prévia que identifica os cenários e magnitude das exposições ocupacionais, tanto em condições normais de operação da instalação, mas também perante cenários que podem potenciar a ocorrência de exposições potenciais. [19]

## 2.6. Controlo regulador

As práticas que envolvam a utilização de radiações ionizantes estão sujeitas a controlo regulador, podendo este ser por mera comunicação prévia ou controlo administrativo prévio, através de registo ou licença.

Considerando as práticas sujeitas a controlo administrativo prévio como o licenciamento, estas só podem ser iniciadas quando for demonstrada a existência de medidas de segurança adequadas no local onde a mesma se realiza à autoridade competente ou órgão regulador. <sup>[3]</sup>

De acordo com o Artigo 22.º do Decreto-Lei N.º 108/2018, que fixa as normas de segurança de base relativas à proteção contra os perigos resultantes da exposição a radiações ionizantes, é obrigatório o licenciamento das seguintes práticas:

- Operação de geradores de radiações ionizantes, aceleradores ou fontes radioativas para fins de médicos e não médicos (com exceção dos equipamentos de medicina dentária intraoral, de ortopantomografia e densitometria óssea);
- Operação de geradores de radiações ionizantes ou aceleradores, com exceção de microscópios eletrónicos, que operem a diferença de potencial inferior 30 quilovolts (kV) ou seja um aparelho de tipo aprovado pela APA e que em condições normais de funcionamento não origine débitos de dose superiores a  $1 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  a 0,1 m de qualquer superfície acessível do mesmo;
- Práticas que envolvam fontes radioativas seladas;
- Práticas que libertem material radioativo nos efluentes gasosos ou líquidos e que possam resultar numa dose efetiva anual para o público superior a 0,3 mSv;
- Adição de substâncias radioativas no processo de fabrico de produtos;
- Administração de substâncias com radionuclídeos a pacientes ou animais;
- Gestão de combustível irradiado e de resíduos radioativos;
- Qualquer prática envolvida em qualquer fase de vida de uma instalação nuclear ou de minas de urânio;
- Importação, exportação e introdução em território nacional de fontes de radiação. <sup>[5,22]</sup>

## 2.7. Avaliação prévia de segurança

O titular, o responsável por uma prática ou fonte de radiação, deve apresentar uma avaliação prévia de segurança no requerimento do pedido de licenciamento de uma prática. <sup>[2, 3, 5, 14]</sup>

As avaliações de segurança devem ser um processo sistemático realizado durante a vida útil de uma instalação ou prática, e que procede à avaliação das disposições de segurança existentes, desde o seu planeamento ao seu desmantelamento. Estas avaliações têm como objetivos:

- Aferir o cumprimento de todos os requisitos e recomendações em matéria de proteção radiológica de acordo com as características de conceção e operação das fontes e ainda o design e construção da instalação;
- Avaliar a qualidade e extensão de medidas de segurança existentes e identificar medidas adicionais que devem ser implementadas;
- Quantificar, na medida do possível, os impactos radiológicos através da identificação dos cenários de exposição normal e potencial e respetivas doses potencialmente envolvidas. [2,3,14,20,23]

A avaliação prévia de segurança é a principal ferramenta para determinar as medidas de proteção que devem ser implementadas e definir as condições normais e máximas, dentro do que é aceitável, da prática em causa. As subseqüentes avaliações confirmam se as condições iniciais descritas se mantêm e indicam, quando necessário, a alteração ou adoção de novas medidas em função das condições de funcionamento verificadas e das eventuais situações de exposição. [14] Sendo a avaliação de segurança um processo sistemático, pressupõe a revisão e realização de avaliações periódicas ou sempre que se alterem condições previstas na licença da prática. [23]

De acordo com as informações existentes no site da autoridade competente, a APA, o documento de avaliação prévia de segurança deve tecer diversas apreciações críticas que evidenciem a adoção dos requisitos legais e de segurança aplicáveis, bem como da regulamentação e demais orientações da APA e deve seguir a seguinte estrutura: [20]

1. Sumário executivo;
2. Introdução, onde se descreva a prática a realizar, a instalação e demais equipamentos associados;
3. Resultados dos testes de aceitação das fontes de radiação;
4. Descrição dos cenários de exposição ocupacional e de membros do público em condições normais de operação da instalação e estimativa das referidas exposições. Caso a prática inclua descargas autorizadas, incluir as várias vias de exposição possíveis;
5. Descrição dos cenários de exposição potencial;
6. Estimativa, na medida do possível, da probabilidade de ocorrência de exposições potenciais e a respetiva magnitude para cada cenário descrito na alínea anterior;
7. Avaliação da qualidade e da extensão das disposições de proteção e segurança, incluindo os aspetos de engenharia e os procedimentos administrativos, nomeadamente no que respeita à organização interna do titular, procedimentos administrativos internos ligados com a segurança, formação e qualificação dos profissionais afetos às práticas, número de recursos humanos existentes face às necessidades da instalação, programa de vigilância médica dos trabalhadores expostos, plano de recursos financeiros, adequação dos equipamentos de proteção individual existentes, equipamentos de deteção de radiação existentes e monitorização dos trabalhadores;
8. Definição dos limites operacionais e das condições de operação, incluindo o estudo de blindagens para cada fonte de radiação, determinação da carga de trabalho máxima de cada

fonte de radiação, resultados da verificação da eficácia das blindagens, a classificação de zonas implementada e respetiva sinalização e controlo de acessos caso aplicável, apreciação crítica acerca do programa de garantia da qualidade, e aferição da proteção existente contra qualquer exposição ou contaminação radioativa suscetível de ultrapassar o perímetro da instalação, ou contra qualquer contaminação radioativa suscetível de atingir o solo onde se encontra implantada a instalação;

9. Definição dos planos para a descarga de efluentes radioativos, quando aplicável;
10. Descrição das medidas de restrição de acesso e deteção, atraso e resposta à intrusão de membros do público à instalação;
11. Conclusões acerca das disposições de segurança evidenciadas e indicação de eventuais recomendações finais em matéria de proteção e segurança radiológica.
12. Assinatura do autor, devendo este ser uma entidade reconhecida nos termos do Artigo 163.º (2) (a) do Decreto-Lei N.º 108/2018 ou por um especialista em proteção radiológica reconhecido nos termos do Artigo 157.º do referido Decreto-Lei.

Das várias análises e apreciações técnicas solicitadas ao longo da avaliação prévia de segurança, salienta-se a descrição dos cenários de exposição ocupacional e respetivas doses normais e potenciais nos pontos 4, 5 e 6 da referida estrutura. Pretende-se que estes cenários e doses sejam correlacionados com as medidas de segurança existentes que traduzem uma abordagem graduada na mitigação de incidentes na instalação e na minimização da magnitude e probabilidade de exposições potenciais. [18,21]

O levantamento destas exposições pode recorrer aos seguintes métodos:

- Através da monitorização dos locais de trabalho em que são medidos os equivalentes de dose ambiente ou de dose direcional. Este método é principalmente utilizado em instalações cujo normal funcionamento se prevê que se mantenha constante, pelo menos, pelo período de tempo equivalente à validade das licenças concedidas (5 anos). Quando as exposições são estimadas a partir deste método, a monitorização dos locais de trabalho deve ser realizada com periodicidade mínima anual e sempre que as condições de operação das fontes de radiação ou do funcionamento da instalação sejam alteradas;
- Através de bibliografia relevante que refira valores de dose típicos para determinado tipo de fonte ou equipamento. Idealmente, deve-se recorrer a este método para confirmar se é necessária alguma monitorização adicional que não tenha sido previamente identificada como necessária com base nos valores obtidos a partir da monitorização dos locais de trabalho;
- Utilização de simulações computacionais ou realização de cálculos teóricos. Sempre que este método for utilizado e sempre que possível, deve ser realizada uma monitorização de área que ateste os valores obtidos;
- A partir dos resultados de dosimetria individual. Estes resultados devem auxiliar a tomada de decisão acerca da necessidade de os trabalhadores serem monitorizados com recurso a dosimetria individual. [18,21]

Estas estimativas impactam diretamente na classificação dos locais de trabalho e dos profissionais expostos em categorias em função dos riscos existentes e das doses potencialmente incorridas. [5,8]

A Diretiva europeia 2013/59/Euratom reforça esta informação no seu artigo 32.º que indica que a proteção operacional dos trabalhadores expostos tem por base:

- A avaliação prévia de segurança para identificar a natureza e a dimensão do risco radiológico para os trabalhadores expostos e a aplicação da otimização da proteção contra radiações em todas as condições de trabalho;
- A consequente classificação dos locais de trabalho e dos trabalhadores em função de uma avaliação das doses anuais esperadas, bem como da probabilidade e da ordem de grandeza das exposições potenciais;
- A realização de verificações periódicas das condições de proteção e segurança radiológica através da monitorização de áreas e/ou monitorização individual;
- Vigilância médica adequada;
- Formação em proteção e segurança radiológica. [6]

## 2.8. Classificação de profissionais

Os trabalhadores afetos às práticas poderão classificar-se em membros do público, profissionais expostos de categoria B ou ainda profissionais expostos de categoria A. Para cada categoria, encontram-se estipulados limites de dose aplicáveis à soma das exposições ocupacionais anuais resultantes de todas as práticas autorizadas e ainda outras exigências do ponto de vista de monitorização, vigilância médica e formação que são proporcionais ao risco incorrido. [5,24]

O limite anual de dose efetiva para membros do público é de 1 mSv e os limites anuais de dose equivalente para o cristalino é de 15 mSv e de 50 mSv para a pele, aplicando-se este limite à dose média numa superfície de 1 cm<sup>2</sup> de pele, independentemente da superfície exposta. [5,24]

O limite anual de dose efetiva para os trabalhadores expostos de categoria B é de 6 mSv. Os limites anuais de dose equivalente são de: 15 mSv para o cristalino e 150 mSv para a pele e extremidades. [5,24]

O limite anual de dose efetiva para os trabalhadores expostos de categoria A é de 20 mSv, sendo que a autoridade competente pode autorizar uma dose efetiva de 50 mSv num ano, desde que a dose média anual ao longo dos cinco anos consecutivos a partir do ano em que o limite foi excedido, não exceda os 20 mSv. O limite de dose equivalente para o cristalino é de 20 mSv/ano ou de 100 mSv em cinco anos consecutivos desde que a dose máxima num ano não ultrapasse 50 mSv. O limite anual de dose equivalente para a pele e extremidades é de 500 mSv, considerando a dose média numa superfície de 1 cm<sup>2</sup> de pele, independentemente da superfície exposta. [5,24]



Assim, estas classificações têm por base a suscetibilidade de um profissional receber doses de acordo com a seguinte tabela:

*Tabela 5 – Doses suscetíveis de serem recebidas por um profissional e respetiva categorização.*

<b>Categoria profissional</b>	<b>Doses suscetíveis</b>
<b>Membro do público</b>	$E \leq 1 \text{ mSv/ano}$ $H_{\text{pele}} \leq 50 \text{ mSv/ano}$ $H_{\text{cristalino}} \leq 15 \text{ mSv/ano}$
<b>Categoria B</b>	$1 \text{ mSv/ano} < E \leq 6 \text{ mSv/ano}$ $50 \text{ mSv/ano} < H_{\text{pele e extremidades}} \leq 150 \text{ mSv/ano}$ $H_{\text{cristalino}} \leq 15 \text{ mSv/ano}$
<b>Categoria A</b>	$6 \text{ mSv/ano} < E \leq 20 \text{ mSv/ano}$ $150 \text{ mSv/ano} < H_{\text{pele e extremidades}} \leq 500 \text{ mSv/ano}$ $15 \text{ mSv/ano} < H_{\text{cristalino}} < 20 \text{ mSv/ano}$

Nos casos em que uma trabalhadora exposta engravida, deverá ser concedida ao nascituro uma proteção equivalente à dispensada a qualquer membro do público em geral. As condições de trabalho devem assegurar que a dose a que o nascituro pode incorrer não excedem uma dose de 1 mSv durante o resto do período de gravidez. [5]

Por último, nos termos do artigo 66.º do Decreto-Lei N.º 108/2018, as pessoas com menos de 18 anos de idade não podem ser afetadas a qualquer trabalho que as coloque na categoria de trabalhadores expostos, podendo apenas ser identificados aprendizes e estudantes com idades entre 16 e 18 anos cujos limites de dose a aplicar são equivalentes aos dos trabalhadores expostos de categoria B. [5]

Estas classificações são importantes para aferir o tipo e periodicidade da monitorização dos trabalhadores, a frequência do controlo médico e ainda a necessidade de realizarem formação adequada. Neste caso, os trabalhadores de categoria A devem ser sujeitos a um exame médico com periodicidade mínima anual e ser monitorizados por dosimetria individual mensal. Os trabalhadores de categoria B devem ser sujeitos a um exame médico bienal e anual para trabalhadores com idade superior a 50 anos, e ser monitorizados por dosimetria individual com uma periodicidade máxima trimestral. [5,25]

Caso os trabalhadores sejam classificados como trabalhadores expostos, de categoria A ou B, devem realizar formação em proteção radiológica adequada ao tipo de prática e área da mesma, seja ela conducente a um dos níveis de qualificação profissional em proteção radiológica sempre que o trabalhador cumpra os critérios de acesso à formação, ou formação de carácter genérico não conferente de reconhecimento profissional. [19,26]

## 2.9. Classificação de locais de trabalho

Os locais de trabalho são classificados de acordo com o risco de exposição à radiação ionizante em cada zona com base na avaliação de segurança inicial da prática, pelo que devem ter em conta as doses anuais estimadas devido à exposição normal, mas também à probabilidade e magnitude das exposições potenciais. [8,20]

O titular deve tomar medidas de proteção radiológica em todos os locais de trabalho, que sejam adequadas à natureza das instalações e das fontes de radiação presentes, bem como à dimensão e natureza dos riscos associados à exposição ocupacional. A classificação dos locais de trabalho é revista sempre que haja uma verificação das condições de proteção e segurança radiológica, com periodicidade mínima anual. [5]

As áreas onde operam fontes de radiação devem ter supervisão, sinalização e, se necessário, controlo de acessos de acordo com a devida classificação. [5,18,20]

Os locais de trabalho classificam-se como zonas vigiadas ou controladas.

As zonas vigiadas são aquelas suscetíveis de expor os trabalhadores a doses efetivas superiores a 1 mSv/ano mas inferiores a 6 mSv/ano ou a doses equivalentes superiores a 15 mSv/ano para o cristalino e 50 mSv/ano para a pele e extremidades mas inferiores a 20 mSv/ano e 500 mSv/ano, respetivamente.

Por sua vez, definem-se como zonas controladas as áreas em que, por virtude das condições de trabalho existentes, seja provável que a exposição a que os trabalhadores estão sujeitos anualmente possa ultrapassar doses efetivas superiores a 6 mSv ou uma dose equivalente superior a 3/10 dos limites de dose fixados para o cristalino, para a pele e para as extremidades dos membros de trabalhadores expostos. [5,18,20]

Às zonas controladas aplicam-se as seguintes disposições:

- Estas áreas devem apresentar delimitações físicas e proceder a um controlo de acessos a indivíduos que tenham recebido instruções de trabalho e de segurança adequadas;
- Nos casos em que existe um risco significativo de dispersão de contaminação radioativa na zona controlada, as áreas adjacentes devem ter um controlo através de monitorização radiológica dos indivíduos e de materiais;
- Deve ser realizada a monitorização de área, sempre que necessário, em função dos riscos radiológicos presentes;
- Se a prática realizada na zona controlada exigir a manipulação de fontes radioativas não seladas, deve ser realizada uma monitorização frequente da atividade no ar e nas superfícies;
- Os resultados das monitorizações de área devem ser registados e considerados nas estimadas das doses recebidas pelos trabalhadores;

- Os trabalhadores que desempenham funções nestas áreas devem realizar formação adequada às práticas e riscos radiológicos existentes;
- Deve ser concedido equipamento de monitorização e proteção individual adequado os trabalhadores que desempenham funções nestas zonas;
- Tendo em conta a natureza e a magnitude dos riscos radiológicos nas áreas referidas, o controlo radiológico do local de trabalho será organizado nos termos do ponto 2 da secção 3 deste documento;
- Estas áreas devem possuir sinalização indicativa do tipo de zona, da natureza das fontes e dos riscos que lhe são inerentes;
- O titular deve evidenciar instruções de trabalho adequados às fontes de radiação existentes e às exposições ocupacionais consideradas. [5,20]

Às zonas vigiadas aplicam-se as seguintes disposições:

- Estas áreas devem ser mantidas sob vigilância, existindo a possibilidade de não terem de ser adotadas medidas específicas de proteção e segurança;
- A revisão da classificação de zona pode ter por base a monitorização dosimétrica individual ou de área;
- Deve ser afixada uma sinalização indicativa do tipo de zona, da natureza das fontes e dos riscos que lhe são inerentes;
- O titular deve evidenciar instruções de trabalho adequados às fontes de radiação existentes e às exposições ocupacionais consideradas. [5,20]

## 2.10. Aplicações industriais

São amplamente conhecidos os benefícios das aplicações das radiações ionizantes na saúde no diagnóstico e tratamento de inúmeras patologias, no setor da produção de energia nuclear, na agroindústria no prolongamento do tempo de prateleira dos produtos por irradiação, na dessalinização de água e aquecimento, entre outras.

Em contexto industrial, as radiações ionizantes apresentam um papel relevante, principalmente, no controlo de processos industriais, controlo de qualidade de produtos fabricados, realização de ensaios não destrutivos e esterilização por irradiação. [24,27]

A radiografia industrial permite a realização de ensaios não destrutivos recorrendo a fontes radioativas seladas ou a geradores de radiações ionizantes para produzir registos radiográficos a peças, objetos ou componentes a fim de verificar a sua qualidade ou estado, e ainda de identificar defeitos, sem que seja provocada qualquer alteração física ao objeto estudado. [27,28]

Em gamagrafia industrial são tipicamente utilizadas fontes como  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , entre outras, e quanto aos geradores de raios X, estes podem ser utilizados em salas devidamente blindadas para o efeito ou para análise de peças de menores dimensões, em equipamentos autoblandados. A fonte a utilizar é seleccionada em função do material a radiografar. A gamagrafia e a radiologia industrial são técnicas frequentemente utilizadas em tubagens, soldaduras e peças de aviões, enquanto os geradores de raios X autoblandados ou em cabine são utilizados para radiografar peças de menores dimensões, como bagagens, componentes automóveis e eletrónicos, para sua inspeção ou identificação de corpos estranhos. [27,29,30]

Estes ensaios permitem a aquisição de imagens planares (figura 1) ou tomográficas (figura 2).

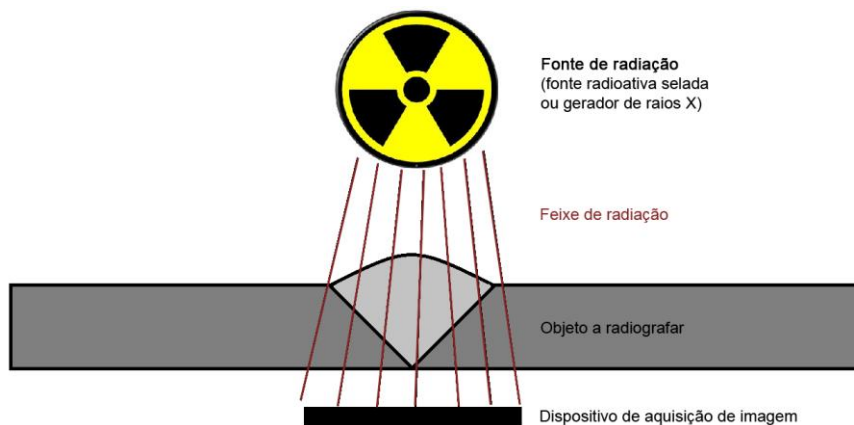


Figura 1 – Princípio de funcionamento de aquisição de imagem planar.

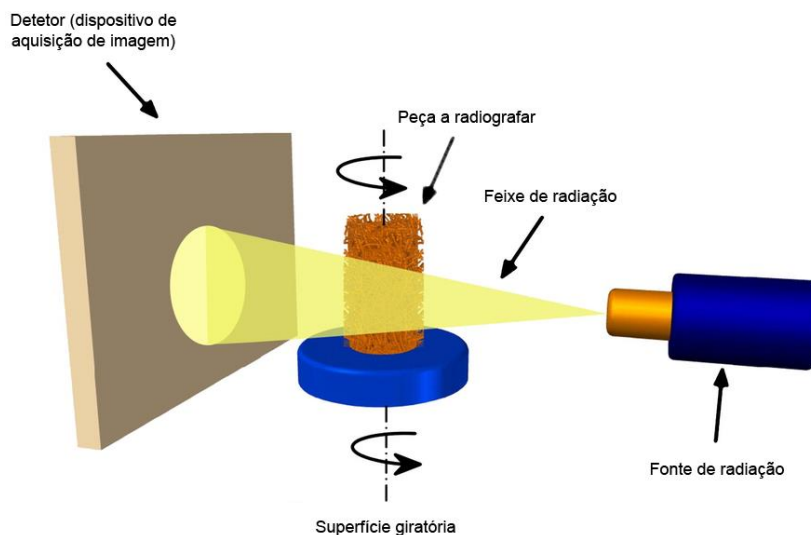


Figura 2 – Princípio de funcionamento de aquisição de imagens tomográficas.

Em contexto industrial, os raios X são ainda utilizados para inspeção do nível de enchimento de embalagens (figura 3) e para análise elementar de uma amostra, através da técnica de fluorescência por raios X (XRF) (figura 4) que pressupõe a irradiação de um material, provocando a ionização das

camadas mais internas da sua nuvem eletrônica dos seus átomos constituintes. O preenchimento das lacunas geradas por elétrons periféricos gera raios X característicos dos elementos presentes na amostra. [27,30]

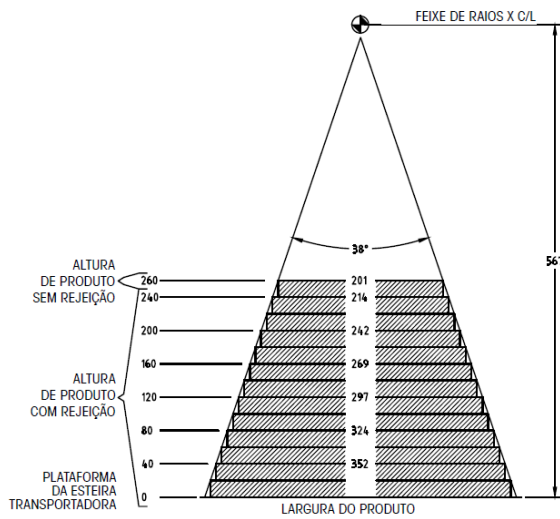


Figura 3 – Princípio de funcionamento da inspeção de nível com geradores de radiações ionizantes.

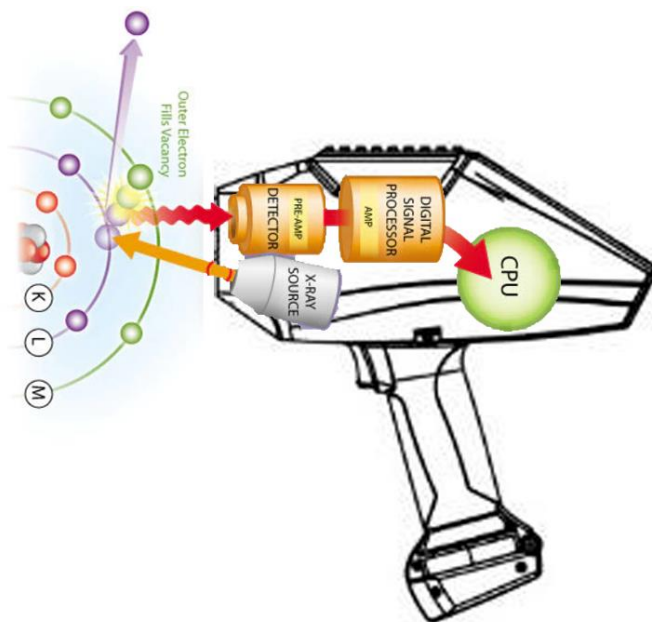


Figura 4 – Princípio de funcionamento da fluorescência por raios X.

As fontes radioativas seladas são amplamente utilizadas para controlo de vários processos de produção através da medição de nível, espessura, densidade e humidade, sendo incorporadas em equipamentos designados medidores nucleares. Estas medições têm por base a interação da radiação com o material a ser estudado e permite novamente que, recorrendo a uma fonte e a um sistema de deteção da radiação, sejam efetuadas medições de forma não destrutiva. [27]

Os medidores de nível são geralmente utilizados para aferir o nível de enchimento de silos, tubagens ou embalagens. Esta prática é comum em siderurgias, indústrias papeleiras e alimentares. O seu princípio de funcionamento assenta em fazer passar o produto a analisar entre a fonte e o detetor. Quando o produto a analisar atinge o nível onde se encontra a fonte, o sinal recebido pelo detetor diminui (figura 5). Neste processo são frequentemente utilizadas fontes de  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  e  $^{60}\text{Co}$  devido às suas emissões γ mais penetrantes nos materiais. [27,29]

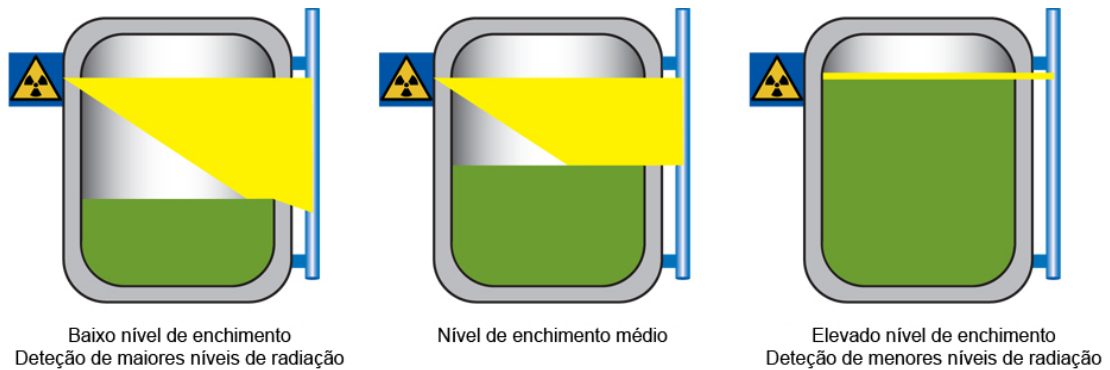


Figura 5 – Princípio de funcionamento típico dos medidores nucleares de nível.

A medição de espessuras é importante para aferir a uniformidade da espessura do material produzido. São habitualmente utilizadas fontes emissoras de partículas β como o  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  ou  $^{147}\text{Pm}$  para analisar a espessura de materiais como papel, plástico, têxteis, alumínio, entre outros. [27,29]

As fontes radioativas seladas são ainda empregues para medição de densidade e humidade de solos e pavimentos. Os equipamentos utilizados nesta aplicação são designados gamadensímetros e incorporam 2 fontes radioativas distintas, uma fonte de  $^{137}\text{Cs}$  para medição de densidade através da deteção dos fotões γ e uma fonte de  $^{241}\text{Am}:\text{Be}$  para medição do teor em humidade através da deteção dos neutrões emitidos (figura 6).

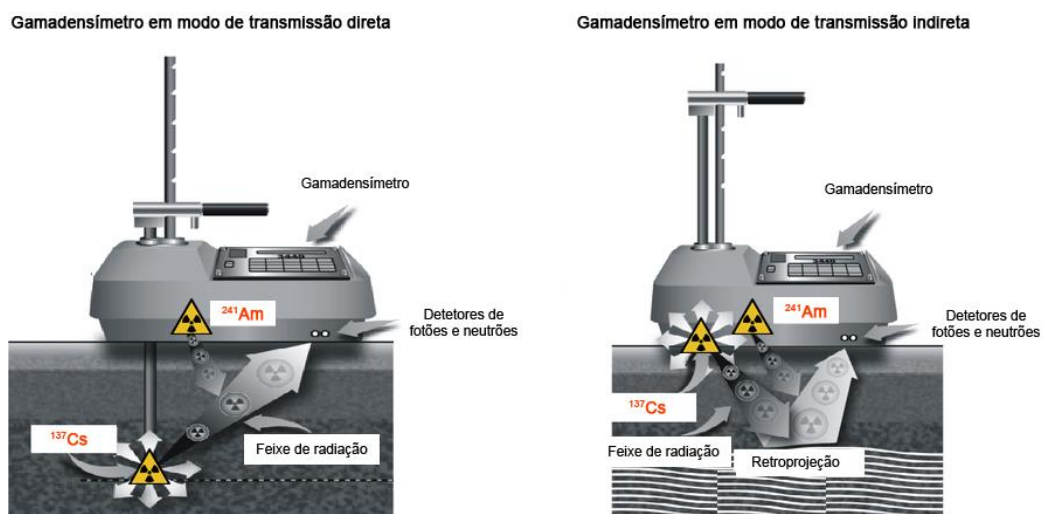


Figura 6 – Princípio de funcionamento típico de um gamadensímetro.

Por último, os cromatógrafos gasosos com detetores de captura de eletrões (ECD) são utilizados para a realização de técnicas analíticas que permitem determinar a composição e consistência de produtos químicos, farmacêuticos, alimentares, por forma a assegurar que os mesmos cumprem com as especificações de fabrico e, por conseguinte, garantem a conformidade do produto final. O cromatógrafo gasoso utiliza uma folha de  $^{63}\text{Ni}$ , um emissor  $\beta^-$ , que ioniza o gás que transporta a amostra analisada. As ionizações produzidas originam eletrões que, acelerados em direção a um ânodo, geram uma corrente até ao detetor de captura de eletrões. Quando as moléculas eluídas são eletronegativas, capturam alguns desses eletrões, diminuindo a corrente produzida e gerando um sinal proporcional à sua concentração na amostra (figura 7). [31,32]

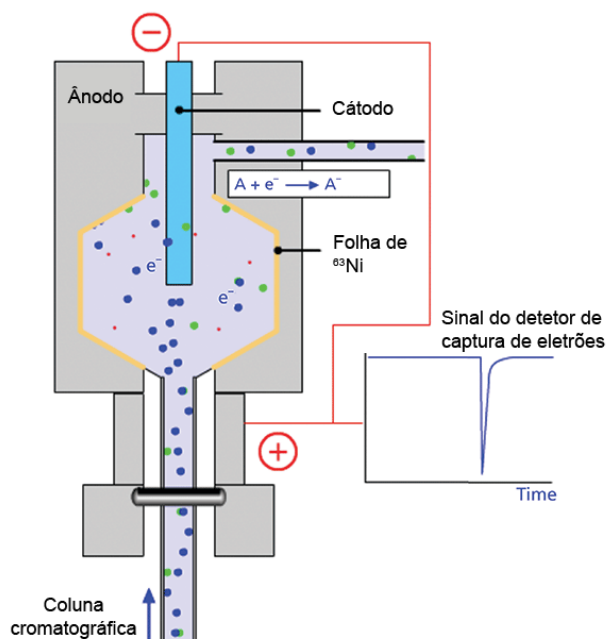


Figura 7 – Princípio de funcionamento típico de um detetor de captura de eletrões.

Os fabricantes de qualquer fonte de radiação devem assegurar que estas possuem características de conceção que as tornam intrinsecamente seguras, garantindo a sua integridade durante a operação e transporte das mesmas. Isto é geralmente assegurado através do seu fabrico em conformidade com normas internacionais que estipulam critérios de conceção no que toca ao encapsulamento das fontes radioativas, às blindagens inerentes aos equipamentos que incorporam fontes radioativas ou geradores de radiação e ainda ao seu desempenho. [21]

A maioria das fontes radioativas seladas encontram-se num contentor que permite o seu transporte. Este contentor costuma possuir um obturador ou, no caso dos gamadensímetros, um bloco deslizante de tungsténio que permite a ascensão da haste que possui a fonte de  $^{137}\text{Cs}$ , para permitir o acesso ao feixe útil de radiação em condições normais de operação e a blindagem do mesmo em situações de manutenção ou transporte. As fontes radioativas seladas costumam encontrar-se sob a forma especial. Uma fonte encapsulada sob a forma especial possui um desenho e fabrico mais

rigoroso, que resiste a condições extremas de temperatura e choque mecânico e impede a dispersão do material radioativo perante cenários acidentais. <sup>[21,32]</sup>

Adicionalmente, os fabricantes atribuem um período de vida recomendado a cada fonte, período durante o qual se prevê que as fontes mantenham a sua integridade e hermeticidade. Fimdo este período as fontes devem ser alvo de inspeções com maior frequência e a autoridade competente pode permitir a continuação da sua utilização desde que atestada a sua integridade. <sup>[21]</sup>

Os geradores de radiações ionizantes devem ser igualmente concebidos de acordo com normas e padrões nacionais e internacionais. Estas fontes apresentam a vantagem de não representarem riscos radiológicos se não se encontrarem energizados. Em condições normais de funcionamento, estes equipamentos apresentam várias disposições de segurança como:

- Blindagem inerente à ampola de raios X;
- Controlos de acesso e utilização dos equipamentos como chaves de segurança ou de acesso ao sistema operativo que coloca o equipamento em funcionamento, impedindo a sua utilização por indivíduos não autorizados;
- Sinalização adequada para avisar que o equipamento se encontra em funcionamento e existe feixe de radiação a ser emitido. Esta sinalização pode ser luminosa ou sonora;
- Encravamentos de segurança mecânicos (*interlock*) nas portas ou outras estruturas de acesso ao feixe útil, quando existentes. <sup>[21]</sup>

Qualquer fonte de radiação deve estar devidamente sinalizada para avisar as pessoas do perigo de radiações.

## 2.11. Exposições potenciais em contexto industrial

As avaliações prévias de segurança permitem que os órgãos reguladores determinem quais as práticas, fontes e atividades que representam maior risco radiológico, ou seja, os que apresentam maior probabilidade e severidade das exposições potenciais. É então importante identificar as práticas de maior risco para, conseqüentemente, identificar as que exigem maior atenção do ponto de vista de revisão do processo de licenciamento, concessão de licença e, eventualmente, em que situações é importante solicitar informação ou documentação adicional por forma a assegurar que a instalação está dotada de procedimentos de segurança e instruções de trabalho adequadas aos riscos existentes. <sup>[21]</sup>

Com base no descrito na literatura, os cenários potenciais podem ser principalmente causados por falhas nos equipamentos ou, como na grande maioria dos casos, devido a erros humanos. <sup>[21]</sup>

A ausência de formação ou formação insuficiente e falha no seguimento de procedimentos de segurança da instalação e da operação dos equipamentos são os principais responsáveis pelo desencadeamento de cenários acidentais com conseqüente sobre-exposição de indivíduos. <sup>[21]</sup>



Posto isto, deve ser dado particular ênfase aos cenários decorrentes de erros humanos e as suas respetivas consequências nas avaliações de segurança das práticas. [21]

A IAEA desenvolveu um sistema de categorização das fontes radioativas afetas às práticas mais comuns, com base no risco radiológico associado às mesmas, em que a categoria 1 refere-se às fontes ou práticas com risco superior e a categoria 5 inclui as que representam menor risco. Considerando as práticas anteriormente descritas, as fontes radioativas utilizadas em gamagrafia industrial encontram-se na categoria 2, os medidores nucleares incluem-se categorias 3 e 4 dependendo da sua atividade, e os cromatógrafos gasosos com ECD na categoria 5. [21]

Segundo a IAEA, esta categorização permite distinguir o nível de exigência de uma avaliação de segurança, sendo que o nível de detalhe e rigor de uma avaliação de segurança deve ser proporcional ao potencial risco radiológico envolvido no normal funcionamento da instalação. Assim, as avaliações de segurança de práticas que envolvem as fontes radioativas incluídas nas categorias 4 e 5 devem ser diretas e podem incluir informações genéricas dos fabricantes acerca das doses envolvidas e as medidas de segurança inerentes ao equipamento. Adicionalmente, devem-se considerar características da própria instalação como a acessibilidade das mesmas, blindagens adicionais, frequência da sua utilização e procedimentos de segurança internos que minimizem as exposições. [21]

Quanto aos geradores de raios X, ainda não foi disponibilizado um método de categorização dos mesmos em função do seu risco. É referido que o principal cenário potencial a considerar numa avaliação de segurança desta prática é o de utilização não autorizada ou sem supervisão, pelo que, geralmente poderão seguir o tipo de avaliação a que as fontes radioativas de categorias 4 ou 5 são submetidas. Por outro lado, estes equipamentos apresentam uma crescente utilização de códigos de acesso ao *software* de operação do equipamento, chaves e encravamentos de segurança que minimizam a probabilidade dos incidentes. [21]

Salvaguarda-se que a gama de corrente e tensão aplicadas à ampola de um gerador de radiações ionizantes é vasta, como consequência da ampla diversidade de materiais analisados, pelo que as exposições potenciais a considerar devem ser proporcionais ao equipamento em causa, às suas condições de operação e ao risco inerente. [21]

Considera-se que as práticas que incluem fontes de categorias 1, 2, 3 e aceleradores de partículas até dezenas de MeV podem resultar em exposições potenciais de elevada magnitude com consequências graves para a saúde dos indivíduos sobre-expostos, pelo que as avaliações de segurança nesses casos já devem incluir uma análise probabilística de segurança (PSA) mais aprofundada sobre os potenciais cenários de falha dos equipamentos, estruturas e indivíduos envolvidos. [21]

A PSA identifica todos os fatores que contribuem para o risco radiológico da prática em causa, e avalia se o design e planeamento da instalação ou prática é adequado à mesma, atendendo aos critérios de segurança probabilísticos. Isto é, a PSA tem em conta diversos cenários que podem

possivelmente resultar numa exposição acidental ou que não decorra como planeado, permitindo uma quantificação do risco para cada prática com base em probabilidades reais, documentadas ou obtidas por meio de *softwares* de análise de risco. [2,34]

#### **2.11.1. Prática que envolve fontes radioativas seladas**

Na identificação de cenários potenciais, foram consideradas fontes radioativas seladas incorporadas em medidores nucleares, em cromatógrafos gasosos ou gamadensímetros.

As fontes envolvidas nestas práticas encontram-se alojadas em equipamentos concebidos de forma a conferirem blindagem significativa à fonte e também para que não tenham de ser constantemente operados por trabalhadores, reduzindo a sua exposição a radiação.

Não obstante, é recomendado que os trabalhadores envolvidos nas ações de operação e manutenção dos equipamentos e para os quais se estimam doses superiores aos limites de dose para membros do público, realizem formação e treino adequados, por forma a conhecerem os riscos envolvidos, a promoverem um controlo e segurança das fontes e para que sejam sensibilizados a adotar medidas de proteção adicionais como a diminuição do tempo de exposição e aumento da distância à fonte sempre que aplicável. [35]

Foram identificados os seguintes cenários potenciais:

1. Falha no seguimento dos protocolos de segurança, o que pode resultar, por exemplo, numa aproximação ou exposição ao feixe útil sem que o obturador tenha sido fechado; [35,37]
2. Incêndio, explosão, inundações, sismos; [21,35]
3. Queda, choques mecânicos ou esmagamento com possível desalojamento da fonte radioativa do equipamento portador da mesma, fuga radioativa ou originando alterações na blindagem do equipamento aumentando a radiação de fuga; [35-40]
4. Encravamento do obturador da haste que incorpora a fonte de  $^{137}\text{Cs}$  num gamadensímetro ou como resultado de choques físicos, ferrugem ou ausência de limpeza; [36,37,39]
5. Perda ou furto; [37,40]
6. Uso da fonte além do seu tempo de vida útil recomendado com potencial perda de encapsulamento da fonte. [21]

#### **2.11.2. Prática de operação de geradores de radiações ionizantes**

Consideraram-se fontes como os geradores de raios X em cabine, espectrómetros de XRF, inspetores de nível e de corpos estranhos.

Estes equipamentos têm em comum o facto de, de acordo com a IAEA, apresentarem isenção de controlo regulador nalguns países membro uma vez que geralmente apresentam características de conceção, blindagem e disposições de segurança para que possam ser operados por membros do

público, não se prevendo que sejam responsáveis pela exposição de um operador além de 1 mSv/ano. [30]

Foram identificados os seguintes cenários potenciais:

- Utilização indevida, por exemplo, em situações de manutenção na proximidade do feixe; [42]
- Falha no seguimento de protocolos de segurança, resultando na exposição de uma extremidade ao feixe direto quando acessível ou exposição na zona de entrada de produto e de maior proximidade ao feixe; [30]
- Alterações na blindagem do equipamento, aumentando a radiação de fuga em virtude de choques mecânicos, sismo, incêndio, explosão. [21]
- Falha de um *interlock* de segurança que impede o acesso ao feixe direto quando este se encontra em emissão;
- Falha de um alarme sonoro ou luminoso de emissão do feixe;
- Perda ou furto. [41]

### **2.11.3. Resultados do sistema de registo e análise de incidentes australiano**

A autoridade competente australiana – *Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency* (ARPANSA) possui um sistema de registo de incidentes envolvendo práticas radiológicas e divulga anualmente relatórios com os resultados e análise dos incidentes ocorridos por tipo de prática.

Dos achados divulgados desde 2004, salientam-se como cenários mais frequentemente identificados os seguintes:

- Roubo de fontes de radiação aquando do seu transporte (XRF e gamadensímetros);
- Esmagamento de gamadensímetros em obra;
- Desalojamento da fonte de  $^{241}\text{Am}:\text{Be}$  de um gamadensímetro;
- Exposição inadvertida de um indivíduo num inspetor por raios X através da abertura de entrada de produto;
- Exposição de trabalhadores após entrarem em reservatórios que continham medidores nucleares (com fontes de  $^{60}\text{Co}$  e  $^{137}\text{Cs}$ ), cujo obturador não tinha sido previamente fechado;
- Encravamento do obturador de medidores nucleares. [38,40-48]

Em todos os relatórios divulgados entre 2012 e 2019, o erro humano foi sempre identificado como a principal causa de incidentes, resultem eles em sobre-exposições ou não, tendo a fração de incidentes devido a erro humano variado entre 61 % a 75 %. [40-48]

A ARPANSA divulga ainda as principais medidas corretivas implementadas para que possam ser adotadas como medidas preventivas por outros titulares, sendo as mais relevantes o reforço das boas práticas de operação dos equipamentos, realização de formação e treino adicionais e adequados,

melhorias nos procedimentos internos de segurança e melhorias dos equipamentos envolvidos na prática.

### **3. Metodologia**

O presente trabalho foi desenvolvido no Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ), na Unidade Técnica de Proteção Radiológica, pertencente ao Departamento de Ambiente e Segurança e teve como objetivo aferir a influência da estimativa das exposições potenciais na classificação final de profissionais e de locais de trabalho em práticas não-médicas realizadas em contexto industrial.

Para tal, foram consideradas práticas que envolvem fontes radioativas seladas de categorias 4 e 5 e geradores de radiações ionizantes e excluídas práticas com fontes não seladas e descargas autorizadas.

As etapas do trabalho desenvolvido consistiram numa classificação inicial dos trabalhadores afetos a cada fonte e dos locais de trabalho onde cada uma opera, com base na estimativa das exposições ocupacionais normais. Seguidamente, considerou-se a contribuição das exposições potenciais decorrentes dos cenários potenciais identificados, na classificação final dos trabalhadores e dos locais de trabalho.

#### **3.1. Amostra**

O estudo incidiu sobre 92 fontes de radiação utilizadas em várias indústrias de plásticos, de construção, papelreira, siderúrgica, alimentar, automóvel, entre outras.

Destas 92, 56 dizem respeito a equipamento que incorporam fontes radioativas seladas e 36 são geradores de radiações ionizantes.

Das 56 fontes radioativas seladas, 4 delas são gamadensímetros, 5 são cromatógrafos gasosos com detetores de captura de eletrões e as restantes 47 dizem respeito a medidores nucleares fixos de nível, espessura e densidade.

Dos 36 geradores de radiações ionizantes, 10 são espectrómetros de XRF, 5 são inspetores de corpos estranhos, 15 são inspetores de nível e os restantes 6 efetuam radiografia ou tomografia industrial em cabine.

Na tabela 6 e na figura 8 encontra-se uma descrição mais pormenorizada das fontes consideradas.

Tabela 6 – Número e tipo de equipamentos existentes na amostra considerada.

Tipo de fonte de radiação	Quantidade
<b>Fontes radioativas seladas</b>	
Gamadensímetro ( $^{137}\text{Cs}$ e $^{241}\text{Am:Be}$ )	4
Medidor de nível ( $^{241}\text{Am}$ )	5
Medidor de nível ( $^{60}\text{Co}$ )	6
Medidor de densidade ou de nível ( $^{137}\text{Cs}$ )	28
Medidor de espessura ( $^{85}\text{Kr}$ )	4
Medidor de espessura ( $^{147}\text{Pm}$ )	4
Cromatógrafo gasoso ( $^{63}\text{Ni}$ )	5
<b>Geradores de radiações ionizantes</b>	
Inspetor de nível	15
Inspetor de corpos estranhos	5
XRF, radiografia ou tomografia em cabine	13
XRF portátil	3
<b>Total</b>	<b>92</b>

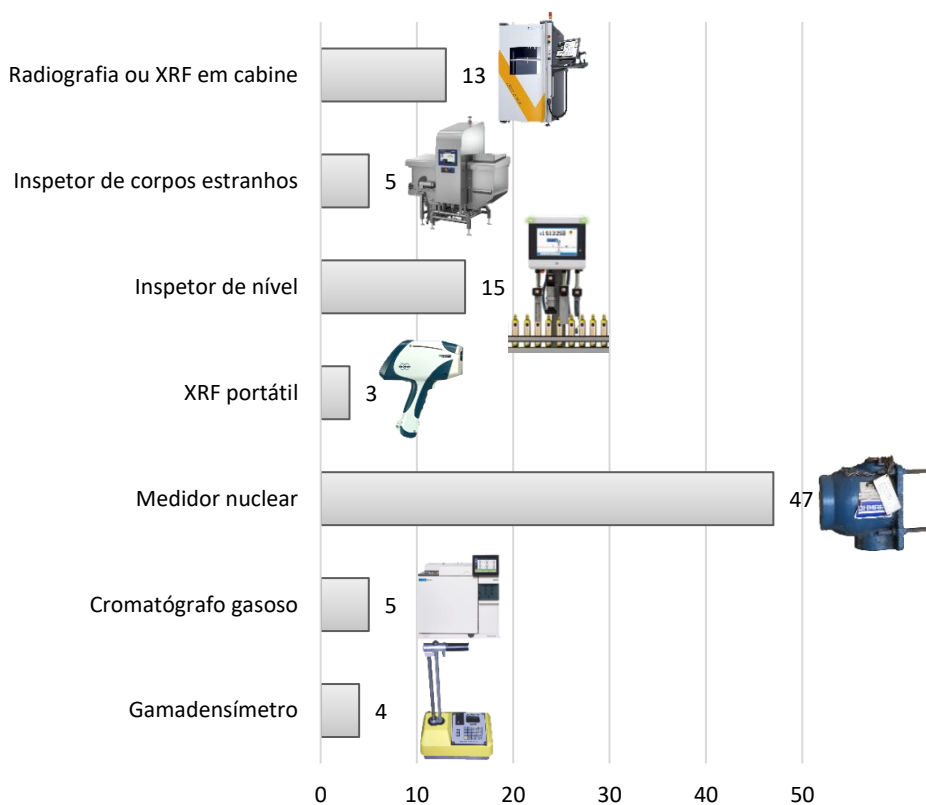


Figura 8 – Descrição da amostra.

## 3.2. Etapas do trabalho

No âmbito da realização das estimativas das exposições ocupacionais previstas na elaboração do documento de avaliação prévia de segurança, foram realizadas estimativas das exposições normais e potenciais, para posterior classificação dos profissionais afetos às práticas em causa e para classificação dos locais de trabalho onde cada fonte opera.

Para dar resposta aos objetivos propostos, definiu-se a seguinte ordem de trabalhos:

1. Identificação dos cenários de exposição ocupacional em condições normais de funcionamento das fontes;
2. Identificação do tempo máximo de permanência dos operadores em cada cenário de exposição normal;
3. Realização de medições nos locais identificados como sendo de normal ocupação e posterior cálculo das doses ocupacionais normais estimadas;
4. Classificação dos profissionais e dos locais de trabalho considerando as estimativas anteriormente realizadas;
5. Identificação dos cenários de exposição potencial em função dos riscos identificados inerentes à fonte, à instalação e associados ao erro humano;
6. Realização de medições ou de cálculos teóricos para estimar as doses envolvidas em cada cenário potencial previamente identificado;
7. Análise dos resultados das exposições normais e potenciais e atribuição de uma classificação final aos trabalhadores e aos locais de trabalho de cada fonte.

Para estimativa das exposições ocupacionais planeadas priorizou-se o método que recorre à monitorização dos locais de trabalho, isto é, em que foram realizadas medições presencialmente e simuladas as situações de normal funcionamento dos equipamentos e ainda situações incidentais, sempre que possível. Nas situações em que não foi possível efetuar medições, por exemplo, no feixe direto ou em situações de desalojamento de uma fonte selada do equipamento que a incorpora, seja por inacessibilidade ou por essa simulação representar uma exposição injustificada, recorreu-se a uma estimativa com base em resultados de bibliografia relevante ou a partir de cálculos teóricos. <sup>[18,21]</sup>

### 3.3. Materiais

Na tabela 7 resume-se a natureza das emissões consideradas na estimativa das exposições externas a cada fonte.

Tabela 7 – Fontes de radiação e respectivas emissões consideradas.

Fonte de radiação	Emissões consideradas para a exposição externa
$^{241}\text{Am}$	Fotões $\gamma$
$^{60}\text{Co}$	Fotões $\gamma$
$^{137}\text{Cs}$	Fotões $\gamma$
$^{147}\text{Pm}$	Partículas $\beta^-$
$^{85}\text{Kr}$	Fotões $\gamma$ e partículas $\beta^-$
$^{241}\text{Am:Be}$	Neutrões
$^{63}\text{Ni}$	Partículas $\beta^-$
Geradores de radiações ionizantes	Raios X

Para cada fonte de radiação, selecionaram-se equipamentos de acordo com a natureza e energia das emissões envolvidas, e ainda com a gama de taxa de dose adequada e esperada decorrente da prática em questão.

Os equipamentos utilizados para cada tipo de fonte considerada encontram-se na tabela seguinte.

Tabela 8 – Equipamentos utilizados na monitorização dos locais de trabalho.

Tipo de radiação	Equipamentos utilizados	Tipo de detetor	Unidade de medida	Gama de energia
Raios X ou fotões $\gamma$	<ul style="list-style-type: none"><li>• Atomtex 1121; ou</li><li>• Atomtex AT1117M</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cintilador plástico;</li><li>• Geiger-Muller</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <math>\dot{H}^*(10)</math></li><li>• <math>\dot{H}^*(10)</math></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 15 keV – 10 MeV</li><li>• 60 keV – 3 MeV</li></ul>
Partículas $\beta^-$	Sonda Atomtex BDPB-01	Cintilador plástico	Partículas.min <sup>-1</sup> .cm <sup>-2</sup>	155 keV – 3,5 MeV
Neutrões	Atomtex BDKN-03	Contador proporcional com $^3\text{He}$ num moderador de polietileno	$\dot{H}^*(10)$	0,025 eV – 14 MeV

### 3.4. Métodos

#### 3.4.1. Estimativa das exposições ocupacionais normais

As doses efetivas decorrentes do normal funcionamento da instalação que envolva geradores de raios X ou de fontes emissoras de partículas gama ou neutrões foram estimadas com base na medição do débito de equivalente de dose ambiente  $\dot{H}^*(10)$  nos locais de ocupação humana mais próximos de cada fonte e os tempos máximos de permanência indicados pelo titular.



$$E = \dot{H}^*(10) \times t \quad (3.1)$$

Em que  $E$  é a dose efetiva em mSv,  $\dot{H}^*(10)$  é o débito de equivalente de dose ambiente em mSv/h e  $t$  o tempo máximo de permanência anual em horas declarado pelo titular.

Com base numa abordagem conservadora das estimativas realizadas, salvaguarda-se que, nos casos em que os débitos de dose medidos se encontravam próximos dos valores de fundo, foi considerada uma ocupação máxima de 40 horas semanais, 50 semanas anuais. Nos casos em que o titular declarou que a duração máxima das aproximações era da ordem das poucas horas, esse tempo foi, no mínimo, duplicado.

Os resultados obtidos são posteriormente comparados com os limites de dose efetiva para cada categoria considerada – membros do público, trabalhadores expostos de categoria B e trabalhadores expostos de categoria A, para aferir a classificação inicial dos trabalhadores.

Para fontes de radiação com emissões  $\beta^-$ , foi medido o fluxo de partículas beta nos locais de ocupação humana mais próximos de cada fonte.

O fluxo de partículas define-se como o número de partículas,  $dN$ , que atravessa uma área,  $dA$ , (fluência  $\Phi$ ) por unidade de tempo e é dado em  $m^{-2}.s^{-1}$ . [15]

$$\dot{\Phi}_\beta = \frac{dN}{dA \times dt} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.2)$$

A partir do fluxo registado, foi calculado o débito de dose absorvida (expressão 3.3), o respetivo débito de dose equivalente na pele devido à fraca penetração destas partículas no organismo (expressão 3.4) e a dose final foi obtida através do produto do débito de dose equivalente e o tempo máximo de permanência indicados pelo titular.

$$\dot{D}_\beta = 5,768 \times 10^{-5} \times \dot{\Phi}_\beta \times \mu_\beta^{tissue} \times E_{\beta,média} \times \left[ e^{-\mu_\beta^{air}(\rho x)} \right] \left[ e^{-\mu_\beta^{tissue}(0,007)} \right] \quad (3.3)$$

Em que  $\dot{D}_\beta$  é o débito de dose absorvida devido a partículas beta dado em rad/h,  $5,768 \times 10^{-5}$  é o fator de conversão de MeV/g para rad,  $\dot{\Phi}_\beta$  é o fluxo de partículas beta em partículas.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>,  $\mu_\beta^{tissue}$  é a fração de energia depositada por unidade de massa no tecido biológico dada em cm<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>,  $E_{\beta,média}$  é a energia média das partículas beta para a fonte considerada em MeV,  $\mu_\beta^{air}$  é a fração de energia depositada por unidade de massa no ar dada em cm<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>,  $\rho x$  é o fator que considera a absorção das partículas  $\beta$  no ar antes de interagir com o tecido biológico, em que  $\rho$  é a densidade do ar e  $x$  é a distância entre a fonte e a superfície da pele, sendo dado em g.cm<sup>-2</sup>. O valor 0,007 g.cm<sup>-2</sup> é a densidade média da camada de células mortas da pele, contabilizando adicionalmente a absorção de partículas  $\beta$  nesta camada. [49]

$$\mu_\beta^{tissue} = 18,6 \times (E_{\beta,máx} - 0,036)^{-1,37} \quad (3.4)$$

$$\mu_\beta^{air} = 16 \times (E_{\beta,máx} - 0,036)^{-1,4} \quad (3.5)$$

Os valores de  $E_{\beta,m\acute{a}x}$  e  $E_{\beta,m\acute{e}dia}$  utilizados para cada fonte emissora de partículas beta consideradas na amostra foram retirados da plataforma “*Live Chart of Nuclides*” da IAEA e encontra-se na tabela 9. [50]

Tabela 9 – Energias média e máxima para cada radionuclídeo emissor beta considerado.

Radionuclídeo	$E_{\beta,m\acute{e}dia}$ [MeV]	$E_{\beta,m\acute{a}x}$ [MeV]
<sup>85</sup> Kr	0,251	0,687
<sup>147</sup> Pm	0,062	0,225

A dose equivalente na pele é então determinada a partir da seguinte expressão:

$$H_{pele} = \dot{D}_{\beta} \times w_r \times t \quad (3.6)$$

Em que  $H_{pele}$  é a dose equivalente na pele,  $\dot{D}_{\beta}$  é o débito de dose devido a partículas  $\beta^-$ ,  $t$  o tempo máximo de permanência anual declarado pelo titular e  $w_r$  o fator de ponderação da natureza da radiação considerada, que para elétrons é 1 conforme indicado na tabela 2.

Os resultados obtidos são posteriormente comparados com os limites de dose equivalente para a pele ou extremidade para cada categoria considerada – membros do público, trabalhadores expostos de categoria B e trabalhadores expostos de categoria A, para aferir a classificação inicial dos trabalhadores.

Como é possível observar, o equipamento de deteção de elétrons utilizado e indicado na tabela 8 não possui uma gama energética adequada à deteção das emissões provenientes do <sup>63</sup>Ni, que possui emissões com energia média de 17,425 keV e máxima de 66,977 keV. Isto significa que, considerando as energias máximas, os seus alcances máximos no ar e nos tecidos biológicos seriam de 6,8 cm e 0,01 cm, respetivamente. [50-53]

A normal operação dos cromatógrafos gasosos não prevê uma aproximação à fonte inferior a 6,8 cm. Mesmo que exista contacto com a superfície acessível do equipamento, estas emissões são absorvidas pelos materiais e estruturas de conceção do equipamento portador. Assim, quaisquer doses estimadas de exposição ao <sup>63</sup>Ni foram unicamente consideradas nas exposições potenciais. [50-53]

Por último, é de notar que para fontes radioativas seladas de <sup>241</sup>Am se efetuaram medições considerando as emissões de fotões  $\gamma$ , e que estas já não são consideradas no âmbito das medições aos equipamentos que contêm fontes de <sup>241</sup>Am:Be. Para estes equipamentos, a autoabsorção e a absorção dos fotões no próprio encapsulamento da fonte e na estrutura do equipamento permitem reduzir significativamente a contribuição das referidas emissões.

Nos casos em que são identificados vários operadores da mesma fonte de radiação, considerou-se o trabalhador cujas estimativas dosimétricas foram mais elevadas.

#### **3.4.2. Estimativa das exposições ocupacionais potenciais**

Para se estimar as exposições potenciais, foram equacionados vários cenários para cada prática e discutidos junto do titular ou do responsável pela proteção radiológica da instalação por forma a determinar quais deles se consideravam possíveis de ocorrer com base nos cenários descritos na literatura, nos cenários adicionais identificados na instalação, nos eventuais registos de incidentes nas respetivas instalações e procurou-se definir, na medida do possível, uma duração máxima para cada cenário de exposição potencial considerado.

As tabelas 10, 11 e 12 resumem os principais cenários potenciais identificados para as práticas que envolvem gamadensímetros, medidores nucleares e geradores de raios X, respetivamente.

Tabela 10 – Descrição dos cenários de exposição potencial para a prática que envolve um gamadensímetro.

Cenários	Descrição dos cenários de exposição potencial
<b>Erro humano</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Falha do trabalhador no seguimento dos protocolos de utilização do equipamento e dos procedimentos de segurança da instalação;</li> <li>· Exposição por aproximação inadvertida ao equipamento;</li> <li>· Falha na identificação de danos no equipamento por falha na inspeção visual do mesmo;</li> <li>· Transporte do equipamento sem que este seja colocado no pacote destinado para o efeito;</li> <li>· Transporte do equipamento na embalagem de transporte, sem que seja mantida a distância de segurança recomendada;</li> <li>· Permanência junto ao contentor de armazenamento do equipamento portador das fontes seladas;</li> <li>· Utilização da fonte radioativa selada para além do tempo de vida recomendado pelo fabricante, aumentando o risco de deterioração da hermeticidade do encapsulamento e conseqüente risco de fuga e contaminação radioativa.</li> </ul>
<b>Degradação do sistema de recolha da fonte radioativa selada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Existência de corrosão na haste e no bloco deslizante de tungsténio;</li> <li>· Impossibilidade mecânica de retornar a fonte à posição de segurança, expondo um profissional de forma acidental;</li> <li>· Necessidade de intervenção de um profissional para repor a recolha da fonte.</li> </ul>
<b>Sismos, condições climáticas extremas, corrosão, choques mecânicos, queda de cargas pesadas ou esmagamento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Possível degradação da blindagem do equipamento portador das fontes radioativas seladas ou desalojamento da fonte radioativa selada por via de:               <ol style="list-style-type: none"> <li>1) choques mecânicos acidentais;</li> <li>2) esmagamento do equipamento portador das fontes seladas;</li> <li>3) a natural corrosão da estrutura envolvente do equipamento;</li> <li>4) operação ou armazenamento do equipamento portador das fontes sob condições climáticas extremas e não as recomendadas pelo fabricante.</li> </ol> </li> </ul>
<b>Falha e avaria dos equipamentos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Falha do monitor portátil de área, evitando a deteção de uma situação de exposição acidental;</li> <li>· Não realização da verificação metrológica do monitor portátil de área com a periodicidade mínima legalmente obrigatória;</li> <li>· Falha do gamadensímetro e das medições que realiza, com conseqüente repetição de ensaios.</li> </ul>
<b>Incêndio ou explosão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Potencial comprometimento da blindagem do contentor de armazenamento do equipamento ou do próprio equipamento;</li> <li>· Destruição do encapsulamento das fontes radioativas seladas com libertação do material radioativo, podendo dar origem a exposição interna por ingestão ou inalação, exposição externa por contaminação externa e ainda a contaminação do meio ambiente envolvente à instalação.</li> </ul>

Tabela 11 – Descrição dos cenários de exposição potencial para a prática que envolve medidores nucleares.

Cenário	Descrição dos cenários de exposição potencial
<b>Erro humano</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Falha no seguimento de procedimentos de utilização dos equipamentos;</li> <li>· Realização de operações/intervenções junto dos equipamentos portadores das fontes radioativas seladas sem o devido fecho do comutador do feixe;</li> <li>· Operação ou manipulação dos equipamentos e fontes por pessoal não autorizado e sem formação específica em segurança e proteção radiológica;</li> <li>· Exposição de um indivíduo que se aproxime do feixe sem autorização, sem verificar a sinalização perigo;</li> <li>· Colocação inadvertida de uma extremidade no feixe direto de radiação ou ao contacto com o contentor.</li> </ul>
<b>Degradação do sistema de comutação do feixe</b>	<p>Impossibilidade mecânica de fechar o obturador da fonte sempre que a linha esteja parada ou existam intervenções e manutenções nas regiões adjacentes ao contentor.</p>
<b>Sismos, condições climatéricas extremas, corrosão, choques mecânicos, queda de cargas pesadas ou esmagamento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Degradação da blindagem do contentor que envolve a fonte radioativa selada por via de choques mecânicos acidentais com outros objetos à passagem, da natural corrosão dos contentores e ou das estruturas metálicas que os suportam;</li> <li>· Degradação da estrutura do equipamento, com possibilidade de queda do contentor ou das estruturas que o suportam, com potencial comprometimento da blindagem dos contentores ou até esmagamento das fontes radioativas;</li> <li>· Existência de corrosão nas juntas soldadas, peças que conferem suporte ao equipamento, do parafuso de travamento e do sistema de travamento, originando um comprometimento da estabilidade e fixação de todas as peças e parafusos envolvidos na fixação do equipamento portador da fonte, aumentando a probabilidade de queda do mesmo.</li> </ul>
<b>Falha dos equipamentos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Falha do monitor portátil de área, podendo resultar numa falha na deteção de uma situação de exposição acidental ou de falha do sistema de comutação do feixe;</li> <li>· Não realização da verificação metrológica do monitor portátil de área com a periodicidade mínima legalmente obrigatória;</li> <li>· Prolongamento do tempo de vida útil do equipamento ou da fonte radioativa selada, aumentando o risco de detioração da hermeticidade da fonte e consequente fuga e contaminação radioativa.</li> </ul>
<b>Incêndio ou explosão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Queda dos contentores das fontes dos pontos de fixação onde se encontram instalados ou da estrutura que os suporta, incluindo a estrutura envolvente, com potencial comprometimento da blindagem dos contentores ou até esmagamento das fontes radioativas;</li> <li>· Destruição do encapsulamento da fonte radioativa selada com libertação do material radioativo, podendo dar origem a exposição interna por ingestão ou inalação, e ainda a contaminação do meio ambiente envolvente à instalação.</li> </ul>

Tabela 12 – Descrição dos cenários de exposição potencial para a prática de operação de geradores de radiação ionizante (XRF, inspetores e raio X em cabine).

Cenário	Descrição dos cenários de exposição potencial
<b>Erro humano</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Falha no seguimento dos protocolos de utilização do equipamento e dos procedimentos de segurança;</li> <li>· Realização de operações/intervenções junto do equipamento de raios X sem a devida cessação de emissão do feixe;</li> <li>· Operação do equipamento por pessoal não autorizado, nomeadamente, sem formação específica em segurança e proteção radiológica;</li> <li>· Exposição de um indivíduo que se aproxime do feixe sem autorização, sem verificar a sinalização de emissão do feixe;</li> <li>· Colocação inadvertida de uma extremidade em contacto com a região que comporta maiores débitos de dose, em locais de entrada de produto ou ainda no feixe direto quando este se encontra acessível.</li> </ul>
<b>Falha do equipamento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Emissão de raios X sem que o operador dê essa indicação;</li> <li>· Falha dos <i>interlocks</i> de segurança que impedem o acesso ao feixe direto com conseqüente aumento do débito de dose no local de trabalho e possíveis exposições incidentais de corpo inteiro ou de extremidades no feixe direto, no caso dos equipamentos autoblindados;</li> <li>· Falha dos botões de emergência de cessação de feixe;</li> <li>· Falha nos sistemas de alarme e aviso luminoso de emissão de feixe e conseqüente realização de ações de operação e manutenção próximas do equipamento sem que haja aviso de que este se encontra a emitir raios X.</li> </ul>
<b>Sismos, condições climatéricas extremas, corrosão, choques mecânicos, queda de cargas pesadas ou esmagamento, incêndio, explosão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Degradação da estrutura do equipamento com conseqüente possibilidade de perda de blindagem da ampola de raios X com conseqüente aumento da radiação de fuga e possível exposição ao feixe útil.</li> </ul>

Para estimativa das doses em situação de cenário potencial, procurou-se, recorrendo adequadamente aos equipamentos identificados na tabela 8, efetuar medições em locais com condições que simulem os respetivos cenários considerados.

No entanto, para os cenários que envolvem a exposição de uma extremidade ao feixe útil de raios X ou de uma fonte radioativa selada que se desalojou do equipamento portador e ainda os casos em que é equacionado uma situação de contaminação interna, principalmente realizada quando as fontes são utilizadas além do tempo de vida útil recomendado, realizam-se medições ou cálculos que não recorrem aos equipamentos e equações anteriormente referidos.

Quando o cenário potencial envolve a exposição de uma extremidade ao feixe útil de raios X, as doses envolvidas foram estimadas com base em medições do feixe direto ou ainda com base num

cálculo teórico. Para medição no feixe direto recorre-se a um equipamento adequado à análise de feixes de raios X de 40 a 150 keV, indicado várias informações acerca do mesmo, nomeadamente a sua tensão, dose, débito de dose e tempo de irradiação. O equipamento utilizado é o dosímetro X2 R/F da RaySafe™, que incorpora um detetor semiconductor de silício.

Sabendo que um aumento na diferença de potencial entre os elétrodos produz um aumento da intensidade do feixe proporcional ao quadrado da tensão ( $\propto V^2$ ) e um aumento da energia média dos raios X produzidos, cujas energias máximas são equivalentes à diferença de potencial máxima aplicada, e que um aumento da corrente aplicada aumenta de forma proporcional a intensidade do feixe ( $\propto I$ ), é possível deduzir a seguinte expressão: [54]

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1^2}{V_2^2} \times \frac{I_1}{I_2} \quad (3.7)$$

Desta forma, é possível estimar o débito de dose no feixe útil, conhecendo um débito de dose,  $D_2$ , devido a um feixe emitido após a aplicação de uma tensão conhecida,  $V_2$ , e uma corrente conhecida,  $I_2$ . Assim, quando o feixe não se encontrava acessível para realização da medição das doses obtidas a partir da exposição ao mesmo, estimou-se a dose no feixe direto a partir da seguinte expressão:

$$\dot{D} = \dot{D}_2 \times \frac{V_1^2}{V_2^2} \times \frac{I_1}{I_2} \quad (3.8)$$

Nos casos em que se pretendeu simular e estimar as doses devidas à exposição ao feixe útil de uma fonte radioativa selada que se desalojou do equipamento portador, recorreu-se à aproximação de uma fonte pontual para se poder utilizar a expressão:

$$\dot{D} = \frac{A \times \Gamma}{d^2} \quad (3.9)$$

Onde  $\Gamma$  é uma constante característica para cada radionuclídeo, sendo expressa em mSv.Mq.h<sup>-1</sup> quando  $\dot{D}$  é dado em mSv/h, a atividade, A, em MBq, e distância à fonte, d, em metros. [54]

Na tabela 13 indicam-se as constantes gamas determinadas a 1 m para os radionuclídeos considerados, com base nos valores indicados na bibliografia a 0,3 m. [52]

Tabela 13 – Valor da contante gama determinado a 1 m para cada radionuclídeo de interesse.

Radionuclídeo	Constante gama ( $\frac{mSv}{MBq \cdot h}$ )
<sup>241</sup> Am	$1,34 \times 10^{-5}$
<sup>60</sup> Co	$3,47 \times 10^{-4}$
<sup>137</sup> Cs	$9,63 \times 10^{-5}$
<sup>147</sup> Pm	$6,08 \times 10^{-10}$
<sup>85</sup> Kr	$3,68 \times 10^{-7}$

Adicionalmente, considerou-se o débito de dose devido a neutrões a 1 m de uma fonte selada de <sup>241</sup>Am:Be como sendo de 1,7 mrem/h/Ci. [55]

Por último, nos casos em que as fontes radioativas seladas ultrapassaram o tempo de vida útil recomendado pelo fabricante, simularam-se doses decorrentes da exposição interna devido à ingestão e inalação de uma atividade correspondente ao critério de suspensão de um ensaio de hermeticidade para uma fonte radioativa selada de 200 Bq (ISO 9978:2020). [56]

Para tal, calculou-se a dose efetiva comprometida num período de 50 anos após a sua incorporação através da expressão:

$$E(50) = \sum_j e_{j,inh}(50) \times I_{j,inh} + \sum_j e_{j,ing}(50) \times I_{j,ing} \quad (3.10)$$

Em que  $e_{j,inh}(50)$  e  $e_{j,ing}(50)$  são os coeficientes de dose efetiva comprometida devido à inalação e ingestão do radionuclídeo  $j$ , respetivamente, e  $I_{j,inh}$  e  $I_{j,ing}$  são as atividades inalada e ingerida. [16]

É considerado o período de 50 anos para radionuclídeos com elevados períodos de semidesintegração ou que permaneçam durante longos períodos no organismo. Os coeficientes de dose efetiva comprometida são os recomendados pela Publicação 119 da ICRP. [10,16,57]

Nos anexos A e B é possível observar 2 metodologias adotadas para a estimativa das doses ocupacionais normais e potenciais para uma prática que envolve fontes radioativas seladas e para a operação de um gerador de raios X, respetivamente.

As estimativas obtidas somaram-se às estimativas das exposições normais e compararam-se com os limites de dose efetiva ou dose equivalente para a pele e extremidades para membros do público, trabalhadores expostos de categorias A ou B. Seguidamente foi atribuída uma classificação final aos trabalhadores afetos a cada fonte considerada.

#### 3.4.3. Estimativa das exposições normais e potenciais nos locais de trabalho

Para determinação das exposições normais nos locais de trabalho, consideraram-se os locais de normal ocupação com maior proximidade a cada fonte e os tempos máximos de permanência declarados pelo titular. As estimativas das doses normais seguiram a metodologia utilizada para a estimativa das doses ocupacionais normais e não contemplaram uma distinção entre trabalhadores.

A partir das estimativas obtidas, foi atribuída uma classificação inicial dos locais de trabalho de cada fonte.

Seguidamente, para a estimativa das doses potenciais nos locais de trabalho, foi considerado o funcionamento contínuo dos equipamentos durante o tempo máximo possível declarado para o titular para a instalação em causa, o que no caso dos geradores de raios X corresponde a uma emissão contínua do feixe e para as fontes radioativas seladas, uma permanência do seu comutador aberto. Foram realizadas estimativas não só nas zonas habitualmente ocupadas pelos operadores, mas também a distâncias inferiores em relação a cada fonte, incluindo ao contacto com as superfícies acessíveis de cada equipamento e zonas de maior proximidade ao feixe direto, quando acessíveis.



Por último, estes resultados são comparados com as doses suscetíveis de serem recebidas nas zonas vigiadas e controladas, e é atribuída uma classificação final do local de trabalho.

## 4. Resultados e discussão

### 4.1. Classificação dos profissionais expostos

As estimativas das exposições normais ocupacionais dos trabalhadores envolvidos na operação das 92 fontes de radiação consideradas, indicaram que em 82 dos casos, as doses máximas individuais determinadas encontrar-se-iam abaixo do limite de 1 mSv/ano estabelecido para membros do público, enquanto que para as restantes 10 fontes, as doses normais estimadas encontravam-se entre 1 a 6 mSv/ano, pelo que a categoria atribuída seria de trabalhadores expostos de categoria B.

Na figura 9 apresentam-se as classificações atribuídas aos trabalhadores com base nas doses médias estimadas e na figura 10 apresentam-se as classificações para cada tipo de fonte de radiação considerada.

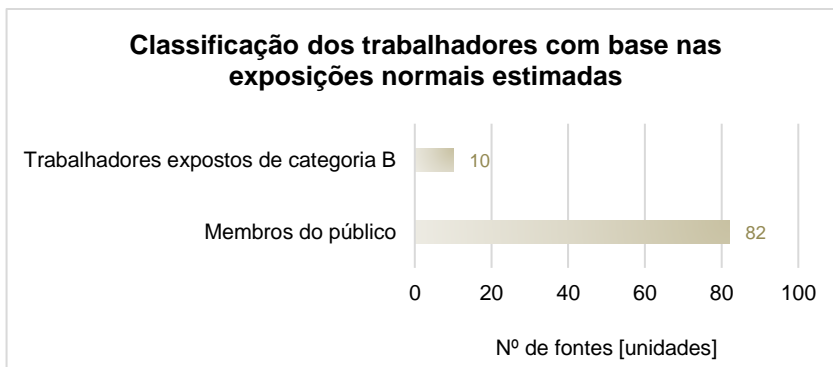


Figura 9 – Classificação dos trabalhadores com base nas exposições normais.

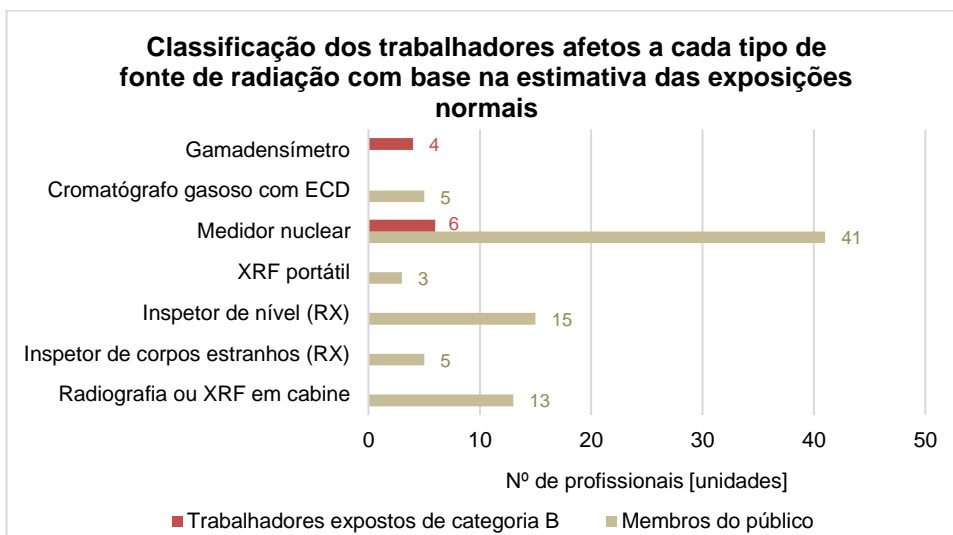


Figura 10 – Classificação dos trabalhadores com base nas exposições normais para cada tipo de fonte de radiação considerada.

As 10 fontes cuja normal operação resulta em doses efetivas superiores a 1 mSv/ano para os trabalhadores dizem respeito aos 4 gamadensímetros e aos 6 medidores nucleares que incorporam fontes de  $^{60}\text{Co}$ . Ao contrário das outras fontes, os gamadensímetros pressupõem a operação direta dos equipamentos e as fontes de  $^{60}\text{Co}$  encontram-se em linhas de produção que exigem a aproximação frequente dos trabalhadores às mesmas.

Na figura 11 encontram-se descritos os pontos de medida dos débitos de equivalente de dose ambiente devido a fótons e a neutrões para estimativa das doses ocupacionais devido aos cenários de operação, transporte e armazenamento dos gamadensímetros. Para o cenário de operação as doses foram medidas a 1 m de cada equipamento colocado em condições normais de funcionamento, particularmente em modo de transmissão direta. Para o cenário de transporte foram aferidas as doses a 0,3 m da embalagem de transporte uma vez que é a distância mínima recomendada pelos fabricantes. Para o cenário de armazenamento, foram monitorizados os locais de trabalho a distâncias iguais ou superiores a 1 m do contentor de armazenamento, com base no descrito pelo titular.

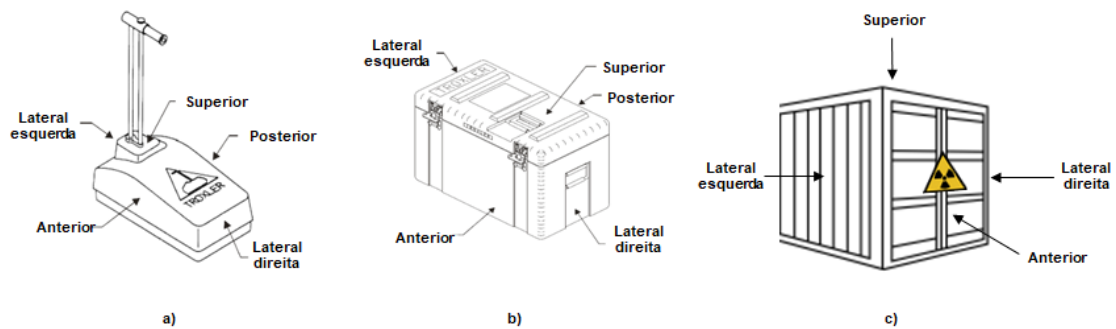


Figura 11 – Pontos de medição dos débitos de equivalente de dose ambiente devido a fótons e a neutrões para estimativa das doses ocupacionais devido aos cenários de operação (a), transporte (b) e armazenamento (c).

No caso dos gamadensímetros, foram estimadas doses envolvidas no transporte e operação de cada equipamento, e ainda as doses devido à permanência nas áreas adjacentes ao contentor onde os equipamentos são armazenados quando não se encontram em funcionamento com base nas medições do débito de equivalente de dose ambiente devido a fótons e neutrões. A média dos equivalentes de dose ambiente anuais determinados foi de  $1,97 \pm 0,01$  mSv, sendo que o valor máximo determinado foi de  $3,20 \pm 0,01$  mSv e o mínimo de  $1,10 \pm 0,01$  mSv (figura 12).

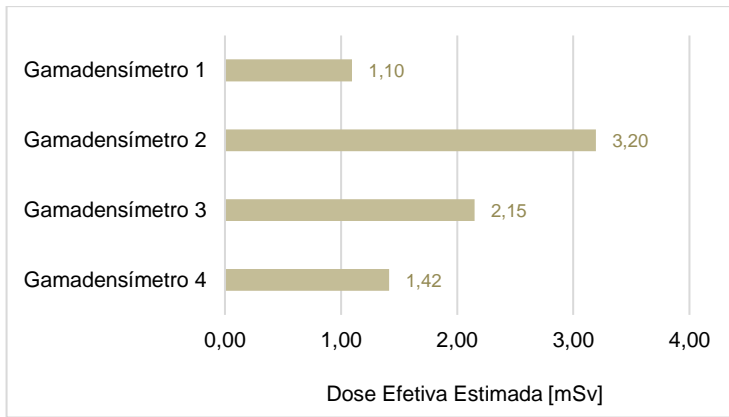


Figura 12 – Doses efetivas máximas estimadas para os trabalhadores afetos aos 4 gamadensímetros considerados.

Já as fontes de  $^{60}\text{Co}$  encontram-se em linhas de produção que exigem a aproximação dos operadores enquanto os obturadores das fontes estão abertos (figura 13). Como tal, as doses médias estimadas considerando a permanência dos trabalhadores a 1 m das fontes durante 100 h por ano, foram de  $3,8 \pm 0,67$  mSv, tendo sido a mais elevada de  $3,95 \pm 0,69$  mSv e menor de  $3,4 \pm 0,54$  mSv (figura 14).

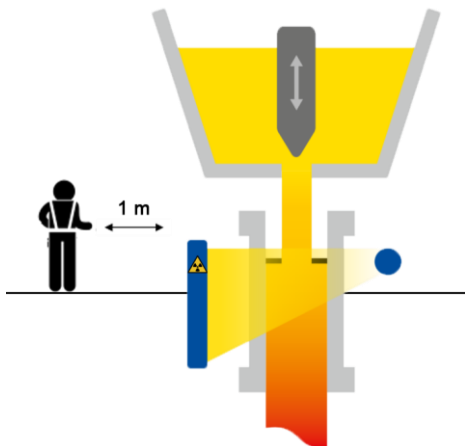


Figura 13 – Simulação da situação de normal aproximação às fontes de  $^{60}\text{Co}$ .

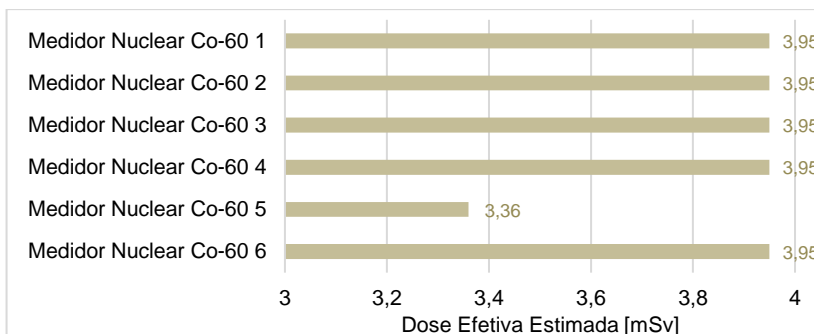


Figura 14 – Doses efetivas máximas estimadas para os trabalhadores afetos aos medidores nucleares com  $^{60}\text{Co}$ .

As doses envolvidas na operação dos XRF portáteis, equipamentos que têm o feixe direto acessível, variaram entre  $0,00 \pm 0,00$  mSv e  $0,36 \pm 0,02$  mSv. As doses estimadas encontram-se abaixo do 1 mSv devido à blindagem inerente aos próprios equipamentos, que reduzem as doses nas zonas de colocação das extremidades e ainda ao facto de todos operarem a uma tensão máxima de 50 kV. O equipamento que se espera que não exponha o operador a qualquer dose efetiva opera com uma corrente máxima de 0,039 mA, enquanto os outros dois equipamentos para os quais se perspectiva que os seus operadores sejam sujeitos a doses efetivas de 0,03 e  $0,36 \pm 0,02$  mSv possuem uma gama de corrente que ascende aos 0,1 mA. Assim, perspectiva-se que estas diferenças se devam às diferentes frequências de utilização de cada equipamento declaradas pelos titulares, mas principalmente devido à corrente a que cada equipamento opera.

Considerando a operação dos 13 equipamentos de XRF, radiografia e tomografia em cabine autoblindada, as exposições estimadas variaram entre  $0,0 \pm 0,0$  mSv e  $0,034 \pm 0,016$  mSv, tendo a média sido de  $0,010 \pm 0,010$  mSv (figura 15). A maior parte destes equipamentos indica no seu manual que estão concebidos para serem operados por membros do público, sendo efetivamente isentos de controlo regulador noutros países-membros. Os níveis de débitos de dose existentes nos locais de trabalho mais próximos dos equipamentos e ainda ao contacto com as superfícies acessíveis dos mesmos são inferiores ao limite de deteção do equipamento, pelo que não se verificaram variações significativas em relação aos valores de fundo registados, daí que as exposições normais dos trabalhadores afetos a alguns dos equipamentos descritos na figura 15 sejam nulas. Em todos os equipamentos se verificou a existência de *interlocks* mecânicos de segurança que impedem o acesso ao feixe direto, cabine revestida por chumbo e vidro chumbíneo. A título de exemplo, descreve-se as características de um dos equipamentos: o acesso ao feixe direto é efetuado por uma porta, que possui encravamentos mecânicos de segurança e é revestida por um vidro chumbíneo com equivalente a 6,0 mmPb. A restante cabine é revestida por 7 mm de chumbo. Verificou-se a existência de um posto de trabalho fixo junto ao equipamento e um segundo local de trabalho num controlador à distância (figura 16).

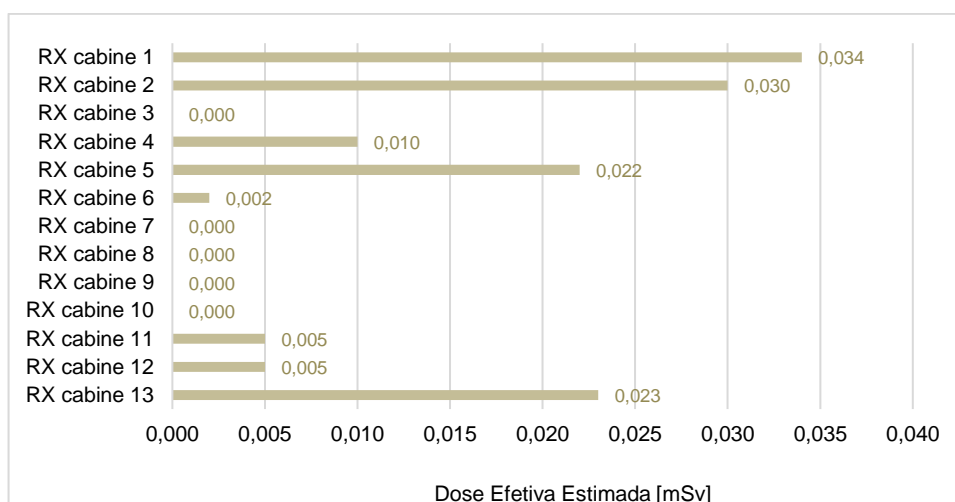


Figura 15 – Doses efetivas máximas estimadas para os trabalhadores afetos aos geradores de raios X em cabine.

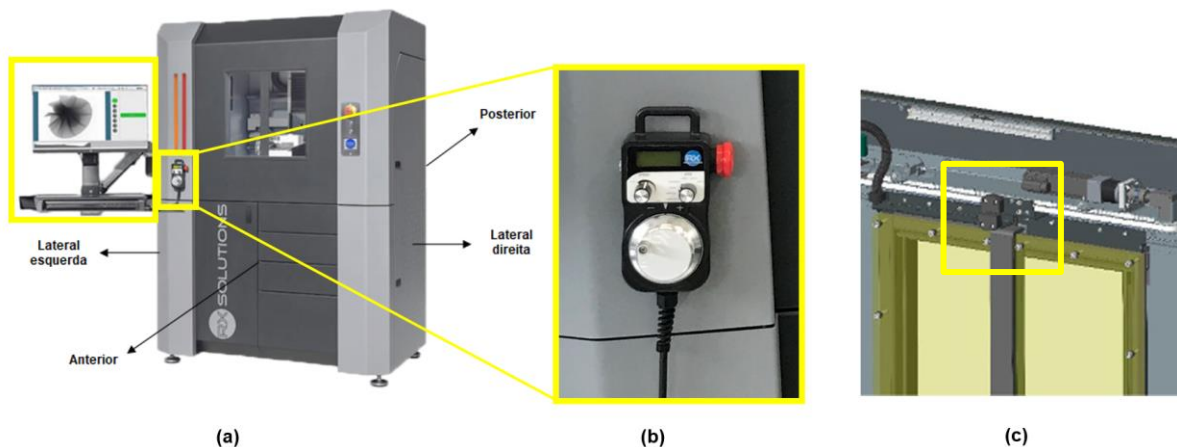


Figura 16 – Equipamento e pontos de monitorização dos locais de trabalho (a), controlador à distância (b) e encravamento de segurança existente na porta de acesso ao feixe direto (c).

As doses obtidas através do normal funcionamento dos inspetores de nível e de corpos estranhos estimadas encontram-se descritas na figura 17 e variaram entre os  $0,00 \pm 0,00$  mSv e  $0,70 \pm 0,05$  mSv e a média foi de  $0,11 \pm 0,05$  mSv, sendo que o equipamento para o qual se estimou a dose mais elevada opera a uma tensão e correntes máximas de 60 kV e 45 mA, respetivamente. Os restantes equipamentos possuem tensões máximas entre 60 a 84 kV e correntes entre 0,003 mA e 5 mA. Os 12 equipamentos com menores tensões e correntes possuíam feixe direto acessível, enquanto os restantes possuíam delimitações físicas do próprio equipamento (figura 18) ou de gradis.

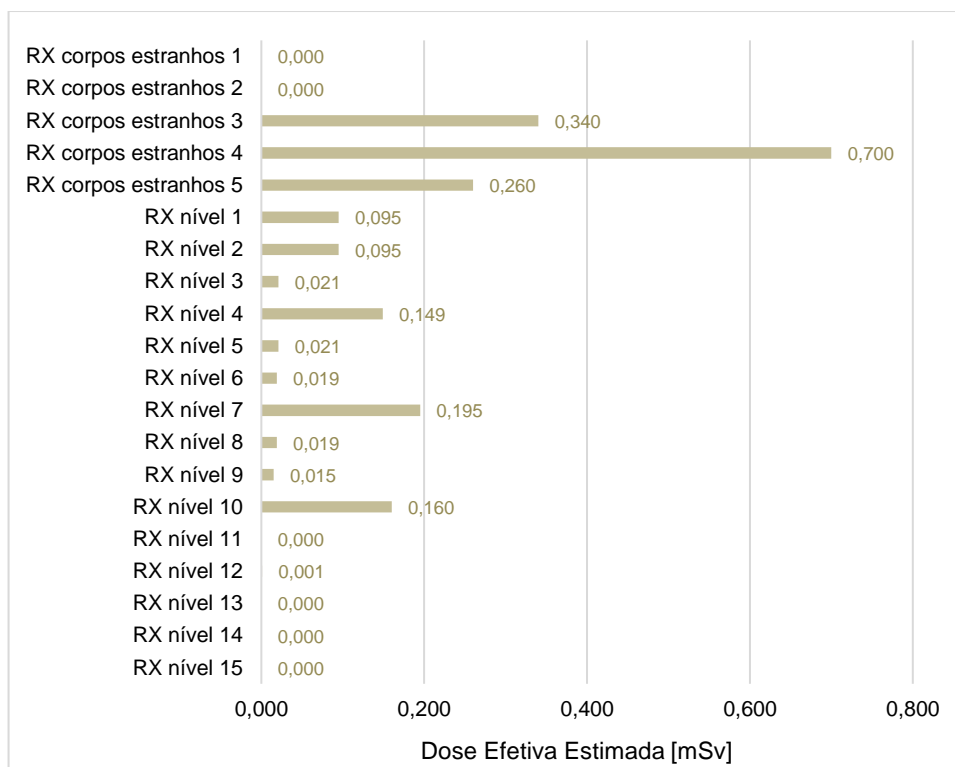


Figura 17 – Doses efetivas máximas estimadas para os trabalhadores afetos aos geradores de raios X utilizados para inspeção de nível e de corpos estranhos.

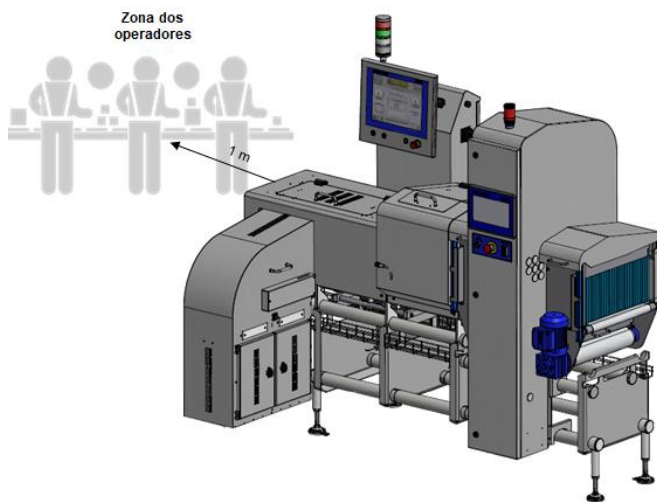


Figura 18 – Ponto de monitorização dos locais de trabalho para estimativa das doses ocupacionais normais devido à operação de um inspetor de corpos estranhos sem acesso ao feixe direto.

Para as exposições devidas às emissões das fontes de  $^{85}\text{Kr}$  foram efetuadas medições para as partículas  $\beta^-$  e para os fotões  $\gamma$ , que representam menos de 1 % das emissões, e para as fontes de e  $^{147}\text{Pm}$  foram efetuadas medições às partículas  $\beta^-$ . As doses efetivas devidas aos fotões foram cerca de  $0,27 \pm 0,01$  mSv em média para as fontes de  $^{85}\text{Kr}$ . As doses equivalentes médias estimadas para a pele foram de  $0,077 \pm 0,003$  mSv devido às fontes de  $^{147}\text{Pm}$  e  $0,28 \pm 0,03$  mSv para as de  $^{85}\text{Kr}$ .

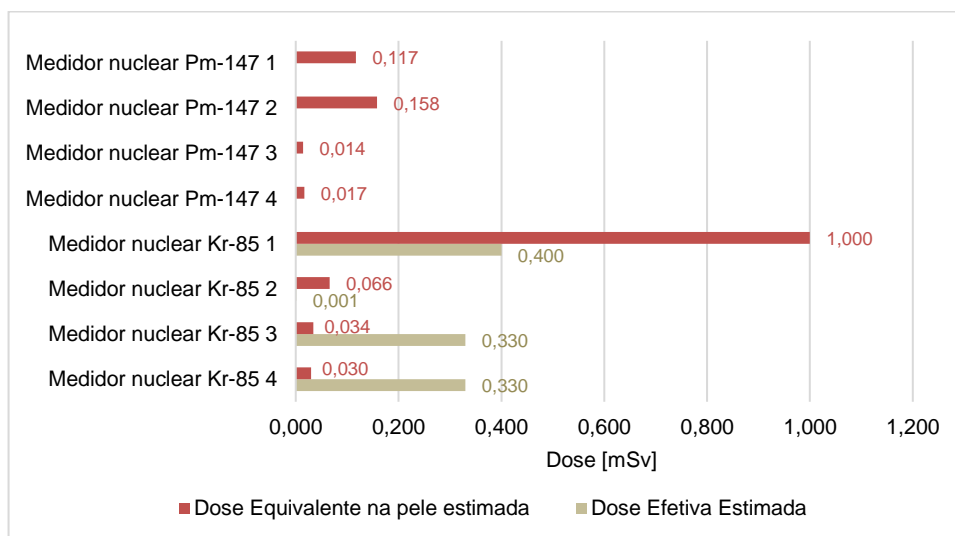


Figura 19 – Doses efetivas e doses equivalentes na pele máximas estimadas para os trabalhadores afetos aos medidores nucleares com  $^{85}\text{Kr}$  e  $^{147}\text{Pm}$ .

As doses efetivas estimadas devido à exposição às fontes de  $^{241}\text{Am}$  e  $^{137}\text{Cs}$  variaram entre  $0,0 \pm 0,0$  mSv e  $0,09 \pm 0,02$  mSv, tendo a média sido de  $0,013 \pm 0,002$  mSv, conforme evidenciado na figura 20. As baixas doses obtidas devem-se ao facto destes medidores não exigirem a sua operação direta frequente e as ações de manutenção têm pouca duração e são realizadas com os comutadores das fontes fechados.

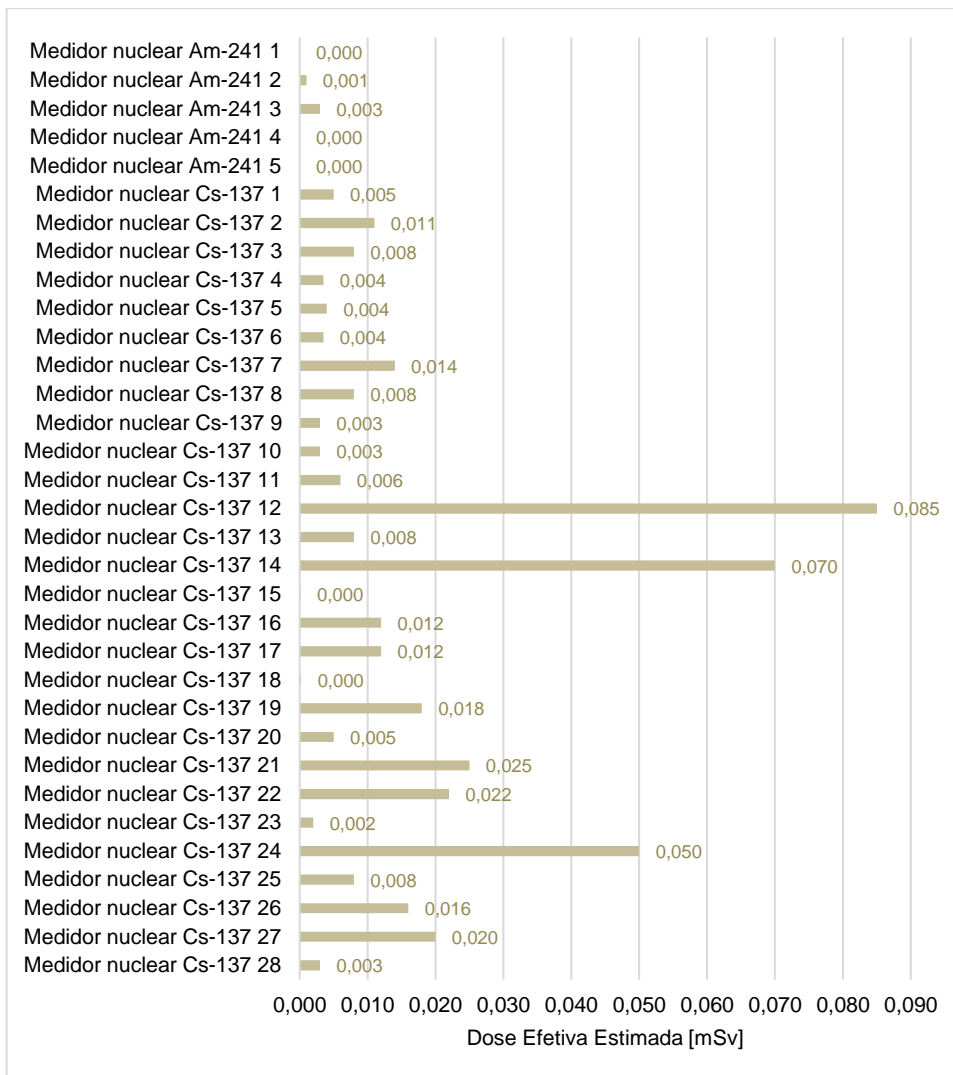


Figura 20 – Doses efetivas máximas estimadas para os trabalhadores afetos aos medidores nucleares com  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{241}\text{Am}$ .

Para a operação de cromatógrafos gasosos com fontes de  $^{63}\text{Ni}$  não se estimou qualquer dose, uma vez que a natureza e energia das emissões não possuem alcance suficiente para expor um indivíduo e os materiais do próprio equipamento blindam as emissões existentes.

Como referido anteriormente, as estimativas das doses devidas a situações de exposição planeada, devem incidir sobre as exposições ocupacionais e potenciais dos trabalhadores.

Após a consideração da contribuição das estimativas das doses potenciais, verificou-se que os trabalhadores anteriormente classificados como expostos de categoria B, mantiveram a sua classificação, os trabalhadores de 36 outras fontes viram a sua classificação alterada de membros do público para trabalhadores de categoria B e os trabalhadores envolvidos na operação das restantes 46 fontes mantiveram-se classificados como membros do público (figura 21).



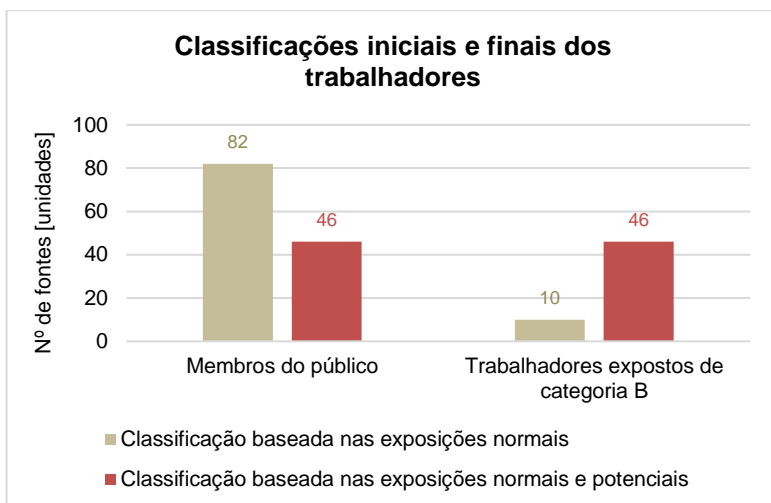


Figura 21 – Classificação inicial e final dos trabalhadores.

Com base no gráfico da figura 21 verifica-se que a classificação como membros do público apresentou uma variação percentual de -43,9 % e a de trabalhadores expostos de categoria B apresentou uma variação percentual de 360 %, após a consideração das exposições potenciais.

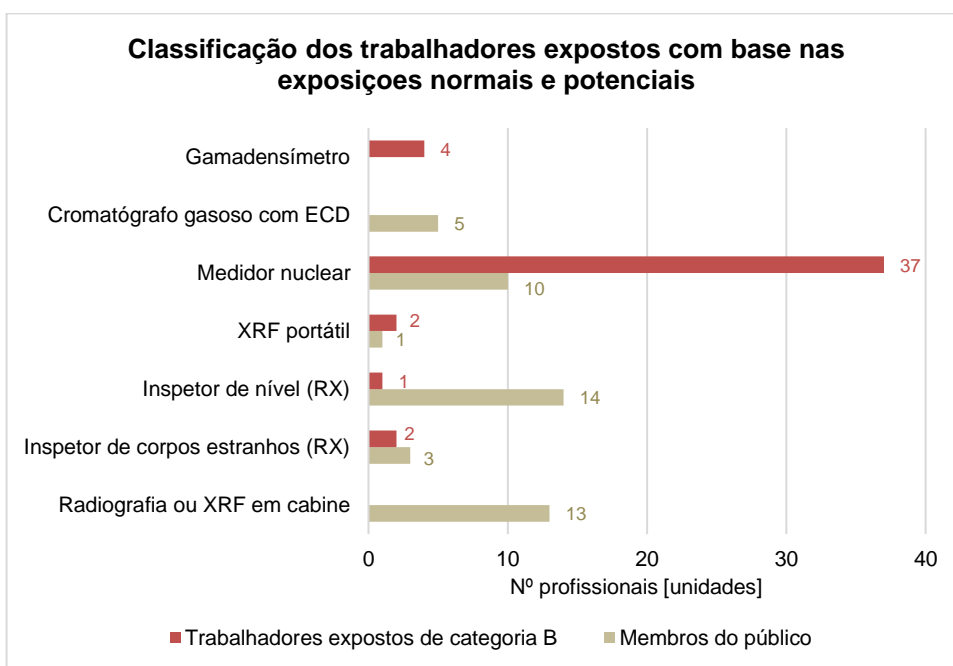


Figura 22 – Classificação final dos trabalhadores com base nas exposições normais e potenciais para cada tipo de fonte de radiação considerada.

Das 36 classificações alteradas após consideração das exposições potenciais, 5 dizem respeito à operação de geradores de radiações ionizantes e as restantes às práticas que envolvem fontes radioativas seladas.

2 dos 5 geradores em causa dizem respeito aos dois equipamentos de XRF portáteis que podem operar até uma tensão de 50 kV e uma corrente de 0,1 mA, uma vez que as doses nas superfícies acessíveis do equipamento e no feixe direto indicam que o valor de 1 mSv possa ser excedido, aumentando a frequência de utilização do equipamento e considerando a irradiação direta de uma extremidade durante o tempo de análise de uma amostra.

Os restantes 3 equipamentos são 2 inspetores de corpos estranhos e 1 inspetor de nível que, ao serem aumentados os tempos de permanência nas imediações e eventuais situações de exposição potencial nas zonas de entrada de produto onde os débitos de dose foram mais elevados, se estima que seja possível as doses efetivas ultrapassarem o valor de 1 mSv/ano.

Por último, foram alteradas as classificações finais dos trabalhadores envolvidos na operação e manutenção de 3 equipamentos portadores de fontes de  $^{85}\text{Kr}$  e de 28 fontes de  $^{137}\text{Cs}$ . As exposições potenciais consideradas envolveram um aumento dos tempos de permanência nas imediações dos equipamentos com os comutadores abertos e, para as fontes de  $^{137}\text{Cs}$  em tanques ou reservatórios foi considerada a exposição ao feixe direto decorrente de uma entrada nestas estruturas sem que o comutador tivesse sido devidamente fechado e para as fontes que já tinham ultrapassado o seu tempo de vida útil recomendado, foram considerados adicionalmente cenários de perda de hermeticidade das mesmas.

Na figura 23 encontram-se as estimativas finais das exposições dos trabalhadores cuja classificação final atribuída foi de categoria B.



Figura 23 – Estimativa das exposições normais e potenciais dos trabalhadores expostos de categoria B.

Mantiveram-se as classificações como membros do público dos trabalhadores afetos aos seguintes equipamentos:

- geradores de radiações ionizantes autoblindados, nos quais se atestou a conformidade dos encravamentos de segurança, a operacionalidade das sinalizações luminosas e de aviso para o perigo de exposição a radiações ionizantes e a existência de chave de segurança para colocar o equipamento a operar. Considerou-se que estes fatores diminuem a probabilidade de ocorrência de exposições potenciais. Aliado a isto, verificou-se a existência de botões de paragem de emergência que cessam a emissão de raios X, pelo que poderão ser medidas relevantes na redução da duração de uma exposição potencial, minimizando as suas consequências (figura 24). Foram realizadas estimativas de irradiação de uma extremidade durante o tempo de realização de uma análise para os equipamentos que permitem aceder ao feixe direto através de uma porta. Estas estimativas tiveram por base medições realizadas no feixe direto ou um cálculo teórico das mesmas, e consideraram a frequência de ocorrência de 1 evento anual. Ainda assim, os valores determinados encontravam-se abaixo do limite de dose equivalente para a pele para membros do público;

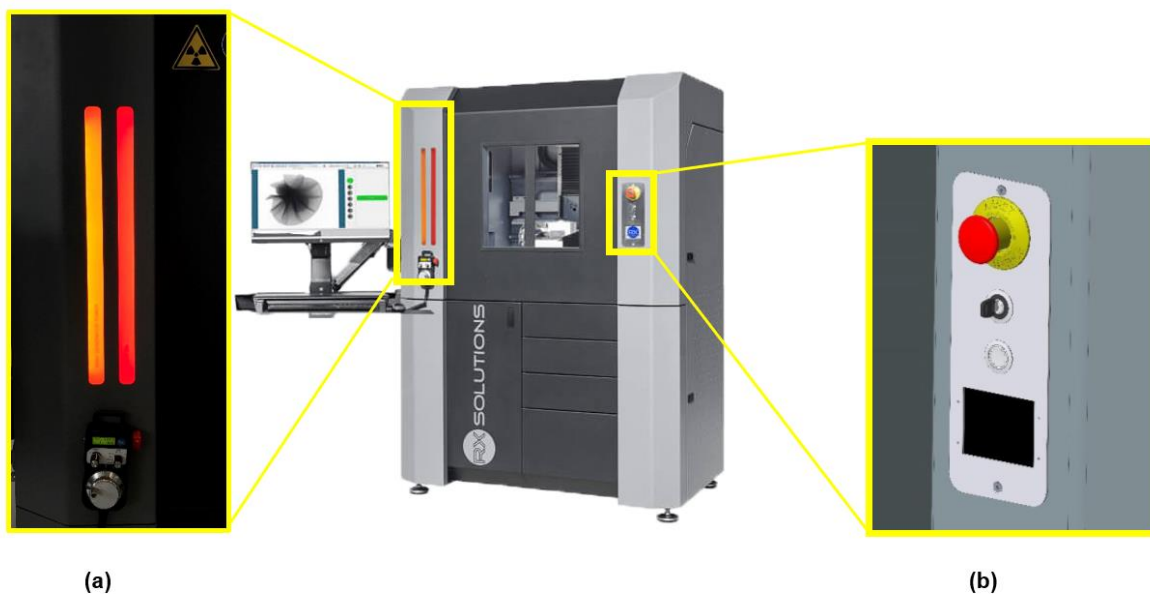


Figura 24 – Sinalizações de aviso, luminosa e botão de paragem de emergência no comando de controlo à distância (a) e botão de paragem de emergência e chave de segurança (b).

- inspetores de nível que operam a tensões e correntes baixas, mesmo tendo acesso ao feixe direto, por limitações físicas só foram estimadas as doses devido a potenciais exposições das extremidades, as quais não ultrapassam o limite de dose para membros do público;
- inspetores de corpos estranhos com blindagens inerentes adequadas que impedem o acesso ao feixe direto, que possuem blindagem adequada e encravamentos de segurança que impedem a abertura das tampas das esteiras transportadoras (figura 25);



(a)



(b)

Figura 25– Sinalização luminosa, chave de segurança, botão de paragem de emergência, sinalização de aviso de radiações ionizantes incluindo para grávidas e para não introdução de extremidades na zona de entrada e saída de produto (a) e encravamentos mecânicos de segurança existentes nas tampas das esteiras transportadoras (b).

- cromatógrafos gasosos, que mesmo simulando a incorporação por ingestão e inalação de uma atividade de 200 Bq de  $^{63}\text{Ni}$ , as doses efetivas comprometidas seriam de  $3,00 \times 10^{-8}$  mSv e  $1,04 \times 10^{-7}$  mSv, respetivamente. Não obstante, esta estimativa nem sempre é considerada, principalmente nos casos em que a integridade das fontes é atestada após a realização de testes de hermeticidade por espectrometria de cintilação líquida a cada fonte;
- XRF portátil com tensão e corrente máximas de 50 kV e 0,039 mA;
- Medidores nucleares com  $^{147}\text{Pm}$ , a partir dos quais foram estimadas doses equivalentes para a pele e extremidades devido a exposições ao contacto com o equipamento portador da fonte ou no feixe direto, que se mantiveram abaixo dos limites para membros do público;
- Medidores nucleares com  $^{241}\text{Am}$ , mesmo após estimativa de exposição de uma extremidade ao feixe direto durante 1 hora, uma vez que este se encontra acessível;
- 1 medidor nuclear com  $^{85}\text{Kr}$  existente numa instalação com rotação de turnos que não permite que sejam excedidas as doses para membros do público, mesmo considerando cenários de exposição potencial.

Na figura 26 encontram-se as estimativas finais das exposições dos trabalhadores cuja classificação final atribuída foi de membros do público.

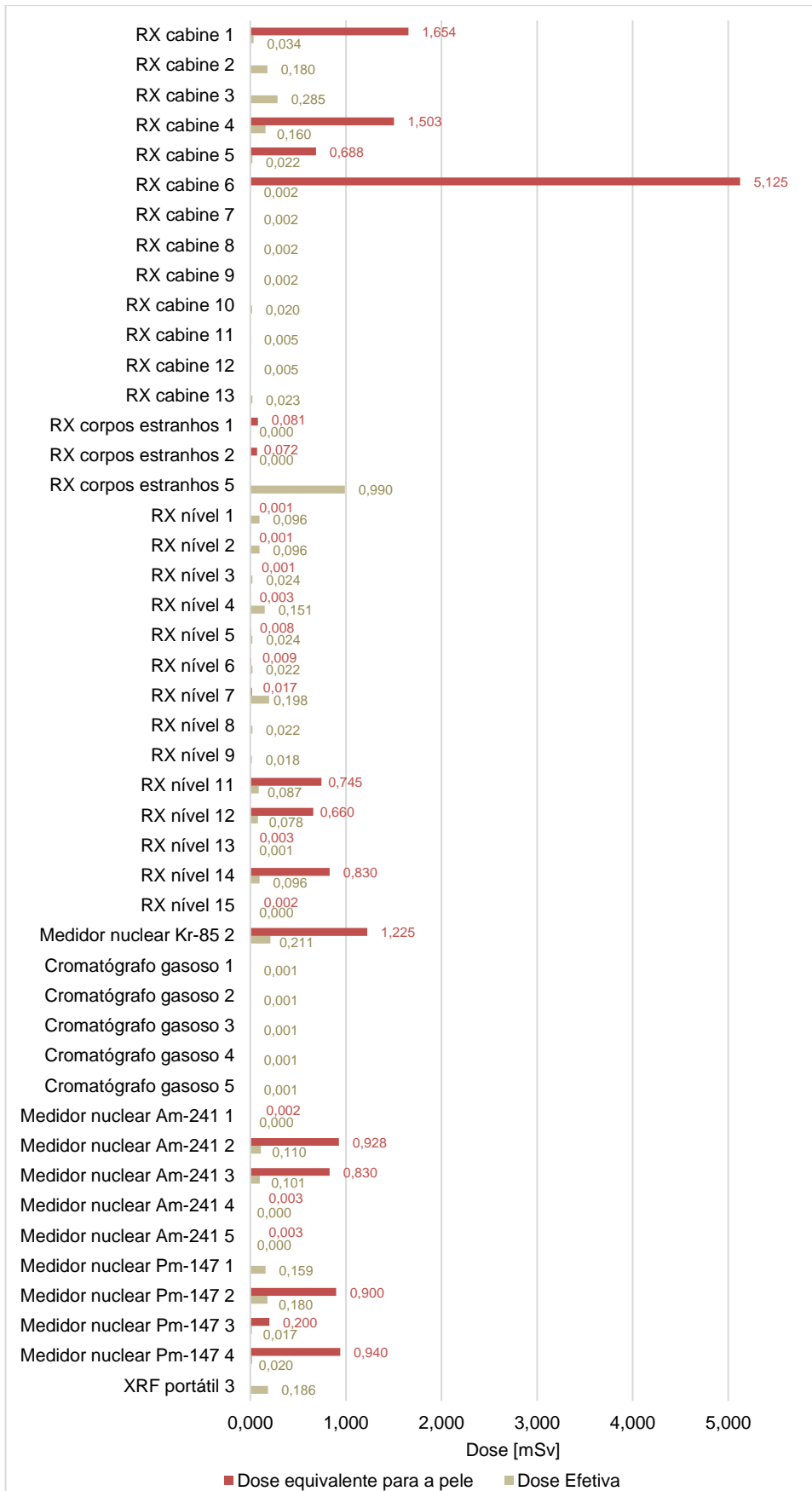


Figura 26 – Estimativa das exposições normais e potenciais dos trabalhadores classificados como membros do público.

## 4.2. Classificação dos locais de trabalho

A classificação dos locais de trabalho das 92 fontes de radiação devido ao seu normal funcionamento considerou os tempos de normal funcionamento das mesmas declarados pelo titular nos locais de normal ocupação pelos operadores e com maior proximidade às fontes.

Destas estimativas, classificaram-se os locais de operação de 19 fontes como zonas vigiadas e os restantes 73 não foram classificadas radiologicamente, uma vez que com base nos débitos de dose medidos e nos tempos de normal funcionamento dos equipamentos, não se prevê que possam resultar em doses efetivas anuais superiores a 1 mSv ou a doses equivalentes de 15 mSv/ano para o cristalino ou de 50 mSv/ano para a pele e extremidades dos membros.

Na figura 27 apresentam-se as classificações dos locais de trabalho para as 92 fontes, considerando as cargas de trabalho declaradas no caso dos geradores de radiações ionizantes, e os tempos em que os medidores nucleares possuem os comutadores abertos ou os gamadensímetros se encontram em utilização, transporte ou armazenamento.



Figura 27 – Classificação dos locais de trabalho com base nas ocupações normais.

Na figura 28 encontram-se as classificações dos locais de trabalho de cada fonte com base nas possíveis exposições a incorrer nos locais de trabalho, tendo em conta a normal ocupação dos mesmos.

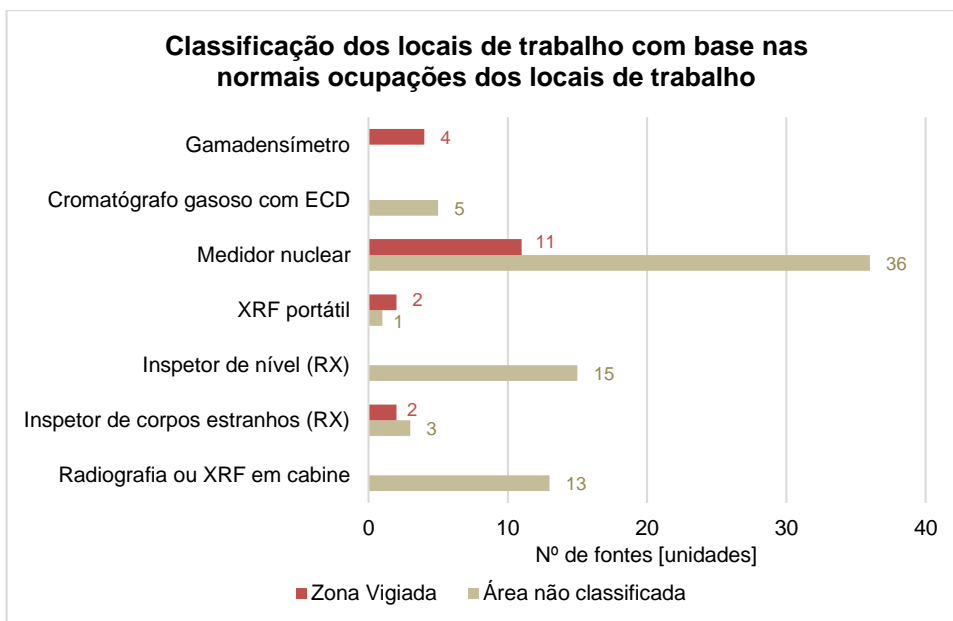


Figura 28 – Classificação dos locais de trabalho de cada tipo de fonte de radiação com base nas ocupações normais.

Os 19 locais de trabalho classificados como zonas vigiadas dizem respeito às áreas onde operam 3 medidores nucleares com fontes de  $^{137}\text{Cs}$ , 1 medidor nuclear de  $^{147}\text{Pm}$ , 1 medidor nuclear com  $^{85}\text{Kr}$ , 4 gamadensímetros, 6 medidores nucleares com fontes de  $^{60}\text{Co}$ , 2 XRF portáteis e 2 inspetores de corpos estranhos.

Estes débitos de dose registados na monitorização do local de trabalho da fonte de  $^{147}\text{Pm}$  mencionada suplantam os das outras fontes na medida em que a data de referência da sua atividade – 74 GBq era mais recente (2018), enquanto as outras 2 fontes com a mesma atividade possuem datas de referência de 2006 e 2011. A terceira fonte de  $^{147}\text{Pm}$  cujo local de trabalho não foi classificado apresenta atividade de 185 MBq e data de calibração de 2013, tendo já decaído ao longo de 3 períodos de semidesintegração. Esta fonte possui menor atividade porque analisa menor volume e espessura de papel, sendo utilizada em laboratório e não em máquinas de papel existentes no processo de fabrico como as restantes com fontes de 74 GBq.

O mesmo acontece para a fonte de  $^{85}\text{Kr}$ , que possui uma data de referência de atividade mais recente e maior atividade que as restantes (14,8 GBq a 12/11/2017), enquanto as outras 3 fontes possuem atividades de 14,8 GBq, 9,9 GBq e 9,9 GBq com datas de referência de 2013, 2007 e 2007 respetivamente.

Estima-se que as doses efetivas nos locais onde operam 3 medidores nucleares com fontes de  $^{137}\text{Cs}$  possam exceder o valor de 1 mSv/ano em função das suas atividades de 185 MBq, 185 MBq e 1850 MBq, e respetivas datas de referência de 2009. Os locais onde operam as restantes fontes de  $^{137}\text{Cs}$  não permitiram obter débitos de dose que remetessem para uma possível exposição superior a 1 mSv/ano uma vez que a maioria ultrapassou o tempo de vida útil recomendado pelo que as atividades



envolvidas são menores e, no caso das fontes com data de calibração mais recente (2007 e 2011), as atividades são de 37 MBq, pelo que resultam em débitos de dose inferiores.

Relativamente aos gamadensímetros, são classificadas como zonas vigiadas os contentores de armazenamento dos equipamentos e os locais de operação dos mesmos num raio de 1 m, devendo ser utilizada sinalização temporária adequada nos locais de utilização.

As zonas onde operam as 6 fontes de  $^{60}\text{Co}$  foram igualmente consideradas como zonas vigiadas uma vez que são de acesso e ocupação humana frequente. Todas as fontes possuíam atividades de 148 MBq calibradas para 2018. Salienta-se que se atribui como principal justificação dos débitos de dose registados, as elevadas energias dos fotões emitidos de 1,173 MeV e 1,333 MeV.

Um dos 2 inspetores de corpos estranhos localizados em zonas vigiadas, possui um gradil com encravamento mecânico de segurança que impede a aproximação à zona de entrada e saída de produto, no entanto, os débitos de dose no gradil remetem para uma classificação de zona vigiada. Já o outro equipamento, os débitos num raio de 1 das zonas de entrada e saída de produto, remetem para uma classificação de zona vigiada, e uma vez que é de fácil acesso, foi sugerida a colocação de uma delimitação física ou no chão da área referida, uma vez que apesar da estrutura inerente ao equipamento, a distância ao feixe direto é menor quando comparada com outros equipamentos utilizados para o mesmo fim (figura 29).

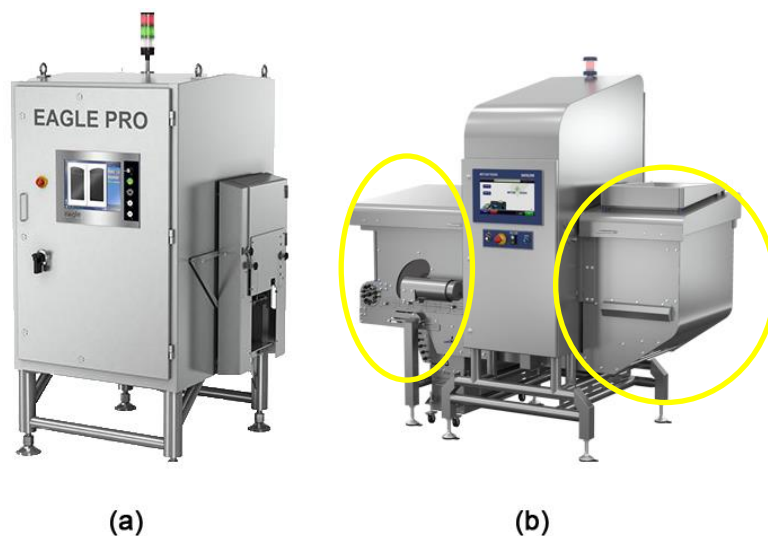


Figura 29 – Equipamento em causa (a) e equipamento utilizado para o mesmo fim mas com tampa de acesso à zona proximal ao feixe direto com encravamentos de segurança (b).

Por último, os 2 equipamentos de XRF portáteis operam em zonas classificadas como vigiadas em função dos tempos envolvidos na sua normal operação e das doses obtidas nas suas imediações.

Todas as zonas classificadas como zonas vigiadas devem possuir sinalização adequada em cumprimento do disposto no Artigo 80.º (1) do Decreto-Lei N.º 108/2018.

Na figura 30 evidenciam-se as classificações iniciais e finais atribuídas aos locais de trabalho das 92 fontes.

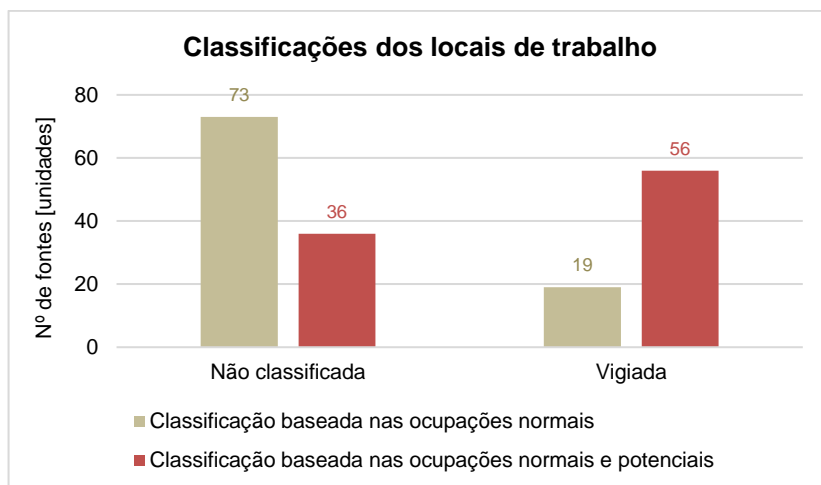


Figura 30 – Classificação inicial e final dos locais de trabalho.

Os dados do gráfico da figura 30 permitem determinar uma variação percentual de -50,7 % para as zonas não classificadas e de 194,7 % para as zonas vigiadas, após a consideração das ocupações potenciais e tempos de funcionamento e operação máximos das fontes de radiação.

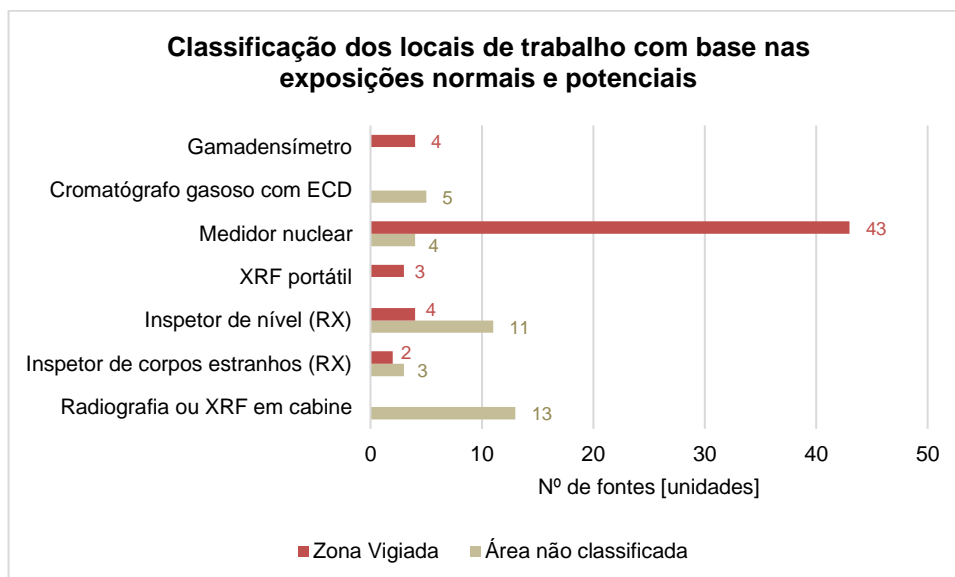


Figura 31 – Classificação inicial e final dos locais de trabalho para cada tipo de fonte considerada.

Verifica-se então que as exposições potenciais dos locais de trabalho de 37 fontes de radiação alteraram a sua classificação final, sendo 32 delas fontes radioativas seladas e 5 geradores de radiações ionizantes.

Classificou-se como zona vigiada, em função das exposições potenciais, os locais de trabalho de 1 XRF portátil, as restantes 25 fontes de  $^{137}\text{Cs}$ , as restantes 3 fontes de  $^{85}\text{Kr}$ , 2 medidores nucleares com atividade inicial de 74 GBq de  $^{147}\text{Pm}$ , 2 inspetores de nível com  $^{241}\text{Am}$  e 4 inspetores de nível com geradores de radiações ionizantes.

O local de trabalho agora considerado como zona vigiada do XRF portátil diz respeito ao equipamento ao qual não tinha sido atribuída classificação de zona vigiada quando consideradas apenas as exposições normais. Esta classificação final tem por base uma estimativa do aumento da frequência de utilização do equipamento, do aumento do tempo de cada análise efetuada, do aumento do número de amostras analisadas e ainda da consideração das doses potenciais decorrentes de irradiação ao feixe primário.

As classificações dos locais de trabalho das restantes fontes de  $^{137}\text{Cs}$  foram alteradas principalmente em função das doses potenciais devido à deterioração do encapsulamento das fontes que já ultrapassaram o tempo de vida útil recomendado pelo fabricante e que não foram submetidas a novos testes de hermeticidade, e das doses potenciais nas imediações das superfícies dos contentores das restantes fontes em situações potenciais.

As restantes 3 fontes de  $^{85}\text{Kr}$  viram as suas classificações finais alteradas, principalmente, por conta das doses potenciais nas regiões adjacentes aos equipamentos em situações de manutenção em que o comutador possa permanecer indevidamente aberto.

As 2 fontes de  $^{241}\text{Am}$  que operam em zonas vigiadas apresentaram essa categorização final devido aos débitos de dose medidos em contacto com o equipamento, nas imediações do feixe, zonas de passagem mais próximas e no feixe direto. As estimativas para as exposições potenciais nestas zonas foram mais elevadas em relação às outras com base nos débitos de dose medidos terem sido superiores devido à maior atividade inicial destas duas – 3,7 GBq, enquanto os restantes 3 medidores de nível com fontes de  $^{241}\text{Am}$  possuíam fontes com atividades de 1,67 GBq.

Por fim, dos últimos 4 inspetores de nível que viram a classificação dos seus locais de trabalho alterada para zona vigiada, 3 deles possuem feixe útil acessível. O outro equipamento possui uma estrutura que impede o acesso à zona proximal ao feixe, no entanto, os débitos de dose medidos ao contacto com as superfícies acessíveis da referida estrutura remetem para uma classificação de zona vigiada, quando considerado o funcionamento permanente do equipamento.

Os resultados apresentados permitem verificar que para as práticas de XRF, radiografia e tomografia computadorizada realizadas em equipamentos autoblandados em cabine, não foram classificados profissionais expostos nem locais de trabalho como zonas vigiadas ou controladas. Isto deve-se ao impedimento do acesso ao feixe direto inerente aos equipamentos, à existência de blindagem adequada e encravamentos mecânicos de segurança. Adicionalmente, salientam-se as sinalizações luminosas e de aviso para o perigo de radiações, chaves de acesso ao software que controla o equipamento, existência de chave de segurança para ativação do gerador e ainda botões de emergência para cessação do feixe. Estas características de conceção tornam os equipamentos

seguros ao ponto de poderem ser operados por indivíduos classificados como membros do público, salvaguardando-se a necessidade de vigilância frequente do equipamento e formação adequada sobre medidas e procedimentos de segurança durante a operação do mesmo.

Também se verificou que não foram classificados profissionais expostos nem locais de trabalho como zonas vigiadas ou controladas para as práticas de operação de cromatógrafos gasosos com fontes de  $^{63}\text{Ni}$ .

Por outro lado, todos os operadores e locais de trabalho afetos às práticas que envolvem gamadensímetros e fontes de  $^{60}\text{Co}$ , mantiveram as suas classificações iniciais como de trabalhadores expostos de categoria B e zonas vigiadas.

Por fim, é de salientar que todos os locais de trabalho afetos às práticas que envolvem XRF portátil, fontes de  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{60}\text{Co}$  e gamadensímetros apresentaram como classificação final dos locais de trabalho zonas vigiadas.

Nas tabelas 14 e 15 resumem-se as classificações iniciais e finais obtidas e ainda as alterações das classificações dos trabalhadores e dos locais de trabalho ocorridas.

*Tabela 14 – Resumo das classificações iniciais e finais dos trabalhadores afetos às práticas.*

Tipo de fonte de radiação	Classificação inicial		Classificação final	
	Membros do público	Trabalhadores expostos de categoria B	Membros do público	Trabalhadores expostos de categoria B
Radiografia ou XRF em cabine	13	0	13	0
Inspetor de corpos estranhos (RX)	5	0	3	2
Inspetor de nível (RX)	15	0	14	1
XRF portátil	3	0	1	2
Medidor nuclear	41	6	10	37
Cromatógrafo gasoso com ECD	5	0	5	0
Gamadensímetro	0	4	0	4

*Tabela 15 – Resumo das classificações iniciais e finais dos locais de trabalho.*

Tipo de fonte de radiação	Classificação inicial		Classificação final	
	Zona não classificada	Zona Vigiada	Zona não classificada	Zona Vigiada
Radiografia ou XRF em cabine	13	0	13	0
Inspetor de corpos estranhos (RX)	3	2	3	2
Inspetor de nível (RX)	15	0	11	4
XRF portátil	1	2	0	3
Medidor nuclear	36	11	4	43
Cromatógrafo gasoso com ECD	5	0	5	0
Gamadensímetro	0	4	0	4

## 5. Conclusão

A estimativa das exposições normais e potenciais é um estudo atualmente exigido pela autoridade competente no âmbito do licenciamento de diferentes práticas radiológicas, sendo uma avaliação determinante do risco radiológico inerente a uma prática e a que um trabalhador é ou pode vir a ser exposto.

As estimativas das exposições ocupacionais devido a situações de exposição planeada são idealmente determinadas a partir da monitorização dos locais de trabalho, podendo ainda recorrer à realização de cálculos, simulações ou informações existentes na bibliografia para efetuar estimativas dosimétricas para os cenários de exposição normal e potencial previamente identificados.

Ainda que os cenários potenciais possam envolver doses inferiores à dos limites para membros do público, os resultados do seu levantamento podem impulsionar uma melhoria contínua das condições de segurança. Conclui-se então que esta avaliação contribui para a redução do risco radiológico existente na medida em que identifica cenários de exposição potencial, que podem ser evitados após a adoção de medidas de proteção adequadas, contribuindo para a crescente implementação de uma cultura de segurança apropriada nas instalações.

O estudo realizado permitiu identificar que a contribuição adicional das exposições potenciais alterou a classificação dos trabalhadores de 36 fontes de radiação e de 38 locais de trabalho, num universo de 92 fontes de radiação utilizadas em contexto industrial.

Verificou-se que as exposições potenciais alteraram a classificação dos profissionais afetos a 31 das 56 fontes radioativas seladas consideradas (55,4 %) de membros do público para trabalhadores expostos de categoria B e alteraram a classificação dos locais onde operam 32 delas (57,1 %) de zona não classificada para zona vigiada. Quanto aos geradores de raios X, foram alteradas as classificações dos profissionais afetos a 5 aparelhos (13,9 %) e de 5 locais de trabalho (13,9 %).

Conclui-se que as exposições potenciais apresentam maior preponderância no que respeita à classificação dos profissionais envolvidos na operação de equipamentos que incorporam fontes radioativas seladas e à classificação dos locais onde estas operam. Tal pode dever-se ao maior número de cenários potenciais, às doses potenciais envolvidas serem superiores e no geral, a um maior risco que tais práticas envolvem. Daí que os titulares que detêm fontes radioativas seladas possuam algumas obrigações acrescidas e que a detenção, transferência, importação e transporte destas fontes seja alvo de controlo regulador adicional.

Já para os geradores de raios X, não se verificou um impacto tão grande da consideração das exposições potenciais, o que se pode dever principalmente aos seus controlos de engenharia, existência de blindagem estrutural inerente aos equipamentos, aos vários controlos de segurança existentes como os *interlocks* de segurança, às possíveis atuações em situações de incidente como botões de paragem de emergência, chaves de segurança, aos dispositivos de alerta e à ausência de risco radiológico quando o equipamento se encontra inativo, independentemente da integridade física

do mesmo. A maioria destes equipamentos indica nos seus manuais que se encontram concebidos de forma a serem operados por membros do público e os fabricantes indicam débitos de dose de referência que, se não forem ultrapassados, asseguram que os trabalhadores não podem ser sujeitos a doses superiores às fixadas para os limites de dose para membros do público em condições normais de funcionamento. Foi ainda verificado que alguns destes equipamentos são isentos de controlo regulador noutros países.

Identificam-se como principais responsáveis pela diminuição da probabilidade de ocorrência e magnitude das consequências as próprias características de conceção dos equipamentos (tipo de material e espessura dos mesmos), as delimitações físicas que blindam as emissões e aumentam a distância dos trabalhadores às fontes, o estabelecimento de instruções de trabalho claras e concisas que mencionem as medidas de proteção a adotar, a revisão frequente dos procedimentos de segurança, a monitorização periódica dos locais de trabalho quer no âmbito de manutenções ou das ações previstas para a verificação das condições de proteção e segurança radiológica e da conformidade dos critérios de aceitabilidade das fontes de radiação (garantia da qualidade), as características da própria instalação como a acessibilidade às fontes, a existência de controlos de engenharia e funções de segurança, a realização de formação em proteção radiológica por parte dos intervenientes nas práticas, seja ela conferente de qualificação profissional em proteção radiológica ou de carácter genérico e, por último, a existência de botões de paragem de emergência e sinalização adequada para avisar as pessoas do perigo de radiações.

Identificam-se como principais fatores que aumentam a probabilidade de ocorrência de exposições potenciais e a respetiva magnitude as situações em que o titular mantém em serviço fontes radioativas seladas cujo período de vida útil foi ultrapassado, a utilização de fontes radioativas seladas em atmosferas explosivas (ATEX), locais com potencial risco de queda ou esmagamento das mesmas, e de fácil acesso. Quanto aos geradores de raios X, o fator determinante foi o acesso ao feixe útil.

O presente estudo pretendeu sensibilizar para a importância de uma estimativa o mais aproximada possível à realidade do titular, de cada fonte e de cada instalação. Os resultados e estimativas apresentadas resultam de um apanhado do que surge na bibliografia relevante, mas também dos ensinamentos dos titulares e operadores das fontes, dos possíveis riscos adicionais para cada instalação, local de trabalho e equipamentos. Adicionalmente, permitiu reforçar a mais valia da implementação de um sistema de proteção radiológica no estabelecimento de normas de segurança de referência que orientem o quadro legal nacional e internacional, uma vez que através destes estudos e dos procedimentos de controlo administrativo prévio, as autoridades competentes podem recolher um conjunto significativo de dados relativos às práticas prevalentes, por forma a tecerem orientações para os titulares das mesmas e a adequar a exigência do controlo regulador inerente, nomeadamente na diferenciação de práticas sujeitas a registo, a licença, a mera comunicação prévia ou ainda elegíveis para obterem uma aprovação de tipo para efeitos de isenção.

A Diretiva 2013/59/Euratom e o Decreto-Lei N.º 108/2018 definem as exposições potenciais e indicam que estas devem ser tidas em conta na avaliação prévia de segurança para determinação do

risco radiológico decorrente da exposição dos trabalhadores. No entanto, não providenciam orientações acerca de como deve ser tida em conta a natureza probabilística dos cenários potenciais, nomeadamente os erros humanos e as falhas nos equipamentos. Como tal, espera-se que futuramente surjam orientações nesse sentido e direcionadas para os diversos tipos de práticas e âmbitos de aplicação das mesmas.

Estas futuras orientações poderão ter como base os achados do sistema de registo e análise de eventos significativos implementados pelos titulares de práticas sujeitas a controlo regulador através de licença, por forma a que se estabeleça um método de eleição para avaliação da magnitude e probabilidade de exposições potenciais, com um grau de exigência e pormenor ajustado ao risco associado a cada tipo de fontes de radiação, atividades e instalações.

Até à divulgação de orientações concretas e do estabelecimento de métodos de eleição para a análise do risco radiológico e avaliação da probabilidade e magnitude das exposições potenciais, opta-se por realizar uma estimativa empírica da probabilidade de ocorrência de cada cenário equacionado, por forma a aferir se as doses potenciais são ou não contabilizadas nas classificações finais dos trabalhadores e dos locais de trabalho. Desta forma, o presente estudo considerou as doses de todos os cenários que se perspetivou que pudessem ter, pelo menos, uma ocorrência anual, com vista a ser empregue uma metodologia conservadora.

Foi ainda verificado que alguns equipamentos cujos trabalhadores foram classificados como membros do público e cujos locais de trabalho não foram classificados radiologicamente se encontram isentos de controlo regulador noutros países, em cumprimento do Artigo 26.º (2) da Diretiva 2013/59/Euratom que estabelece que os Estados-Membros podem isentar práticas desde que se cumpra, cumulativamente, o seguinte:

1. Os riscos radiológicos estimados sejam reduzidos de forma a que não sejam justificados os procedimentos administrativos inerentes, o que inclui os recursos humanos mobilizados e o tempo despendido com a análise do processo e de todos os elementos que devem ser apresentados;
2. A prática deve ser justificada;
3. A prática deve ser intrinsecamente segura.

O Artigo 20.º (2) do Decreto-Lei N.º 108/2018 corrobora com este cenário de adaptação do controlo regulador de forma proporcional à magnitude e probabilidade de ocorrência de exposições potenciais.

Assim, estas práticas que envolvem a aplicação de um aparelho elétrico para fins de geração de raios X, poderão ser eventualmente sujeitas a controlo regulador através de registo ou enquadradas na isenção prevista no Artigo 23.º (1) (d), mediante uma aprovação de tipo de aparelho a ser concedida pela autoridade competente. O requerimento de aprovação para efeitos de isenção deverá ser apresentado diretamente pelo fabricante. A concessão da aprovação de tipo terá em conta, não só as características técnicas do equipamento, mas também a estratégia seguida no âmbito da regulação

nacional. O outro requisito para a concessão de isenção consiste na inexistência de débitos de dose superiores a  $1 \mu\text{Sv/h}$  à distância de 0,1 m de qualquer superfície acessível dos aparelhos quando colocados a operar em condições normais de funcionamento, comprovado pelos testes de aceitação realizados no âmbito da avaliação prévia de segurança.

Pretende-se, futuramente, incluir nestas avaliações uma probabilidade de ocorrência na exposição potencial com base em achados da revisão da literatura disponível. Para os cenários potenciais identificados para os quais for identificada uma falta de dados, poder-se-á trabalhar com uma distribuição de probabilidade, segundo uma distribuição dada, que conseqüentemente conduzirá a uma classificação dos locais de trabalho e dos trabalhadores dependente de uma probabilidade de risco aceite.

Como sugestão de trabalho futuro menciona-se a possível inclusão de outras fontes utilizadas em contexto industrial e que representam maior risco radiológico, nomeadamente as instalações de irradiação, radiografia industrial que não recorre a cabines autoblindadas e gamagrafia industrial. Seria igualmente relevante a aferição do impacto das exposições potenciais para práticas da área médica com um risco radiológico superior como a radioterapia, que envolve geradores que operam até dezenas de MeV e a medicina nuclear, que envolve a manipulação e administração de fontes não seladas a pacientes, com um constante potencial de contaminação interna e externa.

Por último, sugere-se a realização de estudos que avaliem a aplicação de diversas técnicas de análise de risco disponíveis, como análises de modo de falhas e efeitos (FMEA), estudo de perigos e operabilidade (HAZOP), análise de árvore de falhas (FTA) ou a aplicação de matrizes de risco, por forma a identificar as mais adequadas para cada tipo de prática e risco radiológico associado, e para que práticas poderá ser dispensada a tua aplicação.



## Referências bibliográficas

1. Carvalho FP. A Radioactividade no Ambiente, Radionuclidos de origem natural e artificial. Instituto Tecnológico e Nuclear; Departamento de Protecção Radiológica e Segurança Nuclear: 2000.
2. International Atomic Energy Agency. Safety Assessment for Facilities and Activities. General Safety Requirements No. GSR Part 4 (Rev. 1). 2016.
3. International Atomic Energy Agency. Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Series No. SF-1. 2006.
4. Liu SZ. Biological effects of low level exposures to ionizing radiation: theory and practice. Hum Exp Toxicol. 2010 Apr;29(4):275-81.
5. Diário da República. Decreto-Lei n.º 108/2018. 2018; 232: 5490-5543.
6. Conselho da União Europeia. Diretiva 2013/59/Euratom do Conselho. Jornal Oficial da União Europeia. 2013.
7. International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 64. Protection from Potential Exposure: A Conceptual Framework. 1993; 23(1): 1-20.
8. Consejo de Seguridad Nuclear. Tema 10: Protección Radiológica Operacional. IRD-DR-GR\_TX-T10. 2009; 1-20.
9. Lazo E. Evolution of the Radiological Protection System and its Implementation. Health Phys. 2016 Feb;110(2):147-50.
10. International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 103. 2007.
11. Boyd MA. A regulatory perspective on whether the system of radiation protection is fit for purpose. 2012. Elsevier.
12. Kang KW. History and Organizations for Radiological Protection. J Korean Med Sci. 2016 Feb;31 Suppl 1:S4-5.
13. Meruje MM. Organismos Internacionais Protecção Radiológica e Segurança Nuclear e Direito Nuclear. Curso de Protecção e Segurança Radiológica. Campus Tecnológico e Nuclear, 24 de Maio de 2018.
14. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3 No. GSR Part 3. Viena: IAEA; 2014. [Available from: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1578\\_web-57265295.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf)]
15. Turner J. Atoms, Radiation, and Radiation Protection. 3 ed. Oak Ridge: Wiley; 2007.
16. Diário da República. Portaria n.º 137/2019 de 10 de Maio. Diário da República. 2019;90:8–10.
17. International Commission on Radiological Protection. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. 1996. [Available from: [https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB\\_26\\_3-4](https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_26_3-4)]
18. International Atomic Energy Agency. Occupational Radiation Protection. General Safety. Guide No. GSG-7. Viena: IAEA; 2018. [Available from: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1785\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1785_web.pdf)]

19. Kortensniemi M, Siiskonen T, Kelaranta A, Lappalainen K. Actual and potential radiation exposures in digital radiology: analysis of cumulative data, implications to worker classification and occupational exposure monitoring. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017; 174(1):141-146.
20. Agência Portuguesa do Ambiente. FAQ – Práticas que não envolvem exposições médicas [Web page]. 2021. [cited 2021 25 oct]; [Available from: <https://apambiente.pt/node/1136#>]
21. International Atomic Energy Agency. Safety of Radiation Generators and Sealed Radioactive Sources. IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.10. Viena: IAEA; 2006. [Available from: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1258\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1258_web.pdf)]
22. Agência Portuguesa do Ambiente. Licenciamento [Web page]. 2021. [cited 2021 25 oct]; [Available from: <https://apambiente.pt/prevencao-e-gestao-de-riscos/licenciamento>]
23. International Atomic Energy Agency. Safety assessment plans for authorization and inspection of radiation sources: IAEA 1999 IAEA-TECDOC-1113. 1999.
24. Agência Portuguesa do Ambiente. Breve introdução à proteção radiológica [Web page]. 2021. [cited 2021 25 oct]; [Available from: <https://apambiente.pt/prevencao-e-gestao-de-riscos/breve-introducao-protECAo-radiologica>]
25. Direção-Geral da Saúde. Vigilância da saúde dos trabalhadores expostos a radiação ionizante – Guia Técnico n.º 1 / Programa Nacional de Saúde Ocupacional: 2.º Ciclo – 2013/2017. Lisboa: DGS; 2016.
26. Diário da República. Decreto-Lei n.º 227/2008 de 25 de Novembro. Diário da República. 2008;229:8467–8471.
27. Waltar A. The Medical, Agricultural, and Industrial Applications of Nuclear Technology. 2003. Available from: <https://www.laradioactive.com/site/pages/RadioPDF/Waltar.pdf>
28. International Atomic Energy Agency. Radiation Safety in Industrial Radiography. Specific Safety Guide No. SSG-11. 2011. [Available from: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1466\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1466_web.pdf)]
29. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Detección y medida de la radiación. 2021.
30. Rios P, Rios D. Estudo de exposições em situações de incidentes envolvendo geradores de raios X de uso industrial. *Braz. J. Rad. Sci.* 2016; 03-2A; 1-13.
31. Agilent Technologies. Agilent Technologies Electron Capture Detectors (ECDs). 2nd ed. Wilmington: Agilent Technologies, Inc.; 2007.
32. Felizzola J, Costa C, Vasconcelo S. Passo a Passo para o Uso do Cromatógrafo Gasoso Modelo GC-CP3800 Varian para Análises de Gases de Efeito Estufa (GEEs). 1st ed. Belém: Embrapa Amazônia Oriental; 2014.
33. International Atomic Energy Agency. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material 2018 Edition. Specific Safety Requirements No. SSR-6 (Rev. 1). 2018. [Available from: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1798\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1798_web.pdf)]
34. Darrar AS, Mahmoud R, EzzEl-Din M, Khalaf A, Mostafa A. Risk assessment for occupational potential exposure at cobalt teletherapy units. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2019; 12: 140-146.

35. United States Nuclear Regulatory Commission. Consolidated Guidance About Materials Licenses Program-Specific Guidance About Fixed Gauge Licenses. [Available from: <https://www.nrc.gov/docs/ML1618/ML16188A048.pdf>]
36. International Atomic Energy Agency. Radiation Safety in the Use of Nuclear Gauges. Specific Safety Guide No. SSG-58. 2020. [Available from: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1881\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1881_web.pdf)]
37. Endress+Hauser. Radiation Safety and Technical Reference Manual U.S. General and Specific Licensees For Radiation Source Containers FQG61, FQG62. [Available from: [https://portal.endress.com/wa001/dla/5000304/5289/000/01/SD00293FEN\\_1310.pdf](https://portal.endress.com/wa001/dla/5000304/5289/000/01/SD00293FEN_1310.pdf)]
38. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. Portable Density/Moisture Gauges Containing Radioactive Sources. 2004. [Available from: <https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/rps/rps5.pdf>]
39. United States Nuclear Regulatory Commission. Consolidated Guidance About Materials Licenses. Program-Specific Guidance About Portable Gauge Licenses. 2016. [Available from: <https://www.nrc.gov/docs/ML1617/ML16175A375.pdf>]
40. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. Australian Radiation Incident Register. Annual Report 1 January 2016 to 31 December 2016. 2017. [Available from: <https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/arir2016.pdf>]
41. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. Australian Radiation Incident Register. Annual Report 1 January 2017 to 31 December 2017. 2018. [Available from: [https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/arir\\_-\\_annual\\_summary\\_report\\_2017\\_final.pdf](https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/arir_-_annual_summary_report_2017_final.pdf)]
42. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. Summary Of Radiation Incidents: 1 January To 31 December 2009. 2010. [Available from: <https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/RadiationProtection/arir/arir2009.pdf>]
43. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. Australian Radiation Incident Register. Summary of Radiation Incidents 1 January 2012 to 31 December 2012. 2013. [Available from: <https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/RadiationProtection/arir/arir2012.pdf>]
44. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. Australian Radiation Incident Register. Summary of Radiation Incidents 1 January 2013 to 31 December 2013. 2014. [Available from: <https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/RadiationProtection/arir/arir2013.pdf>]
45. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. Australian Radiation Incident Register. Summary of Radiation Incidents 1 January 2014 to 31 December 2014. 2015. [Available from: <https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/RadiationProtection/arir/arir2014.pdf>]

46. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. Australian Radiation Incident Register. Summary of Radiation Incidents 1 January 2015 to 31 December 2015. 2016. [Available from: <https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/RadiationProtection/arir/arir2015.pdf>]
47. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. Australian Radiation Incident Register. Annual Report 1 January 2018 to 31 December 2018. 2020. [Available from: <https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/arir2016.pdf>]
48. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. Australian Radiation Incident Register. Annual Report 1 January 2019 to 31 December 2019. 2021. [Available from: <https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/arir2016.pdf>]
49. Martin J. Physics for Radiation Protection. 3rd ed. USA: Wiley; 2013.
50. International Atomic Energy Agency. Live Chart of Nuclides. [Web]. [Available from: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>]
51. Carboneau M, Adams J. National Low-Level Waste Management Program Radionuclide Report Series Volume 10: Nickel-63. Idaho: Idaho National Engineering Laboratory: 1995.
52. Delacroix D, Guerre JP, Leblanc P, Hickman C. Radionuclide and Radiation Protection Data Handbook 2002. 2nd ed. Kent; Nuclear Technology Publishing: 2002.
53. Environmental Health & Safety University of Missouri. Radionuclide data sheet Nickel-63. 2005. [Available from: <https://ehs.missouri.edu/sites/ehs/files/pdf/isotopedata/ni-63.pdf>]
54. Shapiro J. Radiation Protection. A guide for scientists, regulators, and physicians. 4th ed. USA; Harvard University Press: 2002.
55. Shores E. Contact Dose Equivalent Rates from Common Neutron Sources. 2000. [Available from: <https://www.osti.gov/servlets/purl/764059>]
56. International Organization for Standardization. Radiation protection — Sealed sources — Leakage test methods. ISO 9978:2020. 2nd ed. 2020.
57. International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 119 Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. 2012.

## Anexos

### A – Exemplo da estimativa das exposições ocupacionais e potenciais para a prática que envolve fontes radioativas seladas incorporadas num gamadensímetro

Tabela A.1. – Estimativa das exposições dos trabalhadores devido à normal operação, transporte e armazenamento do equipamento.

<b>Descrição dos cenários de exposição em condições normais de funcionamento</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>· Operação e transporte do equipamento;</li><li>· Permanência ou passagem pelas zonas envolventes ao local de armazenamento do equipamento portador das fontes radioativas seladas no decorrer das normais atividades laborais, incluindo a deslocação normal e rotineira pela instalação.</li></ul>
<b>Estimativa das doses envolvidas</b>	<p>Duração dos cenários de aproximação à fonte de radiação:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>· Operação: 10 minutos/semana a 1 m do equipamento;</li><li>· Transporte: 15 minutos/semana a 0,3 m da embalagem de transporte;</li><li>· Armazenamento: 40 h/semana a 2 m do contentor de armazenamento.</li></ul> <p>Assim, estima-se a seguinte dose efetiva anual, considerando a contribuição dos dois tipos de radiação envolvidos, neutrões e radiação eletromagnética:</p> $E_{\text{anual}} = 50 \text{ semanas} \times (0,8 \mu\text{Sv/sem} + 9,5 \mu\text{Sv/sem} + 11,6 \mu\text{Sv/sem}) = 1095 \mu\text{Sv/ano} = 1,095 \text{ mSv/ano}$

Nota: considerou-se como “duração máxima” de aproximação ao equipamento o dobro do tempo declarado pelo titular.

Classificação dos profissionais com base nas exposições normais: trabalhadores expostos de categoria B.

Tabela A.2 – Descrição dos cenários de exposição potencial.

Cenários	Descrição dos cenários de exposição potencial
<b>Erro humano</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Falha do trabalhador no seguimento dos protocolos de utilização do equipamento e dos procedimentos de segurança da instalação;</li> <li>· Exposição por aproximação inadvertida ao equipamento;</li> <li>· Falha na deteção de danos no equipamento;</li> <li>· Transporte do equipamento sem que este seja colocado na caixa destinada para o efeito;</li> <li>· Transporte do equipamento na embalagem de transporte, sem que seja mantida a distância de segurança recomendada;</li> <li>· Permanência junto ao contentor de armazenamento do equipamento portador das fontes seladas;</li> <li>· Utilização da fonte radioativa selada para além do tempo de vida recomendado pelo fabricante, aumentando o risco de deterioração da hermeticidade do encapsulamento e conseqüente risco de fuga e contaminação radioativa.</li> </ul>
<b>Degradação do sistema de recolha da fonte radioativa selada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Existência de corrosão na haste e no bloco deslizante de tungsténio;</li> <li>· Impossibilidade mecânica de retornar a fonte à posição de segurança, expondo um profissional de forma acidental;</li> <li>· Necessidade de intervenção de um profissional para repor a recolha da fonte.</li> </ul>
<b>Sismos, condições climatéricas extremas, corrosão, choques mecânicos, queda de cargas pesadas ou esmagamento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Possível degradação da blindagem do equipamento portador das fontes radioativas seladas ou desalojamento da fonte radioativa selada por via de:               <ul style="list-style-type: none"> <li>5) choques mecânicos acidentais;</li> <li>6) esmagamento do equipamento portador das fontes seladas;</li> <li>7) a natural corrosão da estrutura envolvente do equipamento;</li> <li>8) operação ou armazenamento do equipamento portador das fontes sob condições climatéricas extremas e não as recomendadas pelo fabricante.</li> </ul> </li> </ul>
<b>Falha e avaria dos equipamentos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Falha do monitor portátil de área, evitando a deteção de uma situação de exposição acidental;</li> <li>· Não realização da verificação metrológica do monitor portátil de área com a periodicidade mínima legalmente obrigatória;</li> <li>· Falha do gamadensímetro e das medições que realiza, com conseqüente repetição de ensaios.</li> </ul>
<b>Incêndio ou explosão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Potencial comprometimento da blindagem do contentor de armazenamento do equipamento ou do próprio equipamento;</li> <li>· Destruição do encapsulamento das fontes radioativas seladas com libertação do material radioativo, podendo dar origem a exposição interna por ingestão ou inalação, exposição externa por contaminação externa e ainda a contaminação do meio ambiente envolvente à instalação.</li> </ul>

Tabela A.3 – Matriz de risco.

$f_H$	$P_H$	$C_{VH}$	$R_{VH}$	$f_H$	$P_H$	$C_H$	$R_{VH}$	$f_H$	$P_H$	$C_M$	$R_H$	$f_H$	$P_H$	$C_L$	$R_M$
$f_M$	$P_H$	$C_{VH}$	$R_{VH}$	$f_M$	$P_H$	$C_H$	$R_H$	$f_M$	$P_H$	$C_M$	$R_H$	$f_M$	$P_H$	$C_L$	$R_M$
$f_L$	$P_H$	$C_{VH}$	$R_H$	$f_L$	$P_H$	$C_H$	$R_H$	$f_L$	$P_H$	$C_M$	$R_M$	$f_L$	$P_H$	$C_L$	$R_M$
$f_{VL}$	$P_H$	$C_{VH}$	$R_H$	$f_{VL}$	$P_H$	$C_H$	$R_H$	$f_{VL}$	$P_H$	$C_M$	$R_M$	$f_{VL}$	$P_H$	$C_L$	$R_M$
$f_H$	$P_M$	$C_{VH}$	$R_{VH}$	$f_H$	$P_M$	$C_H$	$R_H$	$f_H$	$P_M$	$C_M$	$R_H$	$f_H$	$P_M$	$C_L$	$R_M$
$f_M$	$P_M$	$C_{VH}$	$R_H$	$f_M$	$P_M$	$C_H$	$R_H$	$f_M$	$P_M$	$C_M$	$R_M$	$f_M$	$P_M$	$C_L$	$R_M$
$f_L$	$P_M$	$C_{VH}$	$R_H$	$f_L$	$P_M$	$C_H$	$R_H$	$f_L$	$P_M$	$C_M$	$R_M$	$f_L$	$P_M$	$C_L$	$R_L$
$f_{VL}$	$P_M$	$C_{VH}$	$R_H$	$f_{VL}$	$P_M$	$C_H$	$R_M$	$f_{VL}$	$P_M$	$C_M$	$R_M$	$f_{VL}$	$P_M$	$C_L$	$R_L$
$f_H$	$P_L$	$C_{VH}$	$R_H$	$f_H$	$P_L$	$C_H$	$R_H$	$f_H$	$P_L$	$C_M$	$R_M$	$f_H$	$P_L$	$C_L$	$R_L$
$f_M$	$P_L$	$C_{VH}$	$R_H$	$f_M$	$P_L$	$C_H$	$R_H$	$f_M$	$P_L$	$C_M$	$R_M$	$f_M$	$P_L$	$C_L$	$R_L$
$f_L$	$P_L$	$C_{VH}$	$R_M$	$f_L$	$P_L$	$C_H$	$R_M$	$f_L$	$P_L$	$C_M$	$R_M$	$f_L$	$P_L$	$C_L$	$R_L$
$f_{VL}$	$P_L$	$C_{VH}$	$R_M$	$f_{VL}$	$P_L$	$C_H$	$R_M$	$f_{VL}$	$P_L$	$C_M$	$R_M$	$f_{VL}$	$P_L$	$C_L$	$R_L$
$f_H$	$P_{VL}$	$C_{VH}$	$R_H$	$f_H$	$P_{VL}$	$C_H$	$R_M$	$f_H$	$P_{VL}$	$C_M$	$R_M$	$f_H$	$P_{VL}$	$C_L$	$R_L$
$f_M$	$P_{VL}$	$C_{VH}$	$R_M$	$f_M$	$P_{VL}$	$C_H$	$R_M$	$f_M$	$P_{VL}$	$C_M$	$R_M$	$f_M$	$P_{VL}$	$C_L$	$R_L$
$f_L$	$P_{VL}$	$C_{VH}$	$R_M$	$f_L$	$P_{VL}$	$C_H$	$R_L$	$f_L$	$P_{VL}$	$C_M$	$R_L$	$f_L$	$P_{VL}$	$C_L$	$R_L$
$f_{VL}$	$P_{VL}$	$C_{VH}$	$R_M$	$f_{VL}$	$P_{VL}$	$C_H$	$R_L$	$f_{VL}$	$P_{VL}$	$C_M$	$R_L$	$f_{VL}$	$P_{VL}$	$C_L$	$R_L$

A matriz de risco permite determinar o nível de risco (R) da prática a licenciar, a partir da combinação dos diferentes níveis das variáveis independentes que, neste caso, são a frequência de ocorrência do cenário (f), a probabilidade de falha das barreiras de segurança ou medidas preventivas (P) e a magnitude das consequências (C).

Indicam-se abaixo os critérios utilizados para cada uma das variáveis e os seus diferentes níveis:

*Tabela A.4 – Critérios para atribuir níveis de frequência, de probabilidade de falha das barreiras, da magnitude das consequências e do risco.*

		<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>Frequência de ocorrência</b>	Muito baixa	$f_{VL}$	$f_{VL} < 1$ evento/100 anos
	Baixa	$f_L$	$1$ evento/100 anos $\leq f_L < 1$ evento/ano
	Média	$f_M$	$1$ evento/ano $\leq f_M < 50$ eventos/ano
	Elevada	$f_H$	$f_H \geq 50$ eventos/ano
<b>Probabilidade de falha</b>	Muito baixa	$P_{VL}$	Existem barreiras suficientes ( $> 3$ ), sendo que a sua falha se considera quase impossível
	Baixa	$P_L$	Existência de 3 barreiras de segurança, considerando-se a possibilidade de falha da última
	Média	$P_M$	Existe 1 ou 2 barreiras de segurança
	Elevada	$P_H$	Ausência de barreiras de segurança
<b>Magnitude das consequências</b>	Baixo	$C_L$	Não se verificam efeitos nos trabalhadores expostos ou em membros do público
	Médio	$C_M$	As doses envolvidas na exposição superam os limites de dose previstos para esse indivíduo, mas são inferiores às que provocam efeitos determinísticos, resultando num aumento da probabilidade de ocorrência de efeitos estocásticos
	Elevado	$C_H$	Ocorrência de efeitos determinísticos, que não representam perigo à vida humana e não são permanentes
	Muito elevada	$C_{VH}$	Verificam-se efeitos biológicos determinísticos muito graves que podem ser fatais ou resultar em incapacidade permanente
<b>Risco</b>	Baixo	$R_L$	Risco aceitável e/ou desprezável
	Médio	$R_M$	Risco tolerável
	Elevado	$R_H$	Risco inaceitável a longo prazo, exige a tomada de medidas corretivas para redução do mesmo
	Muito elevado	$R_{VH}$	Risco eminente, considerado inaceitável



Tabela A.5 – Estimativa da probabilidade de ocorrência de exposições potenciais e respetiva magnitude devido à utilização de medidores nucleares portáteis com fontes radioativas seladas de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{241}\text{Am:Be}$ .

Cenário	f	P	C	R
Erro humano	$f_M$	$P_L$	$C_L$	$R_L$
Degradação do sistema de recolha da fonte radioativa selada	$f_L$	$P_M$	$C_L$	$R_L$
Sismos, condições climatéricas extremas, corrosão, choques mecânicos, queda de cargas pesadas ou esmagamento	$f_L$	$P_M$	$C_L$	$R_L$
Falha e avaria dos equipamentos	$f_L$	$P_M$	$C_L$	$R_L$
Incêndio ou explosão	$f_L$	$P_M$	$C_L$	$R_L$

#### a) Erro humano

Apesar de até então não terem sido reportados incidentes semelhantes na operação deste equipamento na presente instalação, sabe-se que erros humanos são os mais suscetíveis de ocorrer, pelo que se considerou uma probabilidade de ocorrência média ( $f_M$ ).

No entanto, salienta-se que a formação adequada, a utilização permanente do monitor portátil de área aquando da operação do equipamento, a utilização de cadeados na embalagem de transporte e contentor de armazenamento do equipamento e ainda a delimitação e sinalização da área aquando da operação do equipamento, poderão ser responsáveis por evitar este tipo de incidentes ou permitir a sua deteção atempada ( $P_L$ ).

Para estimativa das doses decorrentes de uma exposição potencial devido a erro humano, consideraram-se os cenários de contacto direto com a superfície do equipamento e contacto direto com a superfície da embalagem de transporte do equipamento.

Considerando os débitos de equivalente de dose ambiente determinados ao contacto com a superfície do equipamento e da sua embalagem de transporte, determinam-se os seguintes tempos máximos de permanência para que seja atingido o limite de 6 mSv/ano:

- Ao contacto com o equipamento: 39,5 horas/ano;
- Ao contacto com a embalagem de transporte: 106 horas/ano.

#### b) Degradação do sistema de recolha da fonte radioativa selada

Considerou-se que o impedimento da recolha da fonte radioativa sem que o equipamento tenha sofrido qualquer tipo de choque mecânico apresenta uma baixa probabilidade de ocorrência ( $f_L$ ).

O armazenamento e operação do equipamento nas condições estipuladas pelo fabricante e o cumprimento de todas as verificações periódicas de segurança e manutenções preventivas são possíveis ações que o poderão prevenir ( $P_M$ ).

As doses potenciais devido à degradação do sistema de recolha da haste que contém a fonte radioativa selada poderão ser devidas a:

- Contacto direto com a superfície do equipamento devido a tentativas de retornar da fonte ao equipamento portador;
- Exposição ao feixe direto.

Considerando os débitos de equivalente de dose ambiente determinados ao contacto com a superfície do equipamento e a 1 m do equipamento caído em modo de transmissão direta (feixe direto), determinam-se os seguintes tempos máximos de permanência para que seja atingido o limite de 6 mSv/ano:

- Ao contacto com o equipamento: 39,5 horas/ano;
- A 1 m do feixe direto da fonte de Cs-137: 160 horas/ano.

**c) Sismos, condições climatéricas extremas, corrosão, choque mecânico, queda de cargas pesadas, esmagamento, incêndio ou explosão**

Considerou-se que a existência de condições climatéricas extremas, sismos, corrosão, choques mecânicos, queda de cargas, esmagamento, incêndio ou explosão apresentam uma baixa probabilidade de ocorrência ( $f_L$ ).

Todas as medidas de segurança adotadas aquando da operação do equipamento, como a colocação de sinalização, delimitação da área de intervenção, supervisão constante do equipamento, poderão reduzir a probabilidade de ocorrência de choques mecânicos, queda de cargas sobre o equipamento portador das fontes radioativas seladas ou o seu esmagamento.

Eventos como sismos ou condições climatéricas extremas não podem ser evitados, no entanto, os trabalhadores devem respeitar as condições de operação do equipamento recomendadas pelo fabricante e não devem removê-lo do contentor de armazenamento se tiverem conhecimento da existência de alertas acerca de previsões de condições climatéricas extremas ou de sismos.

Adicionalmente, deve-se evitar operar o equipamento em atmosferas ATEX ou em locais de difícil acesso em caso de incêndio, ou que não possuam extintores nas suas imediações.

Considerou-se uma probabilidade média de falha das barreiras de segurança e/ou das medidas de mitigação destas situações ( $P_M$ ).

As doses potenciais devidas a este tipo de eventos poderão ser devidas à perda de blindagem das fontes incorporadas no equipamento ou à deterioração do seu encapsulamento com consequente fuga radioativa.

As doses potenciais resultantes da perda de blindagem das fontes seladas podem ser determinadas, no pior cenário, com recurso à aproximação de fonte pontual.

No caso da fonte radioativa selada que contém o radionuclídeo Cs-137, tem-se que:

$$\dot{D} = \frac{A \times \Gamma}{d^2},$$

onde  $\dot{D}$  é o débito de dose,  $A$  a atividade atual da fonte,  $\Gamma$  é a constante de exposição para o radionuclídeo em causa e  $d$  a distância à fonte.

Sabendo que a constante de exposição para o  $^{137}\text{Cs}$  é de  $9,63 \times 10^{-5}$  mSv/h/MBq a 1 m:

$$\dot{D} = \frac{300 \times 9,63 \times 10^{-5}}{1^2} = 0,029 \text{ mSv/h @ 1 m}$$

Determina-se um tempo máximo de 206 horas/ano a 1 m da fonte sem qualquer blindagem até ser atingido o limite de 6 mSv.

Adicionalmente, o débito de dose devido a neutrões a 1 m de uma fonte selada de  $^{241}\text{Am}:\text{Be}$  é de 1,7 mrem/h/Ci.

$$1,7 \text{ mrem/h} = 0,017 \text{ mSv/hr}$$

$$1480 \text{ MBq} = 0,04 \text{ Ci}$$

$$\dot{D} = 0,017 \times 0,04 = 0,00068 \text{ mSv/h}$$

Não se determina um tempo máximo de exposição a 1 m da fonte de  $^{241}\text{Am}:\text{Be}$  sem qualquer blindagem uma vez que o limite anual de dose efetiva para trabalhadores de categoria B só seria ultrapassado após uma exposição com uma duração superior ao tempo estimado de 2 000 horas de trabalho anuais.

Considerou-se ainda o cenário que envolve a perda de hermeticidade das fontes radioativas seladas e que pode originar potenciais cenários de contaminação interna.

Para o  $^{137}\text{Cs}$ , a dose efetiva por ingestão é de  $1,3 \times 10^{-8}$  Sv/Bq e por inalação é de  $6,7 \times 10^{-9}$  Sv/Bq, e a para o  $^{241}\text{Am}$  são de  $2,0 \times 10^{-7}$  Sv/Bq e de  $3,9 \times 10^{-5}$  Sv/Bq, respetivamente.

Para estes cenários de ingestão e inalação, considerou-se a atividade correspondente ao critério de suspensão de um ensaio de hermeticidade para uma fonte radioativa selada de 200 Bq (ISO 9978:2020).

$$\text{Ingestão de } ^{137}\text{Cs: } E(50) = e \times A = 1,3 \times 10^{-8} \times 200 = 2,6 \mu\text{Sv}$$

$$\text{Inalação de } ^{137}\text{Cs: } E(50) = e \times A = 6,7 \times 10^{-9} \times 200 = 1,3 \mu\text{Sv}$$

$$\text{Ingestão de } ^{241}\text{Am: } E(50) = e \times A = 2,0 \times 10^{-7} \times 200 = 40 \mu\text{Sv}$$

$$\text{Inalação de } ^{241}\text{Am: } E(50) = e \times A = 2,7 \times 10^{-5} \times 200 = 5\,400 \mu\text{Sv}$$

#### **d) Falha e avaria dos equipamentos**

Considerou-se que falhas do monitor portátil de área e do próprio gamadensímetro apresentam uma baixa probabilidade de ocorrência ( $f_L$ ) em função das medidas preventivas evidenciadas, nomeadamente o cumprimento do plano de manutenção, a implementação do programa de garantia da qualidade e a verificação metrológica do monitor portátil de área portátil com a devida periodicidade ( $P_L$ ).

#### **e) Incêndio e explosão**

As fontes de  $^{241}\text{Am:Be}$  e  $^{137}\text{Cs}$  consideradas, são classificadas como sendo de categoria 4. O que significa que, perante uma situação de dispersão de material radioativo devido a incêndio ou explosão, considera-se que não são admitidas lesões biológicas permanentes de acordo com a atividade do material radioativo em causa.

As doses potenciais decorrentes deste cenário poderão ser devidas à perda de hermeticidade das fontes e a sua estimativa encontra-se descrita na alínea c).

Adicionalmente, salienta-se que o  $^{241}\text{Am}$  faz parte do grupo de radionuclídeos com maior radiotoxicidade e devem ser adotadas todas e quaisquer medidas de prevenção e segurança que permitam reduzir a probabilidade de danos físicos provocados ao equipamento e à fonte selada, por forma a evitar uma possível contaminação interna por ingestão ou inalação.

Classificação final dos trabalhadores considerando os cenários de exposição potencial: trabalhadores expostos de categoria B.

## B – Exemplo da estimativa das exposições ocupacionais e potenciais para a prática de operação de geradores de radiação ionizante

Tabela B.1 – Estimativa das exposições dos trabalhadores devido ao normal funcionamento dos equipamentos geradores de radiação ionizante (inspetores de nível).

<b>Descrição dos cenários de exposição</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· A deslocação normal e rotineira pela instalação industrial pode resultar na passagem a uma distância igual ou superior a 1 metro dos equipamentos;</li> <li>· Permanência a uma distância igual ou superior a 1 m ao equipamento para supervisão do correto funcionamento da linha de produção ou para a realização de outras funções que tenham de ser realizadas na sala onde o equipamento opera;</li> <li>· Eventuais ações de manutenção corretiva e preventiva que exijam que a linha permaneça em funcionamento.</li> </ul>
<b>Estimativa das doses envolvidas</b>	<p>Considerou-se uma exposição de 40 h semanais, durante 50 semanas ao longo de um ano, a 1 m do equipamento no qual se obteve um maior débito semanal de equivalente de dose ambiente a esta distância.</p> $E_{\text{anual}} = 50 \text{ semanas} \times H^*(10)_{\text{semanal}} = 50 \times 3,9 \pm 1,2 = 195,0 \pm 60,0 \mu\text{Sv}$

Considerando unicamente as exposições normais, as quais não ultrapassaram o limite anual para membros do público de 1 mSv, não se classifica trabalhadores expostos de categoria A ou B.

Tabela B.2 – Descrição dos cenários de exposição potencial para a prática que envolve geradores de radiações ionizantes.

Cenário	Descrição dos cenários de exposição potencial
<b>Erro humano</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Falha no seguimento dos protocolos de utilização do equipamento e dos procedimentos de segurança;</li> <li>· Realização de operações/intervenções junto do equipamento de raios X sem a devida cessação de emissão do feixe;</li> <li>· Operação do equipamento por pessoal não autorizado, nomeadamente, sem formação específica em segurança e proteção radiológica;</li> <li>· Exposição de um indivíduo que se aproxime do feixe sem autorização, sem verificar a sinalização de emissão do feixe;</li> <li>· Colocação inadvertida de uma extremidade em contacto com a região que comporta maiores débitos de dose, em locais de entrada de produto ou ainda no feixe direto quando este se encontra acessível.</li> </ul>
<b>Falha do equipamento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Emissão de raios X sem que o operador dê essa indicação;</li> <li>· Falha dos <i>interlocks</i> de segurança que impedem o acesso ao feixe direto com conseqüente aumento do débito de dose no local de trabalho e possíveis exposições incidentais de corpo inteiro ou de extremidades no feixe direto, no caso dos equipamentos autoblindados;</li> <li>· Falha dos botões de emergência de cessação de feixe;</li> <li>· Falha nos sistemas de alarme e aviso luminoso de emissão de feixe e conseqüente realização de ações de operação e manutenção próximas do equipamento sem que haja aviso de que este se encontra a emitir raios X.</li> </ul>
<b>Sismos, condições climatéricas extremas, corrosão, choques mecânicos, queda de cargas pesadas ou esmagamento, incêndio, explosão</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Degradação da estrutura do equipamento com conseqüente possibilidade de perda de blindagem da ampola de raios X com conseqüente aumento da radiação de fuga e possível exposição ao feixe útil.</li> </ul>

### a) Exposição externa pela radiação primária: irradiação do feixe direto

#### Magnitude

Dos cenários considerados e descritos na tabela 6, aquele que comporta maior dose efetiva ou dose equivalente para a pele e extremidades seria o de exposição ao feixe direto.

Considerou-se um débito de dose de 17  $\mu\text{Sv/h}$  no feixe direto com base na medição realizada.

Dadas as características de concepção dos equipamentos e da prática, nomeadamente no que concerne às dimensões físicas das aberturas de entrada e saída de produto e onde se considera possível o acesso ao feixe primário, um cenário de irradiação pelo feixe primário não implicará uma exposição externa global de corpo inteiro homogénea, mas sim uma exposição localizada da parte do corpo que foi introduzida nessa abertura, nomeadamente as extremidades. Assim sendo, o mais indicado para este cenário será a referência ao limite de dose equivalente para as extremidades dos membros.

Com base neste valor, determina-se o seguinte tempo máximo de permanência no feixe útil para que seja atingido o limite de dose equivalente para a pele e extremidades para membros do público:

<b>Categoria de Exposição</b>	<b>Limite de dose equivalente para a pele</b>	<b>Tempo máximo de irradiação direta</b>
<b>Membros do público</b>	50 mSv/ano	2 941 h/ano

#### Probabilidade de Ocorrência

A avaliação da probabilidade de ocorrência de exposições potenciais é mais complexa. Não obstante, far-se-á esta avaliação na medida do possível.

Para este efeito, ter-se-á em consideração a categoria de exposição mais restritiva, a dos membros do público, e o respetivo limite de dose equivalente para a pele de 50 mSv/ano, o qual permitiu determinar uma duração máxima de irradiação externa ao feixe direto de 2 941 h/ano.

Conclui-se, de forma intuitiva, que será muito pouco provável, ou razoavelmente imprevisível, que ocorra mais que uma destas situações por ano, em termos de frequência, e também razoavelmente imprevisível que o cenário proposto da irradiação externa ao feixe direto possa ter a duração de 2941 h.

Estas conclusões intuitivas têm por base as medidas de prevenção implementadas na prática, principalmente ao nível dos controlos de engenharia nos próprios equipamentos (interrupção de emergência da irradiação), mas também de controlos administrativos:

Medidas de prevenção implementadas	Diminuição da Probabilidade de Ocorrência	Diminuição da Duração de uma Ocorrência
<u>Sinalização:</u>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Sinalização de segurança de aviso para radiações ionizantes (trifólio);</li> <li>Aviso de segurança:  <i>"Riscos Profissionais:</i>  Existência de radiação ionizante.  Prevenir o acidente:  Apenas pessoal autorizado pode intervir no equipamento.  Ter em atenção não danificar ou violar as proteções do equipamento.  Não colocar as mãos na zona de passagem de latas/garrafas.  Em caso de anomalia chamar de imediato a equipa de manutenção!"</li> <li>Sinalização luminosa de aviso para a irradiação;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•</li> <li>•</li> <li>•</li> </ul>	
<u>Dimensionais / Limitação física:</u>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Blindagem envolvente à ampola de raios X que diminui a radiação de fuga;</li> <li>Zona de acesso ao feixe direto com dimensões reduzidas pelo que, no máximo, permitiria a exposição de uma extremidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•</li> <li>•</li> </ul>	
<u>Atuação de Emergência:</u>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Botão de paragem de emergência (STOP);</li> <li>Chave de segurança;</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>•</li> <li>•</li> </ul>
<u>Controlos administrativos:</u>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Controlo de acesso a pessoas não autorizadas;</li> <li>Formação dos trabalhadores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•</li> <li>•</li> </ul>	

#### b) Exposição externa pela radiação secundária: radiação dispersa e de fuga

Considera-se agora o cenário de permanência de um operador na posição exterior ao equipamento que registou os maiores débitos de equivalente de dose ambiente a 1 m.

#### Magnitude

Considerando o caso extremo de ocupação permanente neste local durante 40h semanais, 50 semanas por ano, a dose efetiva máxima obtida seria de:

$$E = 0,1 \mu\text{Sv/h} \times 40 \text{ h/sem} \times 50 \text{ sem/ano} = 0,2 \text{ mSv/ano} < 1 \text{ mSv/ano p/ Membros do Público}$$



### **Probabilidade de Ocorrência**

Em termos realísticos, não se prevê que se verifique uma ocupação humana de 40h semanais nestes locais, por constrangimentos do próprio desempenho de funções dos trabalhadores, mas o cenário serve para uma estimativa conservadora da magnitude de exposição dos trabalhadores.

Uma vez que até então não foram reportados incidentes semelhantes na realização da prática referida, considerou-se que estes eventos possam ter uma probabilidade de ocorrência baixa ( $1 \text{ evento}/100 \text{ anos} \leq \text{Probabilidade de ocorrência} < 1 \text{ evento/ano}$ ).

Considerando adicionalmente a contribuição das exposições potenciais, as exposições ocupacionais estimadas não ultrapassaram o limite anual para membros do público de 1 mSv, pelo que não se classificam trabalhadores expostos de categoria A ou B.