



Otimização da metodologia de monitoração *in vivo* de ^{123}I na tireoide em trabalhadores que atuam na produção de radiofármacos

Saraiva^a M. Q., Dantas^b A. L. A., Lucena^b E. A., Dantas^b B. M.

^a Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

^b Instituto de Radioproteção e Dosimetria - IRD – CNEN, 22783-127, Rio de Janeiro, Brasil

adantas@ird.gov.br

RESUMO

O ^{123}I é um radionuclídeo utilizado para diagnóstico em medicina nuclear. Sua produção em Centros de Radiofarmácia oferece risco de exposição externa e interna aos trabalhadores envolvidos nesta prática. O controle deste tipo de exposição, por meio da monitoração individual, é necessário para se estimar a magnitude das doses ocupacionais. O Laboratório de Monitoração “In Vivo” (LABMIV-IRD) desenvolve técnicas visando o atendimento da demanda por monitoração *in vivo* de trabalhadores. O presente trabalho descreve a calibração do detector HPGe para monitoração de ^{123}I na geometria tireoide em indivíduos ocupacionalmente expostos (IOEs). Para a obtenção da curva de calibração em Eficiência (cps/dps) vs Energia (keV), é utilizado um simulador de tireoide-pescoço, contendo atividade certificada de $^{166\text{m}}\text{Ho}$ homogeneamente distribuído, fornecido pelo laboratório de metrologia do IRD. A partir da curva de calibração, é calculado o fator de calibração específico para a quantificação de ^{123}I na tireoide. A sensibilidade da técnica é avaliada através da determinação da atividade mínima detetável (AMD), da incorporação mínima detetável (IMD) e da dose efetiva mínima detetável (DEMD). Foi obtido o fator de calibração de $0,0079 \pm 0,0001$ cps/dps, a AMD de 5 Bq, a IMD de $2,78 \times 10^6$ Bq e a DEMD de $3,23 \times 10^{-1}$ mSv. A técnica é suficientemente sensível para medição *in vivo* de ^{123}I na tireoide, podendo ser utilizada para monitoração de trabalhadores ocupacionalmente expostos a este radionuclídeo na produção de ^{123}I em centros de radiofarmácia.

Palavras-chave: dosimetria interna, monitoração *in vivo*, instrumentação nuclear, medicina nuclear

ABSTRACT

^{123}I is a radionuclide used for diagnosis in nuclear medicine. Its production in Radiopharmacy Centers poses a risk of external and internal exposure to the workers involved in this practice. Controlling this type of exposure through individual monitoring is necessary to estimate the magnitude of occupational doses. The *In Vivo* Monitoring Laboratory (LABMIV-IRD) develops techniques aimed at meeting the demand for *in vivo* monitoring of workers. This paper describes the calibration of a HPGe detection system for monitoring ^{123}I in thyroid geometry in occupationally exposed individuals (OEI). In order to obtain the calibration curve in Efficiency (cps/dps) vs Energy (keV), it is used a thyroid-neck phantom containing a certified activity of $^{166\text{m}}\text{Ho}$ homogeneously distributed. Based on the calibration curve it is calculated the specific calibration factor for the quantification of ^{123}I in the thyroid. The sensitivity of the technique is evaluated by determining the minimum detectable activity (MDA), minimum detectable intake (MDI) and minimum detectable effective dose (MDED). It was obtained a calibration factor of (0.0079 ± 0.0001) cps/dps, a MDA of 5Bq, a MDI of 2.78×10^6 Bq and a MDED of 3.23×10^{-1} mSv. The technique is sufficiently sensitive for *in vivo* measurement of ^{123}I in the thyroid and is suitable for the monitoring of workers occupationally exposed to this radionuclide in radiopharmaceutical production plants

Keywords: internal dosimeter, in vivo monitoring, nuclear instrumentation, nuclear medicine.

1. INTRODUÇÃO

A produção de radiofármacos utilizados em Medicina Nuclear no Brasil é uma atividade amplamente justificada do ponto de vista dos princípios de radioproteção, proporcionando um grande benefício social, contanto que sejam cumpridos os requisitos internacionais e as normas nacionais de segurança radiológica [1].

Os trabalhadores envolvidos nesta prática são reconhecidamente sujeitos a riscos de exposição ocupacional e, de acordo com recomendações internacionais, devem ser avaliados rotineiramente de forma a manter as exposições individuais tão baixas quanto razoavelmente possíveis [2].

A monitoração da exposição individual interna envolve monitoração indireta *in vitro* e direta no corpo humano, denominada monitoração *in vivo*, sendo esta última realizada em contadores de corpo inteiro, utilizando detectores de cintilação e semicondutores, requerendo ainda, o uso de

simuladores físicos antropomórficos para calibração e controle de qualidade dos sistemas de detecção [3,4]. A monitoração interna inclui também a interpretação de dados de bioanálise, quando são aplicados modelos biocinéticos e dosimétricos que permitem estimar as doses absorvidas pelos indivíduos expostos em decorrência da incorporação de radionuclídeos [5,6].

O sistema atual implementado no Laboratório de monitoração *in vivo* do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (LABMIV-IRD) para a monitoração de ^{123}I na geometria de tireoide foi calibrado com uma fonte padrão de ^{139}Ce . Este radionuclídeo possui uma meia vida física de aproximadamente 138 dias e energia gama de 165,85 keV. Por apresentar a energia de emissão gama próxima à energia do ^{123}I (159 keV) e uma meia vida física relativamente longa quando comparada ao ^{139}Ce tem sido utilizado para a calibração do sistema de monitoração segundo o protocolo atual. Nele, o fator de calibração para o ^{123}I é determinado tomando como referência a atividade equivalente deste radionuclídeo em relação à fonte padrão de ^{139}Ce [7]. Entretanto, ainda que o ^{139}Ce apresente uma margem de tempo adequada para a calibração do sistema, sua meia vida física não é suficientemente viável para a rotina de calibração implementada nos laboratórios pois implica na reposição periódica deste padrão por meio da importação da solução e calibração da mesma aqui no Brasil.

O $^{166\text{m}}\text{Ho}$ é um emissor multi-gama que possui uma meia vida física de 1200 anos. Por apresentar picos de emissão gama na faixa de baixas energias, ele pode ser utilizado para a calibração em eficiência do sistema de monitoração na geometria de tireoide, não apenas para o ^{123}I , mas também para outros radionuclídeos de emissão gama na faixa energética abaixo 200 keV. A combinação destas propriedades tornam o $^{166\text{m}}\text{Ho}$ uma alternativa viável e otimizada, em relação à fonte de ^{139}Ce .

O presente trabalho apresenta a metodologia de calibração da instrumentação, utilizando o radionuclídeo multi-gama emissor $^{166\text{m}}\text{Ho}$, e a avaliação da sensibilidade da técnica, objetivando a monitoração *in vivo* de ^{123}I em indivíduos ocupacionalmente expostos que atuam na produção de radiofármacos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O LABMIV dispõe de sistemas de detecção para medição de radionuclídeos emissores de fótons na faixa de 10 a 3000 keV, distribuídos uniformemente no corpo inteiro ou depositados em órgãos ou tecidos específicos.

Para medições de ^{123}I , na geometria tireoide (Figura 1), é utilizado o sistema de quatro detectores HPGe, marca Canberra ACT II, projetado para detecção de emissão de fótons na faixa de energia de 10 até 200 keV.

Figura 1: Sistema de detecção para a geometria de tireoide.



Para a obtenção da curva de calibração em Eficiência (cps/dps) vs Energia (keV), é utilizado um simulador de tireoide-pescoço com propriedades de atenuação semelhantes aos tecidos vivos (Figura 2), sendo este contaminado com atividade conhecida de $^{166\text{m}}\text{Ho}$ (energias gama em 48,80; 55,61; 80,57; 184,41 keV). Foram realizadas 3 repetições do procedimento de medição, no tempo de 30 minutos cada, e computados os valores de contagens líquidas nas regiões de interesse das energias avaliadas.

Figura 2: Simulador antropomórfico de tireoide-pescoço produzido no IRD.

A partir dos dados obtidos na medição do simulador, calculamos o fator de calibração específico para a quantificação de ^{123}I na tireoide, substituindo a energia de emissão do ^{123}I , 159 keV, na curva de eficiência experimental obtida. O limite de detecção da técnica é avaliado por meio da determinação da atividade mínima detetável (AMD) utilizando-se a seguinte equação:

$$AMD(Bq) = \frac{3+4,65\sqrt{N}}{(FC*T)} \quad \text{Equação 1}$$

AMD = Atividade Mínima Detetável (Bq)

N = Total de contagens obtida na região de interesse da energia do I-123

FC = Fator de Calibração do detector (cps/dps)

T = Tempo de contagem (s)

Para a determinação deste parâmetro, foram recrutados 20 indivíduos de público voluntários saudáveis, que não apresentam disfunções da tireoide. A aquisição da AMD foi realizada posicionando tanto o voluntário, quanto o sistema de detecção na geometria de tireoide estabelecida na calibração, durante um tempo de 15 minutos. O número de contagens médio é dado pela média aritmética simples das contagens obtidas para cada indivíduo.

A partir da AMD, é possível avaliar a sensibilidade da técnica em termos de Incorporação Mínima Detetável (IMD), cujo valor é posteriormente extrapolado para Dose Efetiva Mínima Detetável (DEMD). Estes valores são estimados de acordo com a biodistribuição do radionuclídeo pelo corpo humano, descritos pelos modelos biocinéticos da ICRP [6,8]. Para este cálculo, utilizamos o *software* AIDE versão 6.0 [9] o qual gerou as frações $m(t)$ de atividades retidas nos órgãos ou compartimentos do modelo que representa o corpo humano, assim como os coeficientes de dose $e_{(50)}$ por unidade de incorporação do radionuclídeo ^{123}I .

As IMD e DEMD foram calculadas com a aplicação das Equações 2 e 3 respectivamente:

$$IMD (Bq) = \frac{AMD}{m(t)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

AMD = Atividade Mínima Detetável (Bq);

$m(t)$ = fração de retenção após a incorporação de 1Bq do radionuclídeo em função dos dias transcorridos (Bq/Bq).

$$DEMD_{50}(Sv) = IMD(Bq) \times e_{50}(\text{cenário})(Sv/Bq) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

IMD = Incorporação Mínima Detetável (Bq);

$e_{(50)}$ (Sv/Bq) = coeficiente de conversão de dose (dependente do modelo dosimétrico utilizado).

Neste estudo, foram simulados no *software* AIDE, dois cenários distintos de incorporação de ^{123}I , a saber:

- Cenário 1: Inalação única de ^{123}I sob forma elementar, gás.
- Cenário 2: Inalação única de ^{123}I na forma de particulado de AMAD igual a $5\mu\text{m}$.

Estes cenários foram criados para avaliar e comparar a sensibilidade da metodologia proposta, admitindo-se que a inalação é a principal via de incorporação no caso de manipulação direta do radionuclídeo ^{123}I .

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

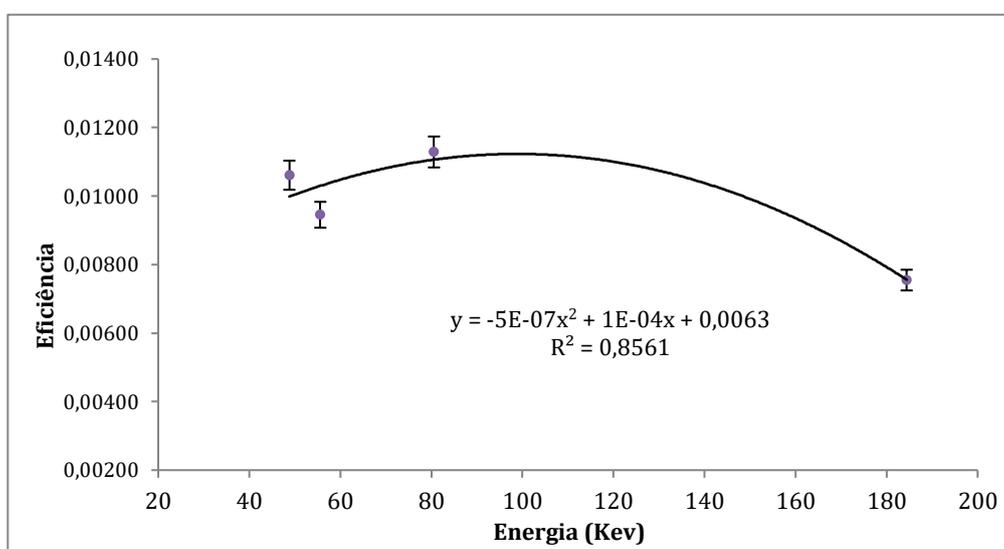
A Tabela 1 apresenta os valores de contagens líquidas obtidas para cada energia avaliada, considerando-se a abundância de emissão gama, para cada uma das energias, e as regiões de interesse (keV).

A curva de calibração Eficiência vs Energia obtida para a fonte de ^{166m}Ho na geometria de tireoide está representada pela Figura 3.

Tabela 1: Resposta dos detectores em função dos picos de energia para a fonte de ^{166m}Ho .

Pico	ROI (canais)	ROI (kev)	Área total média	Cps	Abundância	Eficiência (cps/dps)
1	162-176	48,8	13208	7,338	0,30	0,012
2	202-212	55,61	2169	1,205	0,06	0,010
3	343-354	80,6	5939	3,299	0,12	0,013
4	925-939	184,4	21196	11,776	0,73	0,008

Figura 3: Curva de Eficiência vs Energia para fonte de ^{166m}Ho .



A curva obtida apresenta uma região de máxima eficiência entre 80 e 120 keV. Na região de emissão do ^{123}I (159 keV), embora não seja máxima, ainda obtém-se uma eficiência de detecção suficientemente alta, sendo esta de 0,8%. Substituindo a energia do ^{123}I e sua respectiva probabilidade de emissão gama na curva de Eficiência vs Energia, o Fator de Calibração encontrado para este sistema foi de $0,0079 \pm 0,0001$ (cps/dps). O fator encontrado no protocolo anterior para a fonte de ^{139}Ce é de $0,0067 \pm 0,0002$ (cps/dps) [7]. A diferença entre os dois fatores de calibração é de 18%. Este valor pode estar associado tanto ao desgaste do detector ao longo dos anos quanto à incerteza proveniente do ajuste da curva de calibração.

A monitoração dos indivíduos não ocupacionalmente expostos selecionados, resultou em um número de contagens líquidas médio de 41 ± 9 , proporcionando uma AMD de 5 Bq. Este valor é compatível com o valor descrito por ARAÚJO et al. [7] para as medidas de ^{123}I na geometria de tireoide, nas mesmas condições de detecção. Sendo este o parâmetro mais relevante para a sensibilidade do sistema, conclui-se que a diferença entre o fator de calibração obtido com a fonte de ^{139}Ce na metodologia anterior e o fator proveniente da curva de calibração com a fonte de $^{166\text{m}}\text{Ho}$ não influenciou no resultado final da AMD, e conseqüentemente não afeta a estimativa de dose. Deste modo, a metodologia proposta por este estudo é otimizada em relação anterior e pode ser implementada no LABMIV visto que apresenta a mesma sensibilidade com vantagens adicionais do uso do $^{166\text{m}}\text{Ho}$ sobre o ^{139}Ce .

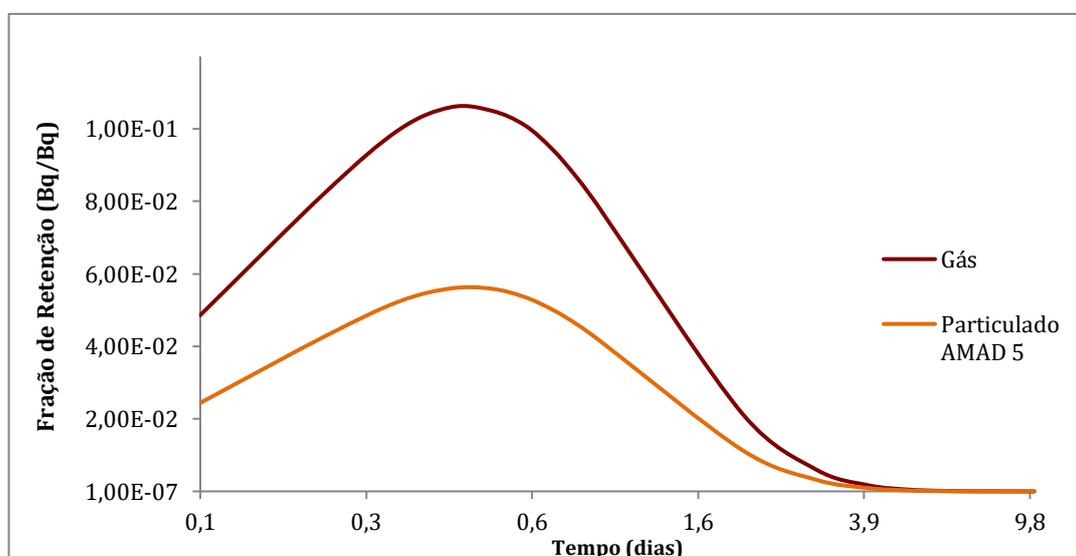
A partir da determinação da AMD, pode-se avaliar a sensibilidade da técnica com o uso da extrapolação da atividade detectada para os valores derivados de incorporação no órgão e dose efetiva comprometida. Este cálculo foi realizado com o auxílio do *software* AIDE, o qual fornece uma correlação temporal da quantidade de material radioativo no órgão de interesse, denominada fração de retenção – $m(t)$ específica para cada cenário de incorporação [9]. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.

A Figura 4 apresenta a variação da quantidade de ^{123}I retido na tireoide em função do tempo transcorrido após a incorporação de 1 Bq para os cenários de inalação de ^{123}I sob a forma elementar (gás) e inalação de ^{123}I associado a um particulado de AMAD igual a 5 μm .

Tabela 2: Valores de fração de retenção $m(t)$, IMD e DEMD para os cenários de incorporação única de ^{123}I , via inalação, durante os dez primeiros dias após a incorporação.

Tempo (dias)	$m(t)$ (Bq/Bq)		IMD (Bq)		DEMD (mSv)	
	Gás	Particulado	Gás	Particulado	Gás	Particulado
0.1	4.86×10^{-02}	2.44×10^{-02}	$9.43 \times 10^{+01}$	$1.88 \times 10^{+02}$	2.01×10^{-05}	2.01×10^{-05}
0.2	8.26×10^{-02}	4.29×10^{-02}	$5.55 \times 10^{+01}$	$1.07 \times 10^{+02}$	1.18×10^{-05}	1.14×10^{-05}
0.3	9.98×10^{-02}	5.24×10^{-02}	$4.59 \times 10^{+01}$	$8.74 \times 10^{+01}$	9.78×10^{-06}	9.36×10^{-06}
0.4	1.06×10^{-01}	5.60×10^{-02}	$4.32 \times 10^{+01}$	$8.18 \times 10^{+01}$	9.21×10^{-06}	8.75×10^{-06}
0.5	1.05×10^{-01}	5.59×10^{-02}	$4.36 \times 10^{+01}$	$8.20 \times 10^{+01}$	9.29×10^{-06}	8.77×10^{-06}
0.6	1.01×10^{-01}	5.36×10^{-02}	$4.54 \times 10^{+01}$	$8.55 \times 10^{+01}$	9.66×10^{-06}	9.15×10^{-06}
0.7	9.43×10^{-02}	5.01×10^{-02}	$4.86 \times 10^{+01}$	$9.15 \times 10^{+01}$	1.03×10^{-05}	9.79×10^{-06}
0.8	8.66×10^{-02}	4.61×10^{-02}	$5.29 \times 10^{+01}$	$9.94 \times 10^{+01}$	1.13×10^{-05}	1.06×10^{-05}
0.9	7.87×10^{-02}	4.19×10^{-02}	$5.82 \times 10^{+01}$	$1.09 \times 10^{+02}$	1.24×10^{-05}	1.17×10^{-05}
1	7.09×10^{-02}	3.78×10^{-02}	$6.46 \times 10^{+01}$	$1.21 \times 10^{+02}$	1.38×10^{-05}	1.30×10^{-05}
2	2.13×10^{-02}	1.13×10^{-02}	$2.15 \times 10^{+02}$	$4.05 \times 10^{+02}$	4.58×10^{-05}	4.34×10^{-05}
3	6.01×10^{-03}	3.20×10^{-03}	$7.62 \times 10^{+02}$	$1.43 \times 10^{+03}$	1.62×10^{-04}	1.53×10^{-04}
4	1.69×10^{-03}	9.01×10^{-04}	$2.71 \times 10^{+03}$	$5.09 \times 10^{+03}$	5.77×10^{-04}	5.44×10^{-04}
5	4.75×10^{-04}	2.54×10^{-04}	$9.65 \times 10^{+03}$	$1.80 \times 10^{+04}$	2.05×10^{-03}	1.93×10^{-03}
6	1.34×10^{-04}	7.14×10^{-05}	$3.42 \times 10^{+04}$	$6.42 \times 10^{+04}$	7.28×10^{-03}	6.87×10^{-03}
7	3.76×10^{-05}	2.01×10^{-05}	$1.22 \times 10^{+05}$	$2.28 \times 10^{+05}$	2.60×10^{-02}	2.44×10^{-02}
8	1.06×10^{-05}	5.71×10^{-06}	$4.32 \times 10^{+05}$	$8.02 \times 10^{+05}$	9.21×10^{-02}	8.59×10^{-02}
9	3.02×10^{-06}	1.65×10^{-06}	$1.52 \times 10^{+06}$	$2.78 \times 10^{+06}$	3.23×10^{-01}	2.97×10^{-01}
10	8.79×10^{-07}	5.12×10^{-07}	$5.21 \times 10^{+06}$	$8.95 \times 10^{+06}$	1.11×10^0	9.58×10^{-01}

Figura 4: Concentração de ^{123}I na tireoide em função do tempo decorrido após a incorporação para os cenários de inalação única de gás e inalação de particulado de AMAD 5 μm .



Considerando a mesma quantidade de radionuclídeo incorporado, a inalação de ^{123}I sob a forma de particulado apresenta menor fração de retenção na glândula tireoide, quando comparada à via de inalação de partícula elementar. Isto decorre do fato de que o tamanho das partículas respiráveis influencia a taxa de deposição e transferência das mesmas. Para partículas de AMAD $5\ \mu\text{m}$, a deposição inicial no trato respiratório é de 91% em adultos [8]. Deste modo, no segundo cenário, a taxa de transferência do iodo radioativo para o sangue é menor, o que explica a menor fração de retenção observada na glândula tireoidiana.

A partir dos valores das frações de retenção de ^{123}I na tireoide (m_t), obtido pelo *software* AIDE, pode-se então estabelecer os valores de incorporação mínima detetável (IMD) ao longo do tempo, para cada cenário de incorporação (Figura 5). Posteriormente, estes valores são extrapolados pra Dose Efetiva Mínima Detectável (DEMD), dispostos na Figura 6.

Figura 5: Incorporação Mínima Detetável na tireoide ao longo do tempo, para os cenários de inalação de ^{123}I sob a forma de gás e associado a um particulado suspenso de AMAD $5\ \mu\text{m}$.

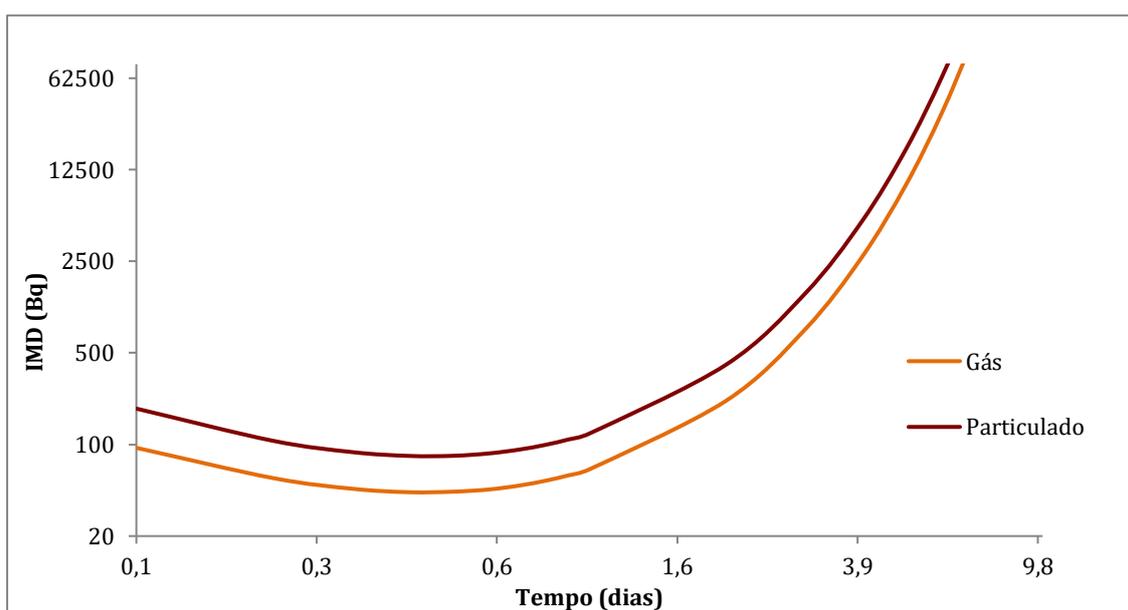
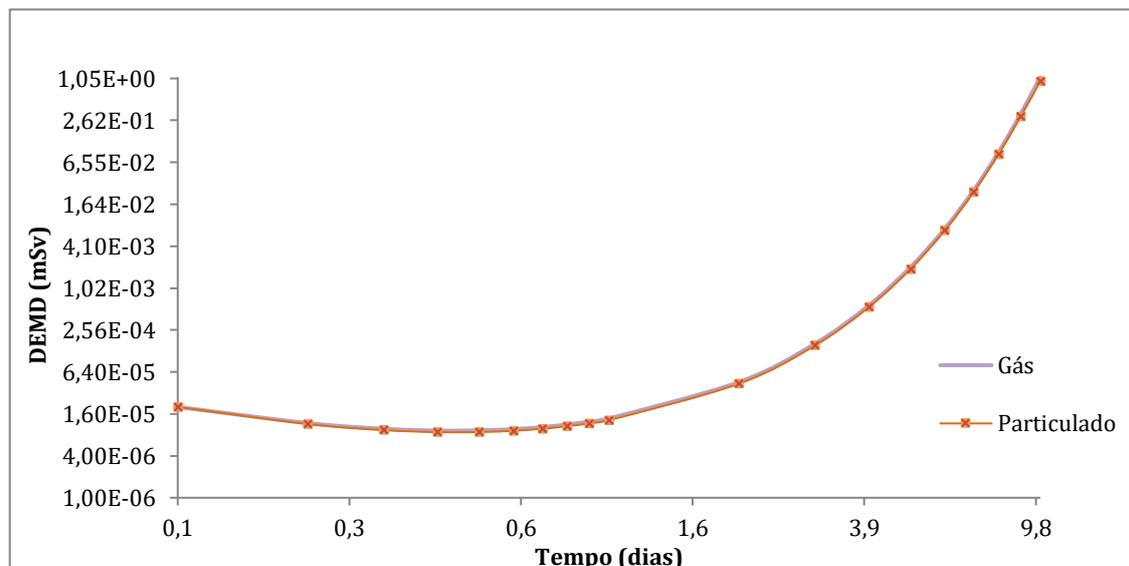


Figura 6: Dose Efetiva Mínima Detetável (DEMD) ao longo do tempo, para os cenários de inalação de ^{123}I sob a forma de gás e associado a um particulado suspenso de AMAD $5\ \mu\text{m}$.



Os resultados obtidos por meio das simulações apresentadas, mostram que não houve alterações significativas para os valores de dose efetiva mínima detetável entre os cenários incorporação.

Considerando a geometria de tireoide, e com base nos valores de AMD encontrado (5 Bq) e DEMD provenientes das simulações propostas, verificou-se que tanto para os cenários de incorporação única via inalação, de 1 Bq de ^{123}I , elementar na forma de vapor, quanto na forma de partícula $5\ \mu\text{m}$ de AMAD, a sensibilidade do sistema de detecção permite a monitoração *in vivo* do IOE até o nono dia após a incorporação. Isto considerando como parâmetro de avaliação o nível de registro de dose para trabalhador, no valor de 1 mSv para a soma das exposições interna e externa. Todavia, devido à curta meia vida física do ^{123}I (13 horas), recomenda-se que o indivíduo seja monitorado cerca de 12 horas após a incorporação, período no qual a fração de retenção do radionuclídeo na tireoide atinge um ponto máximo global, o que proporciona maior robustez na medição.

4. CONCLUSÕES

A metodologia proposta de monitoração de ^{123}I apresenta sensibilidade adequada para a monitoração *in vivo* de IOE na geometria de tireoide. Neste sentido, os resultados obtidos por este estudo atenderam às expectativas dos objetivos traçados.

A escolha da fonte de $^{166\text{m}}\text{Ho}$ para a calibração do sistema de detecção na região de baixas energias se mostrou adequada, visto que trata-se de um radionuclídeo multi gama emissor de meia-vida longa (1200 anos), quando comparada à fonte de ^{139}Ce utilizada pelo protocolo anterior (137,68 dias). Esta propriedade somada à possibilidade de obtenção de uma curva de eficiência, a tornam economicamente mais viável para cumprir o protocolo das calibrações rotineiras do LABMIV. O fator de calibração para a energia de emissão do ^{123}I , na geometria de tireoide, foi de $0,0079 \pm 0,0001$ (cps/dps) obtido com o uso da curva de Eficiência vs Energia gerada a partir de uma atividade conhecida de fonte de $^{166\text{m}}\text{Ho}$.

Para os cenários de incorporação simulados por este estudo, a saber: inalação de iodo sob a forma de partícula elementar (gás) e inalação de ^{123}I sob a forma de particulado de $5 \mu\text{m}$ de AMAD, a metodologia proposta apresenta sensibilidade compatível com o valor de nível de registro de 1mSv para monitoração *in vivo* de IOE na geometria de tireoide. Considerando o limite mínimo de detecção (AMD) de 5Bq , para medida de tireoide durante o tempo de 15 minutos na distância de 15 cm, esta simulação mostra que a sensibilidade do sistema permite a monitoração *in vivo* até o nono dia após a incorporação.

5. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI-IRD) pelo preparo e fornecimento da fonte padrão de $^{166\text{m}}\text{Ho}$. A autora M. Q. Saraiva agradece ao CNPq pela bolsa de estudos e ao IRD pela estrutura para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. Norma CNEN-NE-3.01.** Rio de Janeiro, RJ: CNEN, 2014.
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Assessment of Occupational Exposure Due to Intakes of Radionuclide. Safety Guide No. RS-G-1.2,** 1999.
- [3] International Commission on Radiological Protection (ICRP). **ICRP Publication 68: Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers.** Annals of the ICRP Volume 24/4, 1995.
- [4] DANTAS, B.M.; DANTAS, A.L.A.; ACAR, M.E.D.; CARDOSO, J.C.S.; JULIÃO, L.M.Q.C.; LIMA, M.F.; TADDEI, M.H.T.; ARINE, D.R.; ALONSO, T.; RAMOS, M.A.P.; FAJGELJ, A. Accreditation and training on internal dosimetry in a laboratory network in Brazil: An increasing demand. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 144, No. 1–4, p. 124–129, 2011.
- [5] International Atomic Energy Agency (IAEA). **Methods for Assessing Occupational Radiation Doses due to Intakes of Radionuclides. Safety Reports Series No. 37.** IAEA, Vienna, 2004.
- [6] International Commission on Radiological Protection (ICRP). **ICRP Publication 78: Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers.** Annals of the ICRP Vol. 27/3-4, 1998.
- [7] ARAUJO, F.; LUCENA, E.A.; SOUSA, W.O.; DANTAS, A.L.A.; DANTAS, B.M., Evaluation of internal occupational exposure by ¹²³I in a radiopharmaceutical production facility, **Radiation Measurements** v. 71, p. 300-304, 2014.

[8] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP), **ICRP Publication 66. The human respiratory tract model.** Annals of the ICRP Volume 23/4, 1994.

[9] BERTELLI, L. et al. AIDE: internal dosimetry software. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 130, n. 3, p. 358-367, 2008.