

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

CAMPUS DE BOTUCATU

MARIANA CAROLINE DE CARVALHO FRANÇA

**AVALIAÇÃO DO CONTROLE DE QUALIDADE DO DETECTOR DE RADIAÇÃO DO
TIPO *GEIGER-MÜLLER***

Botucatu

2022

MARIANA CAROLINE DE CARVALHO FRANÇA

**AVALIAÇÃO DO CONTROLE DE QUALIDADE DO DETECTOR DE RADIAÇÃO DO
TIPO *GEIGER-MÜLLER***

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto de Biociências da Universidade Estadual
Paulista, Campus de Botucatu, como parte dos
requisitos para obtenção do diploma de Gradua-
ção em Física Médica

Orientadora: Prof^ª Dra. Katia Hiromoto Koga
Coorientador: Físico Daniel Molena Seraphim

Botucatu
2022

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉC. AQUIS. TRATAMENTO DA INFORM.
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - CÂMPUS DE BOTUCATU - UNESP
BIBLIOTECÁRIA RESPONSÁVEL: ROSEMEIRE APARECIDA VICENTE-CRB 8/5651

França, Mariana Caroline de Carvalho.

Avaliação do controle de qualidade do detector de radiação do tipo Geiger-Müller / Mariana Caroline de Carvalho França. - Botucatu, 2022

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Física Médica) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Biociências de Botucatu
Orientador: Katia Hiromoto Koga
Capes: 10504001

1. Contadores Geiger-Muller. 2. Reprodutibilidade dos testes. 3. Controle de qualidade. 4. Detectores de radiação.

Palavras-chave: Controle de qualidade; Geiger-Müller; Teste de reprodutibilidade.

RESUMO

O controle de qualidade dos equipamentos de um Serviço de Medicina Nuclear é fundamental para que se mantenha a segurança e a qualidade do serviço. Para o detector *Geiger-Müller* (GM), o controle de qualidade deve ser realizado mensalmente, tendo como referência o limite estabelecido pela norma regulamentadora CNEN NN 3.05 de 17 de dezembro de 2013, “Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Serviços de Medicina Nuclear” (Resolução 159/13). Para serem considerados confiáveis, precisam apresentar nas suas sequências de medição características, como reprodutibilidade, que avalia a concordância dos dados coletados em diferentes condições de medição; repetibilidade, que diz respeito aos dados coletados sob as mesmas condições de medição; estabilidade, que é a capacidade do instrumento em conservar suas características de medição ao longo do tempo; precisão, que avalia o grau de concordância dos resultados entre si; e eficiência, que é a capacidade do instrumento de converter os estímulos que recebe em sinais mensuráveis. Os detectores de radiação do tipo GM são muito utilizados para o controle de contaminação em Serviços de Medicina Nuclear, podendo ser usados com uma sonda tipo *pancake*, para medir a taxa de contaminação de superfície, ou com uma sonda cilíndrica, para a monitoração da taxa de exposição, embora os equipamentos mais modernos apresentem configurações internas e filtros para medir grandezas diferentes, não sendo necessária a troca de sonda. A reprodutibilidade do detector GM foi avaliada através de medidas mensais de repetibilidade, realizadas no período de agosto de 2021 a julho de 2022. Para isso, foram utilizados o detector GM, modelo *Thermo Scientific Radeye B20*, e uma fonte de Césio-137 (calibrada com $\pm 8,066$ MBq, em 09/05/1995). O teste consiste na leitura da taxa de exposição e da taxa de monitoração de superfície da fonte de Césio-137, posicionada a 30 centímetros da janela do detector. Foram realizadas 10 leituras durante o intervalo de 5 segundos, a fim de avaliar a concordância entre os resultados, obtidos sob as mesmas condições. Assim, foi possível calcular a média aritmética (MA), o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV) para as medidas de taxa de exposição e taxa de monitoração de superfície. A reprodutibilidade do detector foi, então, avaliada através da análise dos resultados de repetibilidade mês a mês. Os resultados mensais de $MA \pm DP$ para a taxa de contaminação de superfície, em contagens por minuto (cpm), foram, respectivamente, 2321 ± 99 , 2342 ± 157 , 2012 ± 108 , 2327 ± 62 , 2009 ± 63 , 1646 ± 44 , 2220 ± 76 , 1929 ± 76 , 1923 ± 56 , 1765 ± 90 e 1840 ± 46 . O CV para taxa de monitoração de superfície neste mesmo período foi, respectivamente, de: 4,7, 5, 3, 3, 3, 3, 4, 3, 5 e 2%. Os resultados mensais de $MA \pm DP$ para a taxa de exposição, em mR/h, foram respectivamente, $0,73 \pm 0,02$; $0,74 \pm 0,02$; $0,68 \pm 0,03$; $0,79 \pm 0,03$; $0,69 \pm 0,03$; $0,55 \pm 0,03$; $0,75 \pm 0,03$; $0,62 \pm 0,04$; $0,62 \pm 0,01$; $0,58 \pm 0,03$ e $0,61 \pm 0,04$. O CV para taxa de exposição neste mesmo período foi, respectivamente, de: 3, 7, 5, 3, 4, 6, 3, 6, 2, 6 e 7%. A interpretação dos resultados dos testes verifica a conformidade do desempenho do detector do serviço, que se encontra dentro do limite de aceitabilidade de $\pm 20\%$.

PALAVRAS-CHAVE: controle de qualidade; *Geiger-Müller*; teste de reprodutibilidade.

ABSTRACT

The quality control of the equipment of a Nuclear Medicine Service is essential to maintain the safety and quality of the service. For the Geiger-Müller (GM) detector, quality control must be performed monthly, about the limit established by the regulatory standard CNEN NN 3.05 of December 17, 2013, “Requirements for Safety and Radiological Protection for Nuclear Medicine Services” (Resolution 159/13). To be considered reliable, they need to present characteristics in their measurement sequences, such as reproducibility, which assesses the agreement of data collected under different measurement conditions; repeatability, which concerns the data collected under the same measurement conditions; stability, which is the ability of the instrument to maintain its measurement characteristics over time; precision, which assesses the degree of agreement between the results; and efficiency, which is the ability of the instrument to convert the stimuli it receives into measurable signals. GM-type radiation detectors are widely used for contamination control in Nuclear Medicine Services and can be used with a pancake-type probe, to measure the surface contamination rate, or with a cylindrical probe, to monitor the rate of exposure, although the most modern equipment has internal configurations and filters to measure different magnitudes, with no need to change the probe. The reproducibility of the GM detector was evaluated through monthly repeatability measurements, carried out from August 2021 to July 2022. For this, a GM detector, model Thermo Scientific Radeye B20, and a Cesium-137 source (calibrated with ± 8.066 MBq, on 05/09/1995). The test consists of reading the exposure rate and the surface monitoring rate of the Cesium-137 source, positioned 30 centimeters from the detector window. Ten readings were performed during a 5-second interval to assess the agreement between the results obtained under the same conditions. Thus, it was possible to calculate the arithmetic mean (AM), the standard deviation (SD), and the coefficient of variation (CV) for the measurements of the exposure rate and surface monitoring rate. The detector's reproducibility was then evaluated by analyzing the month-to-month repeatability results. The AM $\pm$ SD monthly results for the surface contamination rate, in counts per minute (cpm), were, respectively, 2321 $\pm$ 99, 2342 $\pm$ 157, 2012 $\pm$ 108, 2327 $\pm$ 62, 2009 $\pm$ 63, 1646 $\pm$ 44, 2220 $\pm$ 76, 1929 $\pm$ 76, 1923 $\pm$ 56, 1765 $\pm$ 90 and 1840 $\pm$ 46. The CV for surface monitoring rate in this same period was, respectively: 4.7, 5, 3, 3, 3, 3, 4, 3, 5 and 2%. The AM $\pm$ SD monthly results for the exposure rate, in mR/h, were, respectively, 0.73 $\pm$ 0.02; 0.74 $\pm$ 0.02; 0.68 $\pm$ 0.03; 0.79 $\pm$ 0.03; 0.69 $\pm$ 0.03; 0.55 $\pm$ 0.03; 0.75 $\pm$ 0.03; 0.62 $\pm$ 0.04; 0.62 $\pm$ 0.01; 0.58 $\pm$ 0.03 and 0.61 $\pm$ 0.04. The CV for exposure rate in this same period was, respectively: 3, 7, 5, 3, 4, 6, 3, 6, 2, 6 and 7%. Interpretation of test results verifies compliance with the service detector performance, which is within the limit.

KEYWORDS: quality control; Geiger-Müller; reproducibility test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Regiões de operação dos detectores a gás	11
Figura 2	Esquema básico de um detector GM	12
Figura 3	Detector e a fonte separados por uma distância de 30 centímetros	15
Figura 4	Painel de seleção de unidades	15
Figura 5	Reprodutibilidade do período de agosto de 2021 a julho de 2022	23
Figura 6	Análise da MA durante o período de avaliação, em cpm	23
Figura 7	Análise da MA durante o período de avaliação, em mR/h	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados obtidos no mês de agosto de 2021	16
Tabela 2 – Resultados obtidos no mês de setembro de 2021	16
Tabela 3 – Resultados obtidos no mês de outubro de 2021	17
Tabela 4 – Resultados obtidos no mês de dezembro de 2021	17
Tabela 5 – Resultados obtidos no mês de janeiro de 2022	18
Tabela 6 – Resultados obtidos no mês de fevereiro de 2022	18
Tabela 7 – Resultados obtidos no mês de março de 2022	19
Tabela 8 – Resultados obtidos no mês de abril de 2022	19
Tabela 9 – Resultados obtidos no mês de maio de 2022	20
Tabela 10 – Resultados obtidos no mês de junho de 2022	20
Tabela 11 – Resultados obtidos no mês de julho de 2022	21
Tabela 12 – MA, DP e CV obtidos em cada mês em cpm	21
Tabela 13 – MA, DP e CV obtidos em cada mês em mR/h	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GM	<i>Geiger-Müller</i>
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
Bq	<i>Becquerel</i>
Ci	<i>Curie</i>
R/h	<i>Röntgen</i> por hora
A	Atividade
Γ	Gama
cpm	Contagens por minuto
cps	Contagens por segundo
μs	Microssegundo
MA	Média aritmética
DP	Desvio padrão
CV	Coeficiente de variação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVO	13
3	MATERIAIS E MÉTODO	14
3.1	Materiais	14
3.2	Método dos testes de repetibilidade e reprodutibilidade	14
4	RESULTADOS	16
5	CONCLUSÃO	25
	REFERÊNCIAS	26

1 INTRODUÇÃO

Para garantir a confiabilidade do monitor GM, assim como todos os outros instrumentos utilizados no Serviço de Medicina Nuclear, são necessários testes de controle de qualidade, realizados periodicamente que visam avaliar o instrumento e determinar se o mesmo continua atendendo aos valores de referência estabelecidos. Segundo a norma regulamentadora CNEN NN 3.05 de 17 de dezembro de 2013, “Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Serviços de Medicina Nuclear” (Resolução 159/13), os detectores do tipo GM possuem como teste de controle de qualidade o denominado teste de reprodutibilidade, que avalia o grau de concordância das leituras obtidas nos monitores de taxa de exposição e de contaminação de superfície em uma determinada condição de medição e deve ser realizado com periodicidade mensal, com limite de aceitabilidade, de $\pm 20\%$, conforme descrito pela CNEN (1).

O termo radiação pode ser definido como energia em trânsito. As radiações ionizantes dizem respeito às partículas capazes de produzir íons em um meio. Elas são consideradas ionizantes, portanto, se forem capazes de remover um elétron de um átomo ou molécula, ao qual se encontra ligado por força elétrica. Define-se como decaimento radioativo a emissão espontânea de energia ou de partícula de um núcleo atômico.

Os detectores de radiação são equipamentos compostos por materiais sensíveis à radiação ionizante, capazes de produzir uma resposta ou um sinal que pode ser medido quando a energia da radiação é absorvida. A interação da radiação com o meio capaz de detectá-la pode ocorrer por diversos processos, dependendo do tipo de material que o compõe e da natureza da radiação.

A taxa de decaimento, definida como o número de decaimentos por unidade de tempo de uma amostra radioativa é chamada de atividade e é escrita como:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

A unidade da atividade no Sistema Internacional (SI) é o *becquerel* (Bq), que corresponde a uma transformação por segundo (s^{-1}), mas a unidade *curie* (Ci) também é empregada para determinar esta grandeza.

A taxa de exposição é uma grandeza que representa a quantidade de ionizações produzidas pela radiação X ou γ no ar por unidade de massa e tempo. A unidade empregada é *Röntgen* por hora (R/h). Essa grandeza pode ser associada à atividade de uma fonte emissora de radiação gama pela expressão:

$$\dot{X} = \frac{A}{d^2} \cdot \Gamma$$

sendo A a atividade da fonte (em *Curie*), d a distância entre fonte e ponto de medição (em metros) e Γ a constante de taxa de exposição (geralmente em Rm^2/hCi) (2).

A contaminação de superfície pode ser caracterizada como a presença indesejada de material

radioativo em um dado objeto ou local. A unidade empregada para medir contaminação radioativa é, comumente, contagens por minuto (cpm) ou contagens por segundo (cps).

Propriedades dos detectores de radiação

Os detectores de radiação devem detectar a presença de radiação em um meio. Para serem considerados confiáveis, precisam apresentar nas suas sequências de medição características, como:

- Reprodutibilidade, que diz respeito ao grau de concordância dos resultados obtidos em diferentes condições de medição (como operador, tempo, local de medição, detector), relacionando-se com a precisão de todo o processo de medida;
- Repetibilidade, que avalia a variação das respostas quando todo o procedimento é repetido em um intervalo de tempo curto, sob as mesmas condições de medição;
- Exatidão, que é o grau de concordância das leituras com o valor padrão. É mais exato quanto mais próximo do valor verdadeiro;
- Estabilidade, que é a capacidade do instrumento de conservar suas características de medição, isto é, a sua calibração ao longo do tempo;
- Precisão, que é definida como o grau de concordância dos resultados entre si, expresso pelo desvio padrão em relação à média;
- Sensibilidade, que pode ser dada pela razão entre a variação da leitura e a correspondente variação do estímulo;
- Eficiência, que é definida como a capacidade de converter os estímulos recebidos em sinais.

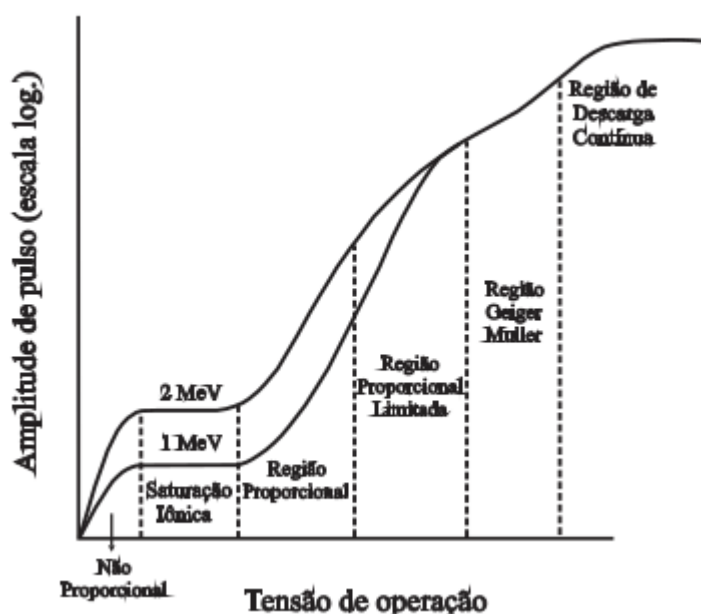
Detectores a gás

Os três tipos de detectores de radiação a gás utilizados são as câmaras de ionização, os contadores proporcionais e os detectores GM. Apesar das suas diferenças em relação às suas respostas, todos são baseados no mesmo princípio de funcionamento: a coleta de íons produzidos pela interação da radiação ionizante com um dado volume de gás.

Nos detectores de radiação a gás, um volume de gás fica contido entre dois eletrodos com uma diferença de voltagem entre eles. O eletrodo negativo é chamado de cátodo e o eletrodo positivo de ânodo. Em condições normais, o gás é um isolante e nenhuma corrente elétrica flui entre os eletrodos. Entretanto, a radiação que passa pelo gás causa ionização, tanto a ionização direta da radiação incidente quanto a ionização secundária. Os elétrons produzidos pela ionização são atraídos para o eletrodo positivo e os átomos ionizados para o eletrodo negativo, causando um fluxo momentâneo de uma pequena quantidade de corrente elétrica.

Dependendo da intensidade do campo elétrico aplicado entre o ânodo e o cátodo, tem-se um detector gasoso operando como câmara de ionização, contador proporcional ou contador GM, conforme apresentado pela Figura 1 (3). Para baixas tensões entre os eletrodos, os pares de íons são formados, mas como o campo elétrico é muito fraco, os íons se recombinam e pouca ou nenhuma carga circula entre os eletrodos. Na região de ionização, onde a voltagem é um pouco mais alta, todos os íons formados são coletados, sendo o sinal proporcional à energia da radiação incidente. Na região proporcional, com o aumento do campo elétrico, os elétrons são acelerados para o eletrodo central, criando novos pares de íons, que também são acelerados para os eletrodos, gerando pulso de elétrons maior para cada ionização primária. Na região GM, ocorre a ionização total do gás independentemente da energia depositada e requer um tempo para a recombinação dos pares de íons. Para tensões acima da região GM, região de descargas contínuas, os elétrons continuam a ser removidos dos átomos do gás de preenchimento, tornando o instrumento inoperável para a detecção de radiação (4).

Figura 1 – Regiões de operação dos detectores a gás



Fonte: Tauhata, L. et al. (2013)

Detectores *Geiger-Müller*

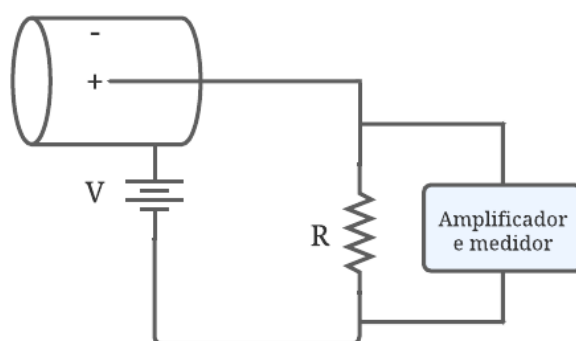
Os detectores de radiação do tipo GM são muito utilizados para o controle de contaminação em Serviços de Medicina Nuclear, por serem relativamente baratos e de fácil operação, apesar de não serem capazes de discriminar o tipo de radiação presente nem sua energia. Eles podem ser utilizados tanto com uma sonda tipo *pancake*, para medir a contaminação superficial, quanto com uma sonda cilíndrica, para a monitoração da taxa de exposição (5), embora os equipamentos

mais modernos apresentem configurações internas e filtros para medir grandezas diferentes, não sendo necessária a troca de sonda.

O monitor GM é uma câmara de ionização que opera em alta voltagem. A câmara é geralmente preenchida com o gás argônio ou uma mistura de gases. A extremidade sensível da sonda é geralmente uma janela de mica protegida por uma malha de metal externa. A multiplicação do gás, que caracteriza a região GM, faz com que um único evento gerado pela entrada de radiação pela janela forneça um grande pulso de corrente. A radiação incidente que passa pela janela do tubo produz pares de íons, de forma que os elétrons acelerados em direção ao eletrodo positivo causam ionização adicional em colisões com outros átomos no gás. Esses elétrons secundários podem causar mais ionizações, e os pares de íons são então multiplicados por processos de avalanches. Além de ionizar as moléculas do gás, os elétrons acelerados também podem causar excitação das moléculas por meio de colisões. Essas moléculas de gás excitadas retornam rapidamente ao estado fundamental através da emissão de fótons em comprimentos de onda visíveis ou ultravioleta, que pode interagir no gás, liberando outro elétron, podendo desencadear uma nova avalanche de elétrons à medida que se move em direção ao ânodo. A avalanche só termina porque os íons positivos reduzem o campo elétrico ao redor do fio do ânodo, deixando-o abaixo do nível necessário para a multiplicação do gás, mas novas avalanches podem ocorrer quando os íons voltam ao seu estado inicial. É possível extinguir a descarga e evitar novas avalanches absorvendo-se a energia cinética dos elétrons e facilitando sua recombinação com os íons positivos, adicionando-se um material de extinção (ou *quenching*) ao gás que preenche o detector, permitindo que novos eventos sejam detectados (6). O tempo mínimo entre cada evento que pode ser detectado é conhecido como tempo morto, que dura 100-500 μ s (7).

A Figura 2 apresenta o esquema básico do circuito de um detector GM na apresentação de uma sonda cilíndrica.

Figura 2 – Esquema básico de um detector GM. O eletrodo positivo consiste em um fio fino que passa pelo centro do cilindro e o eletrodo negativo consiste na parede do cilindro



2 OBJETIVO

Avaliar a reprodutibilidade do detector a gás do tipo *Geiger-Müller* do Serviço de Medicina Nuclear da Faculdade de Medicina de Botucatu-Unesp, no período de agosto de 2021 a julho de 2022, através da realização de testes de repetibilidade mensais considerando o limite estabelecido pela CNEN.

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 MATERIAIS

- Régua de 30 centímetros;
- Caneta;
- Fita crepe;
- Detector do tipo *Geiger-Müller* digital, modelo *Thermo Scientific Radeye B20*;
- Fonte de Césio-137 (Cs-137, 09/05/1995), atividade de $218\mu\text{Ci}$ ($\pm 8,066 \text{ MBq}$).

3.2 MÉTODO DOS TESTES DE REPETIBILIDADE E REPRODUTIBILIDADE

A avaliação da reprodutibilidade do detector *Geiger-Muller* foi conduzida a partir de duas etapas: a) realização de teste de repetibilidade do detector, mensalmente e b) avaliação dos resultados do teste de repetibilidade mês a mês. Para a reprodutibilidade foram adotados os limites exigidos pela CNEN.

O teste de repetibilidade foi realizado em uma sala com baixa radiação de fundo (*background*). O detector e a fonte de Césio-137 foram posicionados em uma superfície plana e, com o auxílio de uma régua, as extremidades 0 e 30 centímetros foram marcadas em uma fita crepe. Em uma das extremidades foi posicionada a fonte radioativa e, na outra, o detector *Geiger-Müller* com a janela de entrada da sonda voltada para a fonte radioativa, conforme apresentado pela Figura 3. No *display* do detector, é selecionada a unidade de medida desejada: R/h ou cpm (Figura 4). Em seguida, 10 medidas foram realizadas durante um intervalo de 5 segundos, com a finalidade de observar a concordância das leituras em diferentes momentos, sob as mesmas condições. Todos os valores coletados foram anotados para posterior análise. Por último, o mesmo procedimento foi realizado para a outra unidade de medida. Este teste foi executado mensalmente, na segunda semana de cada mês.

Após a coleta de todos os dados, foram calculados a média aritmética (MA), o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV), para as medidas de taxa de exposição (em R/h) e taxa de monitoração de superfície (em cpm).

Figura 3 – Detector com a sua janela de entrada voltada para a fonte de Césio-137, separados por uma distância de 30 centímetros

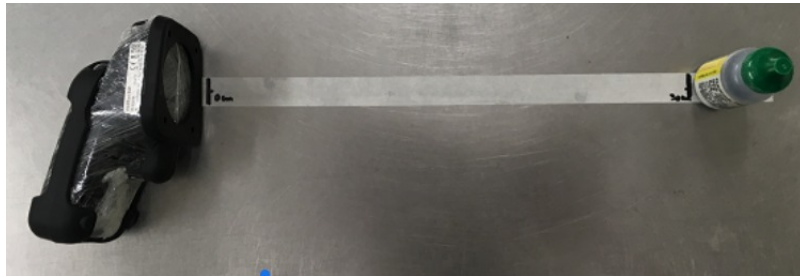


Figura 4 – Painel de seleção de unidades



4 RESULTADOS

As Tabelas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 trazem os resultados obtidos do teste de repetibilidade realizados, mensalmente, no período de agosto de 2021 a julho de 2022, com exceção de novembro, mês em que o equipamento esteve fora do Serviço para ser calibrado.

Tabela 1 – Taxa de contaminação, taxa de exposição, MA, DP e CV de agosto de 2021

Medida	Taxa de contaminação (cpm)	Taxa de exposição (mR/h)
1	2372	0,73
2	2187	0,74
3	2316	0,71
4	2406	0,72
5	2252	0,73
6	2472	0,71
7	2379	0,70
8	2310	0,72
9	2155	0,75
10	2364	0,77
MA	2321	0,73
DP	99	0,02
CV	4%	3%

Tabela 2 – Taxa de contaminação, taxa de exposição, MA, DP e CV de setembro de 2021

Medida	Taxa de contaminação (cpm)	Taxa de exposição (mR/h)
1	2431	0,73
2	2710	0,75
3	2388	0,75
4	2315	0,79
5	2191	0,73
6	2343	0,72
7	2310	0,76
8	2355	0,75
9	2149	0,70
10	2226	0,74
MA	2342	0,74
DP	157	0,02
CV	7%	3%

Tabela 3 – Taxa de contaminação, taxa de exposição, MA, DP e CV de outubro de 2021

Medida	Taxa de contaminação (cpm)	Taxa de exposição (mR/h)
1	1980	0,69
2	1980	0,69
3	2085	0,69
4	2016	0,60
5	2130	0,69
6	1969	0,74
7	1950	0,67
8	1800	0,67
9	2014	0,67
10	2196	0,67
MA	2012	0,68
DP	108	0,03
CV	5%	5%

Tabela 4 – Taxa de contaminação, taxa de exposição, MA, DP e CV de dezembro de 2021

Medida	Taxa de contaminação (cpm)	Taxa de exposição (mR/h)
1	2341	0,78
2	2363	0,74
3	2360	0,81
4	2367	0,83
5	2361	0,79
6	2390	0,78
7	2226	0,79
8	2322	0,82
9	2331	0,79
10	2206	0,80
MA	2327	0,79
DP	62	0,03
CV	3%	3%

Tabela 5 – Taxa de contaminação, taxa de exposição, MA, DP e CV de janeiro de 2022

Medida	Taxa de contaminação (cpm)	Taxa de exposição (mR/h)
1	1977	0,73
2	2039	0,72
3	1882	0,71
4	2071	0,69
5	2112	0,66
6	2012	0,74
7	2043	0,66
8	1982	0,68
9	1977	0,68
10	1999	0,69
MA	2009	0,69
DP	63	0,03
CV	3%	4%

Tabela 6 – Taxa de contaminação, taxa de exposição, MA, DP e CV de fevereiro de 2022

Medida	Taxa de contaminação (cpm)	Taxa de exposição (mR/h)
1	1713	0,56
2	1651	0,58
3	1653	0,61
4	1601	0,54
5	1677	0,57
6	1675	0,51
7	1643	0,54
8	1560	0,57
9	1676	0,56
10	1614	0,51
MA	1646	0,55
DP	44	0,03
CV	3%	6%

Tabela 7 – Taxa de contaminação, taxa de exposição, MA, DP e CV de março de 2022

Medida	Taxa de contaminação (cpm)	Taxa de exposição (mR/h)
1	2272	0,80
2	2250	0,77
3	2324	0,75
4	2341	0,71
5	2211	0,73
6	2144	0,73
7	2127	0,72
8	2132	0,74
9	2196	0,75
10	2200	0,78
MA	2220	0,75
DP	76	0,03
CV	3%	3%

Tabela 8 – Taxa de contaminação, taxa de exposição, MA, DP e CV de abril de 2022

Medida	Taxa de contaminação (cpm)	Taxa de exposição (mR/h)
1	2083	0,63
2	1979	0,67
3	1977	0,58
4	1801	0,59
5	1926	0,58
6	1936	0,58
7	1902	0,64
8	1874	0,66
9	1873	0,67
10	1943	0,65
MA	1929	0,62
DP	76	0,04
CV	4%	6%

Tabela 9 – Taxa de contaminação, taxa de exposição, MA, DP e CV de maio de 2022

Medida	Taxa de contaminação (cpm)	Taxa de exposição (mR/h)
1	1865	0,61
2	1882	0,60
3	1883	0,63
4	1976	0,62
5	1963	0,62
6	1949	0,62
7	2003	0,61
8	1866	0,61
9	1979	0,64
10	1863	0,63
MA	1923	0,62
DP	56	0,01
CV	3%	2%

Tabela 10 – Taxa de contaminação, taxa de exposição, MA, DP e CV de junho de 2022

Medida	Taxa de contaminação (cpm)	Taxa de exposição (mR/h)
1	1849	0,59
2	1824	0,55
3	1710	0,59
4	1846	0,61
5	1718	0,61
6	1615	0,58
7	1645	0,59
8	1847	0,49
9	1848	0,60
10	1749	0,59
MA	1765	0,58
DP	90	0,03
CV	5%	6%

Tabela 11 – Taxa de contaminação, taxa de exposição, MA, DP e CV de julho de 2022

Medida	Taxa de contaminação (cpm)	Taxa de exposição (mR/h)
1	1851	0,69
2	1835	0,64
3	1809	0,62
4	1793	0,57
5	1893	0,55
6	1890	0,61
7	1836	0,60
8	1750	0,60
9	1876	0,57
10	1871	0,62
MA	1840	0,61
DP	46	0,04
CV	2%	7%

Nos casos de inconformidade dos resultados em relação à norma regulamentadora, o teste de repetibilidade deve ser realizado novamente, com a certificação da inexistência de contaminação no equipamento (para tanto, o instrumento é protegido com plástico filme, que pode ser facilmente removido) e, se os resultados obtidos ainda estiverem fora da faixa estabelecida, o monitor deve passar pelo processo de calibração. Em situações normais, o equipamento deve ser calibrado a cada dois anos.

As Tabelas 12 e 13 sintetizam os resultados obtidos de MA, DP e CV durante o período agosto de 2021 a julho de 2022 para as unidades de medida cpm e mR/h, respectivamente.

Tabela 12 – MA, DP e CV obtidos em cada mês em cpm

Mês	MA (cpm)	DP (cpm)	CV (%)
08/21	2321	99	4
09/21	2342	157	7
10/21	2012	108	5
12/21	2327	62	3
01/22	2009	63	3
02/22	1646	44	3
03/22	2220	76	3
04/22	1929	76	4
05/22	1923	56	3
06/22	1765	90	5
07/22	1840	46	2

Tabela 13 – MA, DP e CV obtidos em cada mês da taxa de exposição

Mês	MA (mR/h)	DP (mR/h)	CV (%)
08/21	0,73	0,02	3
09/21	0,74	0,02	3
10/21	0,68	0,03	5
12/21	0,79	0,03	3
01/22	0,69	0,03	4
02/22	0,55	0,03	6
03/22	0,75	0,03	3
04/22	0,62	0,04	6
05/22	0,62	0,01	2
06/22	0,58	0,03	6
07/22	0,61	0,04	7

A avaliação da reprodutibilidade do equipamento pôde ser realizada considerando-se todos os dados obtidos durante o período de agosto de 2021 a julho de 2022, conforme mostram as Figura 5, Figura 6, Figura 7, nas quais são apresentados os valores obtidos dos coeficientes de variação e das médias aritméticas para ambas as unidades, durante o período avaliado.

Para a análise dos resultados, é necessário levar em conta os erros que têm origem no próprio processo de medida, que afetam, principalmente, a precisão. Durante a realização dos testes, o detector precisou ser manipulado para a mudança da unidade de medida, fato que pode ter influenciado as variações dos resultados observados, devido a sua dependência geométrica, que ficam evidentes nos meses dezembro de 2021 e fevereiro de 2022 na análise da MA com limites estabelecidos em relação à média global de todos os meses, para ambas as unidades (Figura 6 e Figura 7), indicando que o detector pode ter sido posicionado a uma distância maior do que 30 centímetros da fonte. Apesar disso, é possível verificar a distância entre os dados obtidos e os limites de $\pm 20\%$, isto é, o detector utilizado encontra-se na faixa de aceitabilidade, segundo as normas vigentes.

Figura 5 – Reprodutibilidade do período de agosto de 2021 a julho de 2022

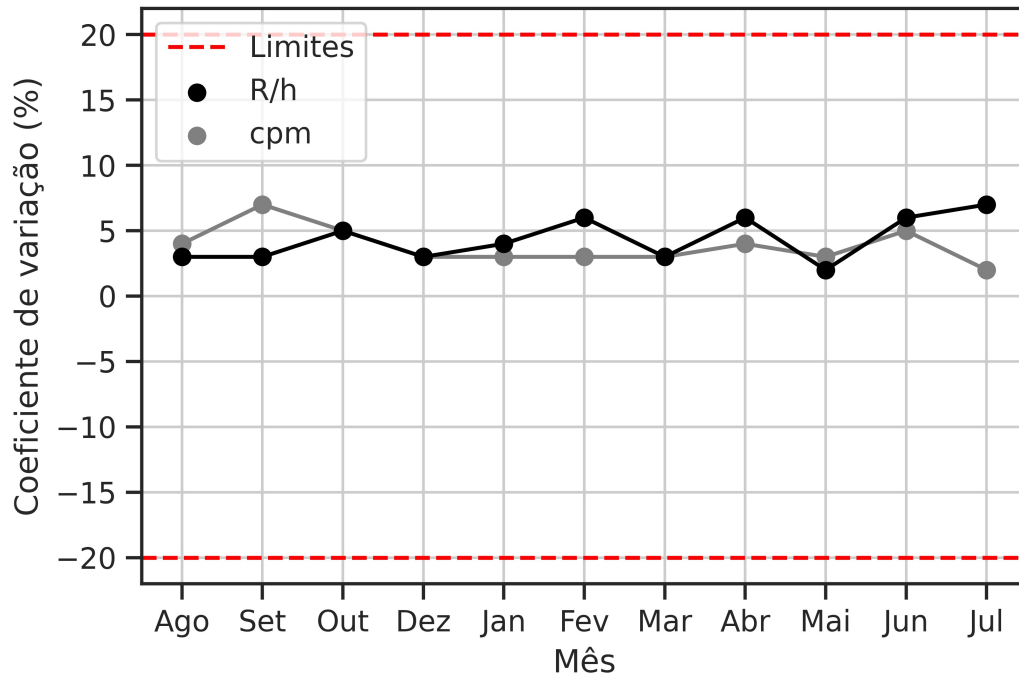


Figura 6 – Análise da MA durante o período de avaliação, em cpm, com limites estabelecidos em relação à média global de todos os meses

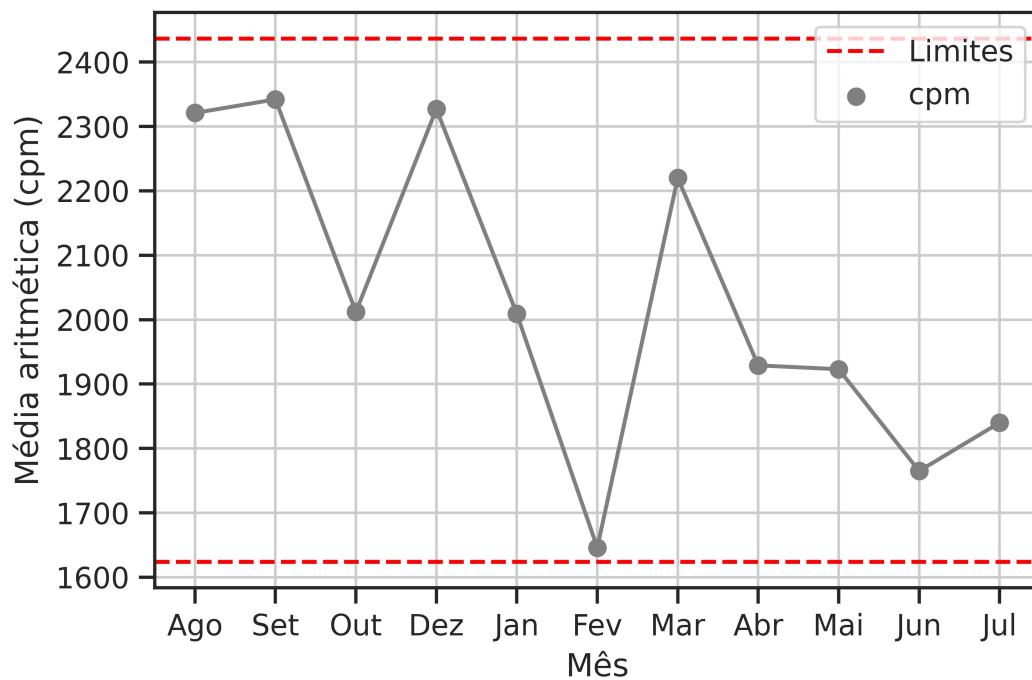
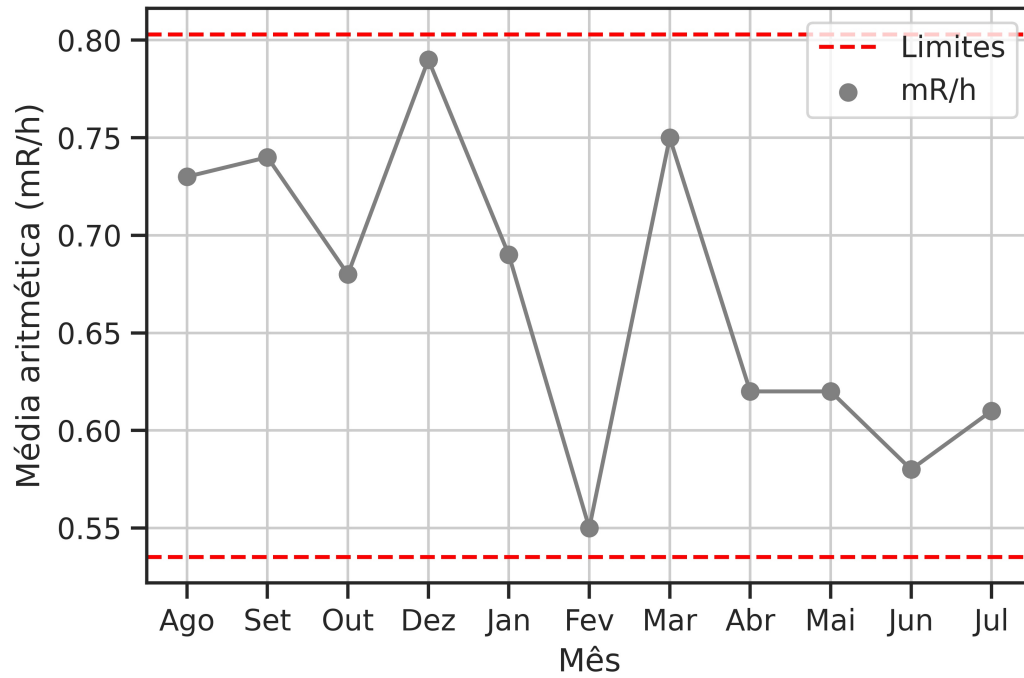


Figura 7 – Análise da MA durante o período de avaliação, em mR/h, com limites estabelecidos em relação à média global de todos os meses



5 CONCLUSÃO

O controle de qualidade do detector de radiação do tipo *Geiger-Müller* tem o papel importante de garantir a confiabilidade e segurança das suas respostas, uma vez que o equipamento é um instrumento essencial na rotina do Serviço de Medicina Nuclear, principalmente para o controle de contaminações e para a monitoração da taxa de exposição.

Apesar dos erros experimentais que podem ter contribuído para as variações das respostas, diretamente relacionados à manipulação do equipamento e ao operador, é possível verificar que os valores de coeficientes de variação e médias aritméticas em relação à média global, apresentados nos resultados, foram satisfatórios por estarem dentro do limite de $\pm 20\%$, e que sequer foram maior do que 7% , conforme estabelecido pela norma regulamentadora CNEN NN 3.05 de 17 de dezembro de 2013, podendo operar adequadamente no Serviço de Medicina Nuclear.

REFERÊNCIAS

- 1 CNEN. **NN-3.05**: Requisitos de radioproteção e segurança para serviços de medicina nuclear. [S.l.], 2013.
- 2 TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. 9^a. ed. [S.l.]: IRD/CNEN, 2013. 157-164 p.
- 3 TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. 9^a. ed. [S.l.]: IRD/CNEN, 2013. 193 p.
- 4 TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. 9^a. ed. [S.l.]: IRD/CNEN, 2013. 192-195 p.
- 5 SAHA, G. B. **Physics and Radiobiology of Nuclear Medicine**. 3^a. ed. [S.l.]: Springer, 2006.
- 6 CHERRY, S. R.; SORENSON, J. A.; PHELPS, M. E. **Physics in Nuclear Medicine**. 4^a. ed. [S.l.]: Saunders Elsevier, 2012.
- 7 BUSHONG, S. C. **Ciência Radiológica para tecnólogos: Física, biologia e proteção**. 9^a. ed. [S.l.]: Elsevier Editora Ltda, 2010.