



Expressão das incertezas de medição associadas à dosimetria e às calibrações de câmaras de ionização no Laboratório de Calibração Gama (LCG) do IDQBRN

T M S Silva¹, R C Curzio^{1,2}, C J F S F Vasconcelos¹ e A S de Amorim^{1,2}

¹ Instituto de Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear (IDQBRN). Avenida das Américas 28.705 – Guaratiba, 23020-470, Rio de Janeiro - RJ – Brasil

² Instituto Militar de Engenharia (IME). Praça General Tibúrcio 80 – Urca, 22290-270, Rio de Janeiro - RJ - Brasil

thiago.medeiros@eb.mil.br

Resumo. O Laboratório de Calibração Gama (LCG) tem como objetivos o refinamento de sua qualidade metrológica e o contínuo aprimoramento de suas atividades a fim de prover ao Exército Brasileiro monitores de radiação gama que forneçam medições confiáveis. Como requisito para comprovação da competência técnica, é previsto pela ABNT NBR ISO/IEC 17025 que os laboratórios devam identificar as contribuições para sua incerteza de medição, fazendo uso de métodos de análise apropriados. Nesse sentido, foram abordados aspectos relevantes, como o tratamento de incertezas dos fatores que influenciam na dosimetria na grandeza kerma no ar e na calibração de detectores do tipo câmaras de ionização (instrumento de trabalho), na qual é calculado um coeficiente de calibração de kerma no ar. Para atingir o objetivo proposto neste estudo, aplicou-se a metodologia do Guia para a expressão de incerteza de medição (GUM) nas grandezas retromencionadas e, posteriormente, realizaram-se avaliações à luz da ABNT NBR ISO 4037-1 e da ABNT NBR ISO 4037-2. Dessa forma, os resultados evidenciaram que as incertezas associadas aos processos de medições do LCG atendem às recomendações normativas e são condizentes com seu grau hierárquico metrológico.

Abstract. The Gamma Calibration Laboratory (LCG) aims to refine its metrological quality and continuously improve its activities in order to provide the Brazilian Army with gamma radiation monitors that furnish reliable measurements. As a requirement for proving technical competence, ABNT NBR ISO/IEC 17025 provides that laboratories must identify the contributions to their measurement uncertainty, making use of appropriate analysis methods. In this sense, relevant aspects were addressed, such as the treatment of interference from factors that influence measurements in dosimetry, in air kerma quantities, and in the calibration of chambers of ionization standards. To achieve the objective proposed in this study, the methodology for the expression of measurement uncertainties of the aforementioned quantities was applied and, subsequently, evaluations were carried out in the light of ABNT NBR ISO 4037-1 and ABNT NBR ISO 4037-2. Thus, the results showed that the uncertainties associated with the LCG's measurement processes meet normative recommendations and are consistent with its metrological hierarchical degree.

1. Introdução

O Instituto de Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear (IDQBRN), Organização Militar subordinada ao Centro Tecnológico do Exército (CTEx), por meio do seu Laboratório de Calibração Gama (LCG) possui em seu escopo realizar os serviços de calibrações de monitores de área em radioproteção e de câmara de ionização para padrão de trabalho. O LCG foi criado em 2016 com foco no atendimento das demandas da Força Terrestre, como resultado do Projeto de Transformação do Sistema de Ciência e Tecnologia do Exército. Desde então opera nos campos de assessoria científica e apoio técnico em calibrações de monitores e identificadores de radiação utilizados pelas tropas especializadas do Exército Brasileiro (EB), tanto em eventos de grande porte quanto em demandas específicas nos setores de saúde, segurança e pesquisa científica [1].

Como parte integrante do procedimento de calibração, deve-se determinar a incerteza de medição, que é uma estimativa que quantifica a confiabilidade dos resultados [2]. Trata-se de um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos a esse mensurando. Portanto, torna-se necessário que haja uma metodologia implementada e validada para expressar a qualidade dos resultados das medições, isto é, para declarar e avaliar as incertezas [3].

Neste estudo, identificaram-se as fontes que contribuem para a incerteza de medição na dosimetria de Césio-137 do LCG e na calibração de câmaras de ionização. Adicionalmente, foram realizados os cálculos para as estimativas de incerteza expandida da grandeza kerma no ar do sistema irradiador e do coeficiente de calibração de kerma no ar das câmaras calibradas, com base no Guia para a Expressão de Incerteza de Medição (GUM) [4] e nos procedimentos do Sistema da Qualidade implantado no LCG. Tais incertezas foram analisadas de acordo com os limites estabelecidos pelas normas de proteção radiológica vigentes para avaliação dos dados de medição [5,6,7].

2. Materiais e métodos

2.1. Equipamentos

Para realizar as análises experimentais foi utilizado o termobarohigrômetro (Fabricante: VAISALA, modelo: PTU 303, n° série: P1440563) para verificação das condições ambientais (temperatura ambiente, pressão atmosférica e umidade relativa do ar). Os posicionamentos nas distâncias de irradiação foram medidos com a trena a laser (Fabricante: BOSCH, modelo: GLM 120 C, n° série: 808043307) e os alinhamentos horizontais e verticais com a escala milimetrada projetada (Fabricante: Cidepe, modelo: EQ041.01). Os materiais retromencionados foram calibrados em laboratórios acreditados (ou rastreados) pela Rede Brasileira de Calibração (RBC) [8, 9, 10, 11, 12].

Para medição da taxa de kerma no ar, empregou-se o conjunto de medição composto pela câmara de ionização de 1 L (Fabricante: PTW, modelo: TW32002, n° série: 528) e pelo eletrômetro (Fabricante: PTW UNIDOS, modelo: Weblin, n° série: T10022-999452), previamente calibrado no Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI) [13]. O LNMRI é, desde 1976, membro da rede dos Laboratórios de Dosimetria Padrão Secundário, (*Secondary Standard Dosimetry Laboratory - SSDL*), coordenada pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). Assim, os equipamentos calibrados por eles têm a padronização terciária. Ou seja, o sistema de referência do LCG é um padrão terciário.

Ademais fez-se uso dos equipamentos e da infraestrutura do próprio IDQBRN como atenuadores de chumbo (de diferentes espessuras), mesa e bancada de irradiação, sistema de posicionamento a laser, computadores, entre outros. Destaca-se a utilização do irradiador de Césio-137 do LCG (Fabricante: VF NUCLEAR, modelo: IG-13) com atividade certificada inicialmente de 36,9 GBq em 22/01/2015 [14].

Para a calibração de detector foi empregada a câmara de ionização de transferência de 30 cm³ (Fabricante: PTW, modelo: TN32005, n° série: 187) pertencente e calibrada pelo LNMRI. A calibração relatada neste artigo ocorreu durante a auditoria técnica do Comitê de Avaliação de Serviços de Ensaio

e Calibração (CASEC) [15]. Esta atividade é uma etapa fundamental para a certificação de que o LCG está apto para calibração de câmara de ionização além dos monitores de área, ambos para radioproteção.

2.2. Dosimetria

Para caracterização de feixe de radiação na grandeza dosimétrica kerma no ar, K_a a determinação é direta com uma câmara de ionização padrão apropriada, calibrada em termos de K_a [6]. O alinhamento da câmara com os eixos horizontais e verticais são realizados com o sistema de lasers do LCG na posição padronizada de 2000 mm.

Posteriormente, as medições são realizadas nos posicionamentos de 500 mm a 3000 mm (em intervalos de 250 mm) entre o centro do detector e a fonte radioativa de Césio-137. Também são empregados atenuadores de chumbo com 15 mm e com 32 mm no intuito de modificar as taxas de kerma no ar, ampliando a faixa de trabalho ao diminuir os limites inferiores da dosimetria. O tempo de irradiação adotado para a câmara de ionização é de 1 min. Para cada ponto de teste, são realizadas dez medições da carga elétrica coletada pela câmara [16].

Além disso, utilizam-se os fatores de correção das condições de ensaio para as condições de referência em relação a temperatura ambiente, pressão atmosférica e umidade relativa do ar e o fator de correção do decaimento radioativo da fonte, conforme orientações normativas [6].

2.3. Calibração de câmaras de ionização

Utilizando o método de calibração por substituição [17], a câmara de ionização (utilizada como instrumento de trabalho) a ser calibrado é alinhada a 2000 mm e posicionada a uma determinada distância de acordo com o procedimento interno ou conforme solicitado e acordado com o cliente. Em exercícios de comparação interlaboratorial e em ensaios de proficiência é definida no protocolo a distância da fonte radioativa ao ponto de referência da câmara, visando garantir uma irradiação uniforme das câmaras de transferência. O centro geométrico da câmara deve coincidir com o ponto de teste. Na atividade detalhada neste artigo, foi solicitada a distância de 1000 mm.

A orientação de referência ao feixe e, se for o caso, o uso de capa de *build-up* deve ser conforme declarado pelo fabricante [6]. A irradiação é realizada por feixe direto, ou seja, sem atenuador. O tempo de irradiação adotado para a câmara de ionização é de 1 min.

A indicação da câmara é considerada corrigida para a densidade de referência do ar por meio de fatores de correção de temperatura, pressão e umidade [6,18]. São realizadas dez medições de corrente elétrica e, posteriormente, o valor médio é confrontado com o valor da taxa de K_a medido neste mesmo ponto de teste na dosimetria realizada com a câmara de ionização padrão rastreada ao LNMRI. Para cada câmara de ionização padrão calibrada é obtido um N_K específico para a qualidade de radiação utilizada [17].

Adverte-se que a calibração de câmara de ionização realizada no LCG é deliberada como “quaternária”, visto que utiliza um dispositivo padrão de calibração terciária (padrão de transferência) para a calibração de um outro equipamento. Após esta a calibração, a terminologia para este equipamento seria “padrão quaternário”, visto que é este pertence a uma classe inferior dentro da hierarquia metrológica [13,19].

2.4. Expressão de Incerteza de Medição

2.4.1. *Conceitos Básicos.* O resultado de uma medição é apenas a melhor estimativa do valor verdadeiro (Y) que, na ausência de efeitos sistemáticos, é obtido pela média aritmética \bar{y} de N medições repetidas (y_i) do mesmo mensurando de acordo com a equação 1:

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_i \quad (1)$$

A apresentação do resultado de medição só é completa quando é acompanhada de uma quantidade que declara sua incerteza. A incerteza da medição não deve ser confundida com um erro. Trata-se de uma faixa de dispersão ou intervalo e não um valor pontual. É a dúvida remanescente associada ao resultado da medição, estima o grau de desconhecimento sobre aquilo que está sendo medido.

Na maioria dos casos o mensurando Y não é medido diretamente, mas é determinado, a partir de outras grandezas (X_1, X_2, \dots, X_m) por uma relação funcional:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (2)$$

Por sua vez as grandezas X são estimadas a partir dos dados de entrada x ou de informações determinadas por diferentes meios. Assim, em uma medição há várias fontes de incerteza. Deve-se estimar essas e minimizar suas influências para que o resultado da medição esteja compreendido em um intervalo cada vez menor. Cada contribuição de incerteza deve ser tratada com a distribuição de probabilidade apropriada, seguindo as recomendações do GUM [3,4,18].

2.4.2. Avaliações do tipo A da incerteza-padrão. Nesta categoria, a incerteza-padrão da grandeza $u(X_i)$ é oriunda da incerteza-padrão das N medições $u(x_i)$, sendo obtida pelo quociente do desvio padrão da distribuição de valores medidos $s(x_i)$ pelo divisor \sqrt{N} (equação 3). A incerteza de medição da repetibilidade é a principal contribuição do tipo A.

De acordo com a literatura, ao realizar mais de 30 (trinta) medições, os resultados se aproximam da distribuição normal. Se um número menor de medições for utilizado, deve-se assumir para a amostra uma distribuição-t (ou distribuição de Student). O grau de liberdade (ν) associado à incerteza de repetibilidade é $N - 1$.

$$u(X_i) = u(x_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

2.4.3. Avaliações do Tipo B da incerteza-padrão. Essas incertezas-padrões são expressas como um desvio-padrão, a partir de outros meios de obtenção, como dados fornecidos em certificados de calibração, dados coletados em livros, normas e manuais técnicos etc. Também devem ser fornecidas as distribuições de probabilidade e o nível da confiança.

2.4.4. Combinação de incertezas. De acordo com a Lei da Propagação das Incertezas, a incerteza de cada componente do ensaio ou calibração é propagada para a obtenção da incerteza final da medição por meio de uma expansão em Série de Taylor, truncada geralmente em primeira ordem. Supõe-se, para a aplicabilidade do Teorema Central do Limite, que a medição e a sua respectiva incerteza possuem uma função densidade de probabilidade normal, ou t-Student para pequenas amostras (menor do que 30 medidas).

2.4.5. Incerteza-padrão combinada (u_c). É necessário combinar todas as componentes de incerteza-padrão a fim de prover um único valor de incerteza. Quando não houver correlação entre as grandezas de entrada, a $u_c(y)$ é dada pela multiplicação da estimativa de cada incerteza-padrão $u(x_i)$ pelo seu respectivo coeficiente de sensibilidade (c_i), que descreve o quanto a estimativa de saída y é influenciada por variações da estimativa de entrada x_i (equação 4).

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2} \quad (4)$$

Se as grandezas apresentarem diferentes unidades, é conveniente trabalhar com incertezas-padrões relativas, $u_c(y)$ (%), expressa na equação 5, para simplificação dos cálculos.

$$u_c(y) (\%) = \frac{u_c(y)}{|\bar{y}|} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[c_i \frac{u(x_i)}{x_i} \right]^2} \quad (5)$$

2.4.6. *Incerteza expandida (U)*. Através do Teorema do Limite Central, assume-se que a distribuição de probabilidade da grandeza do mensurando será normal, para um grau de liberdade ν_{eff} (equação 6):

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u^4(x_i)}{\nu_i}} \quad (6)$$

sendo ν_i é o grau de liberdade de x_i . Se ν_{eff} não é um inteiro, deve-se aproximá-lo ao próximo inteiro inferior. O valor do fator de abrangência (k) é escolhido com base no nível da confiança requerido e do ν_{eff} .

A incerteza expandida (ou incerteza global) é representada na equação 7:

$$U(y) = k u_c(y) \quad (7)$$

onde k é definido para uma determinada probabilidade de abrangência e $u_c(y)$ é a incerteza-padrão combinada. É usual também declarar a incerteza expandida relativa, $U (\%)$, desde que $|y| \neq 0$ (equação 8).

$$U(y)(\%) = \frac{U(y)}{|\bar{y}|} = k u_c(y)(\%) \quad (8)$$

Nos casos em que ν_{eff} tende a infinito, deve-se consultar o valor de k na tabela de distribuição normal. A um nível de confiança de 95,45%, têm-se que o fator de abrangência é igual a 2,0. Já para ν_{eff} menores ou iguais a 100, deve-se consultar a tabela da distribuição-t [18].

2.4.7. *Declaração da incerteza*. O resultado de uma medição é convenientemente expresso como na equação 9:

$$Y = \bar{y} \pm U(y) \quad (9)$$

Nesta declaração, \bar{y} é a melhor estimativa do valor atribuível ao mensurando Y e no intervalo entre $\bar{y} - U(y)$ e $\bar{y} + U(y)$ se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que podem ser razoavelmente atribuídos a Y . Tal intervalo é também expresso como $\bar{y} - U(y) \leq Y \leq \bar{y} + U(y)$.

Quando se relata o resultado de uma medição, e quando a medida da incerteza é a incerteza expandida, convém fornecer:

- a descrição completa de como o mensurando Y é definido;
- a unidade de \bar{y} e $U(y)$ ou a unidade de \bar{y} e a incerteza expandida relativa $U(y)(\%)$;
- o valor de k empregado; e
- o nível da confiança aproximado associado com o intervalo de Y e explicar como $U(y)$ foi obtida (referenciando, por exemplo, uma publicação na qual o método esteja descrito).

Em geral é suficiente fornecer u_c e U com até no máximo dois algarismos significativos; embora, em alguns casos, seja necessário reter algarismos adicionais para evitar erros de arredondamento nos cálculos subsequentes. Ao relatar os resultados finais, pode ser apropriado arredondar as incertezas para cima (a favor da segurança), em vez de arredondar até o algarismo mais próximo [18].

3. Resultados

Com base no arcabouço teórico apresentado, as incertezas expandidas relativas, U (%), foram calculadas em relação ao valor médio medido pelo instrumento (\bar{y}) e estimadas com probabilidade de abrangência de 95,45%. Em cada cálculo de u_c (%) utilizou-se o pior resultado (isto é, a maior contribuição) na avaliações do tipo A da incerteza-padrão dentre as obtidas nos testes realizados. Considerou-se que no LCG não há variáveis dependentes e correlacionadas ($c_i = 1,0$).

São apresentados na tabela 1 os valores das fontes de incerteza, da incerteza-padrão combinada relativa e da incerteza expandida relativa na dosimetria em kerma no ar utilizando a fonte de Césio-137 do LCG. A incerteza associada à repetibilidade (tipo A) é referente às dez leituras consecutivas das cargas elétricas medidas pelo eletrômetro. Também foram consideradas como componentes de incerteza (tipo B) na dosimetria em K_a : as declaradas nos certificados de calibração do conjunto de medição, do termobarohigrômetro, do crômetro e da trena a laser; a uniformidade do campo; o possível erro nos alinhamentos horizontal e vertical; e o decaimento da fonte radioativa [17].

Na incerteza da uniformidade do campo, fez-se uso da maior diferença percentual encontrada entre as taxas de kerma no ar no centro do detector e a ± 100 mm nos eixos horizontal e vertical pertencentes ao plano perpendicular ao feixe de radiação. Já para o alinhamento (horizontal e vertical), considerou-se a menor divisão da escala em relação ao tamanho de campo uniforme a 2000 mm [18]. Para essas componentes foi considerada distribuição de probabilidade em formato de U ($k = \sqrt{2}$) e triangular ($k = \sqrt{6}$), respectivamente. Não se considerou a contribuição de corrente de fuga, visto que esta tem sido desprezível após estabilização do conjunto de medição.

Tabela 1. Cálculo da incerteza expandida relativa associada à grandeza K_a na dosimetria.

i	Fonte de Incerteza	Tipo	$U(x_i)$	\bar{x}_i	Distribuição	Divisor	c_i	$u(x_i)$ (%)	v_i
1	Repetibilidade das leituras (fC)	A	56,4	4235,4	t-Student	$\sqrt{10}$	1,0	0,004	9
2	Coefficiente de Calibração (%)	B	2,5	100,0	Normal	2,0	1,0	0,013	∞
3	Temperatura ambiente (°C)	B	0,2	20	Normal	2,0	1,0	0,005	∞
4	Pressão atmosférica (hPa)	B	0,2	1013,3	Normal	2,0	1,0	0,000	∞
5	Umidade relativa do ar (%)	B	1,3	65	Normal	2,0	1,0	0,010	∞
6	Tempo de irradiação (min)	B	0,00008	1,00000	Normal	2,0	1,0	0,000	∞
7	Distância de irradiação (mm)	B	1,67	100,00	Forma de U	$\sqrt{2}$	1,0	0,012	∞
8	Uniformidade do campo (%)	B	1	652	Triangular	$\sqrt{6}$	1,0	0,001	∞
9	Alinhamento horizontal (mm)	B	1	652	Triangular	$\sqrt{6}$	1,0	0,001	∞
10	Alinhamento vertical (mm)	B	0,3	500,0	Normal	2,0	1,0	0,000	∞
11	Decaimento radioativo (a)	B	0,022	30,018	Normal	2,0	1,0	0,000	∞
Incerteza-padrão combinada relativa								$u_v(y)$(%) 2,1	v_{eff} ∞
Incerteza expandida relativa								$U(y)$(%) 4,3	k 2,0

Como exposto na tabela 1, estimou-se para a dosimetria do sistema irradiador do LCG (em taxa de kerma no ar) que a U (%) = 4,3 para $k = 2,0$.

Apresentam-se os valores das fontes de incerteza, da incerteza-padrão combinada relativa e da incerteza expandida relativa na calibração de câmaras de ionização na tabela 2. Conforme anteriormente, citado, a incerteza associada à repetibilidade (tipo A) é a incerteza obtida pelo cálculo do desvio padrão de 10 (dez) leituras consecutivas das cargas elétricas medidas pelo eletrômetro. Também foram consideradas como componentes de incerteza (tipo B): a incerteza expandida já associada à dosimetria em taxa de em K_a (tabela 1); as incertezas declaradas nos certificados de calibração do conjunto de medição, do termobarohigrômetro, do cronômetro e da trena a laser, todas com distribuição normal ($k = 2,0$). Novamente não se considerou a contribuição de corrente de fuga, pois esta tem sido insignificante.

Tabela 2. Cálculo da incerteza expandida relativa associada ao N_K de câmaras de ionização.

i	Fonte de Incerteza	Tipo	$U(x_i)$	\bar{x}_i	Distribuição	k	c_i	$u(x_i)$ (%)	v_i
1	Repetibilidade das leituras (pC)	A	0,23	9,24	t-Student	$\sqrt{10}$	1,0	0,008	9
2	Dosimetria em K_a (%)	B	4,3	100,0	Normal	2,0	1,0	0,021	∞
3	Temperatura ambiente (oC)	B	0,2	20,0	Normal	2,0	1,0	0,005	∞
4	Pressão atmosférica (hPa)	B	0,2	1013,0	Normal	2,0	1,0	0,000	∞
5	Umidade relativa do ar (%)	B	1,3	65,0	Normal	2,0	1,0	0,010	∞
6	Tempo de irradiação (min)	B	0,00008	1,00000	Normal	2,0	1,0	0,000	∞
7	Distância de irradiação (mm)	B	0,3	2.000,0	Normal	2,0	1,0	0,000	∞
Incerteza-padrão combinada relativa								$u_v(y)$ (%) 2,5	v_{eff} ∞
Incerteza expandida relativa								$U(y)$ (%) 5,0	k 2,0

Como exposto na tabela 2, para a calibração de câmaras de ionização a incerteza expandida do N_K é estimada em 5,0% para $k = 2,0$.

4. Discussões

Como parte do processo de medição nos laboratórios de calibração de instrumentos para radioproteção, deve ser realizada uma avaliação das incertezas estimadas à luz dos limites estabelecidos pelas normas vigentes.

Na literatura, não é explicitado o limite máximo incerteza expandida do valor do kerma no ar (ou taxa de kerma no ar) para radiação gama emitida por radionuclídeos, deferente do que é feito para radiação X de referência [5].

As câmaras de ionização calibradas pelo LCG têm suas incertezas estimadas sobre a incerteza global na determinação da grandeza (padrão terciário) e a incerteza de transferência da grandeza para o que seria um instrumento de trabalho (cliente interno) ou um “padrão quaternário” (clientes externos). A definição de limites para as incertezas de instrumentos dessa classe não é comumente realizada [19]. Contudo, para instrumentos-padrões (primário ou secundário rastreado e calibrado) a incerteza expandida ($k = 2,0$) dos coeficientes de calibração não pode exceder 4% na faixa de energia entre 30 keV e 1,5 MeV e não pode exceder 6% fora dessa faixa de energia [6]. Como o Césio-137 possui energia média de 662 keV [5], é limitado pelo primeiro valor.

A incerteza expandida relativa associada aos coeficientes de calibrações de kerma no ar realizadas no LCG foi estimada como 5,0%. Este valor é maior que o limite superior para padrões secundários, o que já era esperado, pois o sistema de referência do LCG é um padrão terciário. Neste sentido, os resultados alcançados no estudo sugerem que, se o LCG possuísse um padrão terciário advindo do LNMRI com menor incerteza expandida ou tivesse acesso a um padrão secundário, a incerteza global relativa ao N_K poderia ser menor com grande chance de se atender ao limite recomendado.

A principal componente de incerteza na calibração no LCG de detectores do tipo câmara de ionização é a originária na medição da grandeza K_a com cerca de 71% da composição. Por sua vez, a incerteza global da dosimetria em kerma no ar (4,3%) é composta principalmente pela incerteza advinda da calibração do conjunto de medição (37%)

Em comparação aos valores estimados para a incerteza de medição associadas para os N_K dos demais laboratórios de calibração de instrumentos rastreados ao LNMRI, o valor declarado pelo LCG é compatível aos valores das demais instituições [20].

5. Conclusão

Este trabalho demonstrou a relevância da expressão da incerteza na apresentação do resultado de medição. De início realizou-se uma síntese das etapas de cada processo de medição do LCG. Com foco nas grandezas de saída associadas à dosimetria e à calibração de câmaras de ionização, foram identificadas as fontes de incerteza no intuito de possibilitar a combinação dessas contribuições individuais em uma incerteza total única com probabilidade de abrangência de 95,45%.

A caracterização do feixe em kerma no ar teve uma estimativa máxima de incerteza global de 4,3% e a incerteza expandida estimada para o coeficiente de calibração de kerma no ar (resultante da calibração de câmaras de ionização) foi de 5,0%, valor coerente aos declarados por outros laboratórios brasileiros de mesmo nível na hierarquia do sistema metrológico [20].

Além dos aspectos técnicos mencionados anteriormente, é fundamental ressaltar a importância da disseminação do conhecimento sobre a metodologia de expressão e avaliação das incertezas. Essa etapa não se resume apenas a uma tarefa rotineira ou puramente matemática, uma vez que requer um conhecimento detalhado da natureza da grandeza a ser medida e do processo de medição. Assim, a metodologia de quantificação das incertezas, proposta neste estudo, contribui para a melhoria da precisão e da confiabilidade dos resultados obtidos, promovendo, em última instância, um maior rigor na tomada de decisões com base nessas medições.

Referências

- [1] ESTADO-MAIOR DO EXÉRCITO 2012 *Portaria N° 204 EME, de 14 de dezembro de 2012. Aprova a Diretriz para Atualização e Funcionamento do Sistema de Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear do Exército*. Brasília – DF.
- [2] ABNT NBR ISO/IEC 17025 2017 *Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaios e calibração*. 3.ed. [S.l.: s.n.].
- [3] INMETRO 2012 *Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)*. Duque de Caxias - RJ.
- [4] INMETRO 2012 *Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008*. Duque de Caxias – RJ.
- [5] ABNT NBR ISO 4037-1:2020 *Proteção radiológica — Radiação X e gama de referência para calibração de dosímetros e medidores de taxa de dose, e para determinação de suas respostas em função da energia dos fótons. Parte 1: Características das radiações e métodos de produção*. 2. ed. [S.l.: s.n.].
- [6] ABNT NBR ISO 4037-2:2021 *Proteção radiológica — Radiação X e gama de referência para calibração de dosímetros e medidores de taxa de dose, e para determinação de suas respostas em função da energia dos fótons. Parte 2: Dosimetria para proteção radiológica nas faixas de energia de 8 keV a 1,3 MeV e de 4 MeV a 9 MeV*. 1. ed. [S.l.: s.n.].



- [7] ABNT NBR ISO 4037-3:2020 *Proteção radiológica — Radiação X e gama de referência para calibração de dosímetros e medidores de taxa de dose, e para determinação de suas respostas em função da energia dos fótons. Parte 3: Calibração de dosímetros de área e individuais e a medição de sua resposta em função da energia e do ângulo de incidência*. 1.ed. [S.l.: s.n.].
- [8] VISOMES 2023 *Certificado de calibração N° LV08025-000173-23-R1*.
- [9] VISOMES 2023 *Certificado de calibração N° LV08025-00812A-23-R1*.
- [10] VISOMES 2023 *Certificado de calibração N° LV08025-00812B-23-R1*.
- [11] LEKAS 2023 *Certificado de calibração N° 2037423*.
- [12] CIMEQ 2018 *Certificado de calibração N° 003414/201*.
- [13] LNMRI 2023 *Certificado de calibração N° 0948/2023*.
- [14] VF 2015 *Certificate of sealed radioactive source CS7.P04 - 003/15*.
- [15] CASEC 2011 *Requisitos Técnicos para Certificação de Laboratório de Calibração de Instrumentos de Medição para Radiação Ionizante Usados em Radioproteção*. Rio de Janeiro - RJ: IRD.
- [16] SILVA T M S 2021 *Estudo Dosimétrico em Césio-137 do Laboratório de Calibração de Monitores de Radiação (LabCal) do IDQBRN: Caracterização e Otimização*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Nuclear, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro - RJ
- [17] IAEA 1999 *Calibration of radiation protection monitoring instruments*. Vienna : International Atomic Energy Agency (Safety reports series, ISSN 1020–6450 ; N° 16).
- [18] MENDES A e ROSÁRIO P P N 2020 *Metrologia e Incerteza de Medição: Conceitos e Aplicações*. 1. ed. LTC.
- [19] PEIXOTO J G P 2014 *Ionizing radiation metrology*. 1. ed.
- [20] CABRAL T S et al. 2017 *Comparison for Air Kerma from Radiation Protection Gamma-ray Beams with Brazilian Network - 2016/2017*