

# Metrologia das radiações ionizantes

## Metrology of Ionizing Radiation

Laura Natal Rodrigues<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Doutora em Biofísica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro; Pesquisadora Titular da Comissão Nacional de Energia Nuclear; Docente do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

### Resumo

Neste trabalho, foi apresentada a estrutura metrológica em nível nacional e internacional com o intuito de apresentar os organismos internacionais pertinentes, bem como as definições conceituais relevantes para a área da dosimetria das radiações ionizantes. Uma breve descrição dos padrões existentes também foi apresentada.

**Palavras-chave:** metrologia, radiação ionizante, rastreabilidade

### Abstract

In this paper, the national and international metrology structure was presented aiming an overview of the international organizations as well as the conceptual definitions regarding the ionizing radiation dosimetry. A brief description of the existing standards was also presented.

**Keywords:** metrology, ionizing radiation, traceability

### Introdução

A metrologia é definida como a ciência da medição. Ela abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições qualquer que seja a incerteza, em quaisquer campos da ciência ou tecnologia. Uma frase que ilustra bem o significado da metrologia no contexto atual é a seguinte: “o grau de desenvolvimento de empresas e nações pode ser avaliado pelo nível de sofisticação do seu sistema metrológico”<sup>1</sup>.

Pode-se entender que o objetivo geral da metrologia consiste em sustentar a incerteza da unidade em um nível que se torne uma contribuição desprezível para a incerteza global atribuída ao valor de uma grandeza física.

### Metrologia e a sociedade

O rápido crescimento mundial das relações comerciais, a pressão para que se removam as barreiras técnicas do comércio, a necessidade de se desenvolver um sistema que estabeleça confiança entre os parceiros comerciais e, conseqüentemente, o desenvolvimento de sistemas de credenciamento de laboratórios são os principais fatores que induzem à necessidade de um sistema muito mais transparente de rastreabilidade internacional dos resultados de medições, assegurando a comparabilidade deles.

A confiabilidade das medições com radiações ionizantes pode ser alcançada por meio da rastreabilidade de

sua cadeia metrológica. A rastreabilidade é definida como a propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão relacionado a referências estabelecidas, geralmente padrões nacionais ou internacionais, por meio de uma cadeia contínua de comparações (cadeia de rastreabilidade), todas com incertezas estabelecidas<sup>2</sup>. Desta forma, o objetivo da rastreabilidade é obter a garantia das medições dentro dos sistemas de hierarquia.

### O arranjo de reconhecimento mútuo (MRA)

Em fevereiro de 1988, no Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 38 dirigentes dos Institutos Nacionais de Metrologia (NMI) assinaram um acordo e se comprometeram a participar do “Reconhecimento mútuo dos padrões nacionais de medição e certificados de calibração emitidos por Institutos Nacionais de Metrologia (RMA)”<sup>3</sup>.

Este acordo baseia-se no estabelecimento de equivalência de padrões nacionais da equivalência dos certificados de calibração emitidos pelos laboratórios que detêm esses padrões nacionais. Segundo esse acordo, a equivalência deve ser estabelecida para cada um dos padrões das unidades de medida que referendam o sistema metrológico desses países. A base da validação desse acordo se dá pela participação dos padrões nacionais ou de medição nas chamadas comparações-chave (key-comparisons), cujo entendimento pressupõe a compreensão dos conceitos de hierarquia e rastreabilidade metrológica.

**Correspondência:** Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN/CNEN), Avenida Professor Lineu Prestes, 2.242 – Cidade Universitária, CEP 05508-900 – São Paulo (SP), Brasil, e-mail: lnatal@ipen.br

A equivalência é definida como “a condição de ser equivalente, isto é, igual para finalidades práticas, no significado ou no valor”<sup>3</sup>. Um termo que tem aplicação mais prática é o “grau de equivalência de um padrão de medição”<sup>3</sup>, definido como o “grau com que o valor de um padrão de medição é consistente com o valor de referência da comparação-chave”<sup>3</sup>. Quantitativamente, ele é expresso pelo desvio relativo em relação ao valor de referência da comparação-chave e pela incerteza deste desvio, com nível de confiança de 95% ou fator de abrangência  $k=2$ .

As comparações-chave, nas quais deve ser demonstrada e quantificada a equivalência, são definidas como “um dos conjuntos de comparações selecionados por um Comitê Consultivo do Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) para verificar os principais métodos e técnicas de um ramo específico da ciência”<sup>3</sup>.

A metrologia exige uma estrutura essencialmente hierárquica (Figura 1). No topo desta estrutura, encontram-se as definições das unidades básicas de medida do Sistema Internacional de Unidades (SI).

Logo abaixo da estrutura do SI, situa-se o BIPM, que é o laboratório internacional de metrologia teoricamente responsável pela prática da metrologia de maior exatidão. Compete ao BIPM a guarda dos padrões internacionais de medida e a disseminação das unidades do SI aos NMI dos países signatários da Convenção do Metro que criou o BIPM e estabeleceu esta lógica hierárquica.

Aos NMI cabe a guarda dos padrões nacionais e a disseminação das unidades SI para os padrões de referência dos laboratórios credenciados de calibração de seus respectivos países.

Em seguida, encontram-se os laboratórios credenciados de ensaios que são responsáveis pela qualificação e avaliação de conformidade de produtos que buscam a certificação. Os padrões de referência dos laboratórios de ensaio são calibrados em relação aos padrões de referência dos laboratórios de calibração credenciados.

Na base da estrutura, situam-se os padrões de trabalho dos usuários cuja calibração também provém dos

padrões de referência dos laboratórios de calibração credenciados.

Nesta estrutura hierárquica, as Organizações Regionais de Metrologia (RMO) têm um papel muito importante no RMA, já que elas têm a responsabilidade de realizar as comparações-chave no âmbito de suas regiões de abrangência para estabelecer a confiabilidade mútua na validade dos certificados de calibração e medição dos seus NMI membros.

A fim de assegurar a rastreabilidade dos padrões e medições dos laboratórios credenciados, os NMI devem participar, independentemente dos programas regionais, das comparações-chaves. Além disso, para garantir um sistema metrológico coerente e robusto, torna-se necessário que esses programas regionais sejam interligados com o programa de comparações-chave do BIPM. Os programas regionais das comparações-chave estão organizados em seis grandes blocos denominados Organizações Regionais de Metrologia (RMO) e são os seguintes:

1. Asia Pacific Metrology Programme (APMP): bloco regional constituído pelos países da região do Pacífico e da Ásia;
2. Euro-Asian Cooperation of National Metrology Programme (COOMET): bloco regional dos países da Europa-Ásia;
3. European Association of National Metrology Institutes (EUROMET): bloco regional dos países da Europa;
4. Middle East and Northern África Regional Metrology Cooperation (MENAMET): bloco regional dos países da Ásia;
5. Southern African Development Community Cooperation in Measurement Traceability (SADCMET): bloco regional dos países da África Meridional;
6. Inter-American Metrology System (SIM): bloco regional dos países das Américas.

O Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) criou uma série de Comitês Consultivos (CC), reunindo os melhores especialistas em suas respectivas áreas, que atuam como consultores sobre questões técnicas e científicas<sup>3</sup>. Entre as tarefas dos CC estão as avaliações detalhadas dos avanços na Física que influenciam diretamente a Metrologia, a preparação das recomendações para discussão no CIPM, a organização das comparações-chave internacionais de padrões, assim como orientam o CIPM sobre os trabalhos científicos nos laboratórios do BIPM.

Atualmente, existem dez CC:

1. Comitê Consultivo para Eletricidade e Magnetismo (CCEM), criado em 1927;
2. Comitê Consultivo para Fotometria e Radiometria (CCPR), criado em 1933;
3. Comitê Consultivo para Termometria (CCT), criado em 1937;
4. Comitê Consultivo para Comprimento (CCL), criado em 1952;



**Figura 1.** Hierarquia dos padrões de medição, destacando o papel dos Laboratórios Nacionais de Metrologia (LNM) os quais detêm os padrões nacionais no Brasil.

5. Comitê Consultivo para Tempo e Frequência (CCTF), criado em 1956;
6. Comitê Consultivo para Radiações Ionizantes (CCRI), criado em 1958;
7. Comitê Consultivo para Unidades (CCU), criado em 1964;
8. Comitê Consultivo para Massa e Grandezas Relacionadas (CCM), criado em 1980;
9. Comitê Consultivo para Quantidade de Matéria (CCQM), criado em 1993;
10. Comitê Consultivo para Acústica, Ultrassom e Vibração (CCAUV), criado em 1998.

Atualmente, admite-se a existência de um grau de equivalência entre os padrões nacionais de medição dos países cujos NMI participam das comparações internacionais organizadas sob o patrocínio do BIPM ou de RMO. Mas essa equivalência ainda não está suficientemente sistematizada e os resultados não são publicados de maneira acessível ao grande público. Apesar de ser adequado para muitas finalidades, isto não é consistente com o procedimento transparente e acessível exigido pela filosofia de reconhecimento mútuo. Devido a isso, os NMI assinaram o MRA, sob o patrocínio do CIPM, com relação aos padrões nacionais e certificados de calibração e medição emitidos pelos NMI. Um grande foi feito pelo BIPM e RMO para disponibilizar, em um banco de dados, os graus de equivalência para as principais grandezas do Sistema Internacional de Unidades (SI)\*. Um panorama abrangente e atualizado sobre a rede metrológica internacional foi publicado recentemente<sup>4</sup>.

### A metrologia no Brasil

O desenvolvimento do campo da metrologia, padronização e avaliação de conformidade é realizado no Brasil sob a estrutura do chamado Sistema Nacional Brasileiro de Metrologia, Padronização e Qualidade Industrial (SINMETRO), operado pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Padronização e Qualidade Industrial) – o único órgão oficial brasileiro de credenciamento de laboratórios de calibração e de ensaio e de certificação de órgãos reguladores, que atua como o Secretariado Executivo para o SINMETRO como um todo.

O corpo normativo do SINMETRO é o Conselho Nacional de Metrologia, Padronização e Qualidade Industrial (CONMETRO), que tem como objetivo estabelecer políticas nacionais referentes à metrologia, padronização e qualidade. Como Secretariado Executivo do CONMETRO, o INMETRO é responsável pela implementação de políticas nacionais no que concerne à metrologia, à padronização e à qualidade. As responsabilidades principais do INMETRO referentes a essas políticas incluem as seguintes atividades:

- realização, manutenção e disseminação das unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI) no Brasil;

- gerenciamento do Sistema de Metrologia Legal no Brasil;
- credenciamento de laboratórios de ensaio, órgãos de inspeção, treinamento de pessoal e órgãos de certificação, qualidade e órgãos de certificação de sistemas de gerenciamento ambiental e órgãos de certificação de produtos;
- credenciamento de laboratórios de calibração.

### Metrologia científica no Brasil

O Laboratório Nacional de Metrologia (LNM) é responsável pela realização, manutenção e disseminação das unidades do SI no Brasil, desempenhando atividades de metrologia de mais alto nível no país e fornecendo as bases para a rastreabilidade para esses laboratórios de calibração credenciados pelo INMETRO. As seguintes organizações constituem a estrutura dos LNM no Brasil:

1. os laboratórios da Diretoria de Metrologia Científica (DIMCI), que abrangem as padronizações na área de Mecânica, Elétrica, Acústica e de Vibrações, Óptica, Térmica e Metrologia Química e Ambiental;
2. os laboratórios do Departamento do Serviço da Hora do Observatório Nacional (DSH-ON/CNPq);
3. o Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (LNMRI-IRD/CNEN).

### Sistema internacional de unidades

No SI distinguem-se duas classes de unidades: unidades de base e unidades derivadas. Sob o aspecto científico, a divisão das unidades SI nessas duas classes é arbitrária, porque não é uma imposição da Física. Entretanto, a Conferência Geral, levando em consideração as vantagens de se adotar um sistema prático único para ser utilizado mundialmente nas relações internacionais, no ensino e no trabalho científico, decidiu basear o Sistema Internacional em sete unidades perfeitamente definidas, consideradas independentes do ponto de vista dimensional: o metro, o kg, o segundo, o ampère, o kelvin, o mol e a candela. Essas unidades SI são chamadas unidades de base<sup>5</sup>.

### Unidade de base

Segundo esta mesma terminologia, a unidade de base é entendida como a unidade de medida de uma grandeza de base em um sistema de grandezas. É importante ressaltar que, em um sistema de unidades coerentes, há uma única unidade de base para cada grandeza fundamental.

Por sua vez, a grandeza de base é a grandeza que, em um sistema de grandezas, é aceita por convenção como funcionalmente independente de outra grandeza. Como exemplo, as grandezas comprimento, massa e tempo são geralmente tidas como grandezas de base no campo da mecânica.

\* Banco de dados disponível em <http://kcdb.bipm.org>

### Unidade derivada

A segunda classe de unidades SI abrange as unidades derivadas, isto é, as unidades que podem ser formadas combinando-se unidades de base segundo relações algébricas que interligam as grandezas correspondentes. Diversas destas expressões algébricas, em razão de unidades de base, podem ser substituídas por nomes e símbolos especiais, o que permite sua utilização na formação de outras unidades derivadas.

A unidade derivada é a unidade de medida de uma grandeza derivada em um sistema de grandezas. Por sua vez, a grandeza derivada é a grandeza definida como função de grandezas de base deste sistema. Como exemplo, em um sistema que tem como grandezas de base o comprimento, a massa e o tempo, a velocidade é uma grandeza derivada, definida como o comprimento dividido por tempo.

É importante acentuar que cada grandeza física tem uma só unidade SI, mesmo que esta unidade possa ser expressa sob diferentes formas. Porém, o inverso não é verdadeiro: a mesma unidade SI pode corresponder a várias grandezas diferentes.

Algumas unidades derivadas possuem nomes e símbolos especiais, por exemplo, no SI: força (N); energia (J); pressão (Pa). As unidades derivadas compreendem as unidades derivadas adimensionais: radiano e esterradiano.

### Sistema coerente de unidades

Cada grandeza pode ter apenas uma única unidade obtida por multiplicação ou divisão das unidades de base e das unidades derivadas adimensionais, sem outro fator que não seja o número 1. As unidades derivadas são interligadas por meio de sua definição (por exemplo: metro por segundo e volt).

### Definição de grandeza

Uma grandeza pode ser expressa por meio da seguinte relação:

$$\text{Grandeza} = (\text{valor numérico})_x \cdot (\text{unidade})_x$$

Na qual  $x$  é o sistema de unidades da grandeza em questão.

### Unidade de base: o metro

A definição do metro baseada no protótipo internacional em platina iridiada, em vigor desde 1889, foi substituída na 11ª CGPM (1960) por uma definição baseada no comprimento de onda da radiação do  $\text{Kn-86}$ , com a finalidade de aumentar a exatidão da realização do metro. A 17ª CGPM substituiu, em 1983, essa última definição pela seguinte: "O metro (m) é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de  $1/299\,792\,458$  de segundo"<sup>6</sup>.

Esta definição tem o efeito de fixar a velocidade da luz em  $299.792.548 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , exatamente. É necessário medir

o intervalo de tempo ( $Dt$ ) necessário para que um pulso luminoso percorra, no vácuo, distâncias bem superiores a dezenas de km, de modo que  $Dt$  a ser medido não seja muito curto. O antigo protótipo internacional do metro é conservado no BIPM nas mesmas condições em que foi fixado em 1889.

### Unidade de base: o quilograma

O protótipo internacional do kg foi sancionado pela 1ª CGPM quando se declarou que "este protótipo será considerado doravante como unidade de massa" (CGPM 1890). A 3ª CGPM, para acabar com a ambiguidade que ainda existia no uso corrente sobre o significado da palavra "peso", confirmou que o quilograma (kg) é a unidade de massa: é a massa protótipo internacional do kg.

Calibrar uma massa é compará-la à massa do protótipo internacional do kg. Isto implica que massas de transferência são utilizadas entre a referência nacional e as massas destinadas para uso corrente.

### Unidade de base: o segundo

Primitivamente, o segundo, unidade de tempo, era definido como a fração  $1/86.400$  do dia solar médio. A definição exata do "dia solar médio" fora deixada aos cuidados dos astrônomos, porém os seus trabalhos demonstraram que o dia solar médio não apresentava as garantias de exatidão requeridas devido às irregularidades da rotação da Terra. Para conferir maior exatidão à definição da unidade de tempo, a 11ª CGPM sancionou outra definição fornecida pela União Astronômica Internacional, e baseada no ano trópico. Na mesma época, as pesquisas experimentais tinham já demonstrado que um padrão atômico de intervalo de tempo, baseado em uma transição entre dois níveis de energia de um átomo ou de uma molécula, poderia ser realizado e reproduzido com precisão muito superior.

Desta forma, a 13ª CGPM<sup>7</sup> decidiu substituir a definição do segundo pela seguinte: "O segundo (s) é a duração de  $9.192.631.770$  períodos da radiação correspondente à transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133". A radiação do Césio-133 é utilizada como referência para estabilizar a frequência de um oscilador de quartzo. Em 1997, o CGPM confirmou que: "essa definição se refere a um átomo de césio em repouso, a uma temperatura de  $0 \text{ K}$ "<sup>8</sup>.

### Unidade de base: o ampère

Diversas unidades elétricas ditas internacionais para a intensidade de corrente elétrica e para a resistência haviam sido introduzidas no Congresso Internacional de Eletricidade, em 1893. Embora por ocasião da 8ª CGPM<sup>9</sup> já fosse evidente a opinião unânime no sentido de substituir as unidades "internacionais" por unidades ditas "absolutas", a decisão formal de suprimir estas unidades "internacionais" foi tomada somente pela 9ª CGPM<sup>10</sup>, que adotou para o ampère, unidade de corrente elétrica, a seguinte definição: "o ampère é a intensidade de uma

corrente elétrica constante que, mantida em dois condutores paralelos, retilíneos, de comprimento infinito, de seção circular desprezível, e situados à distância de 1 m entre si, no vácuo, produz entre estes condutores uma força igual a  $2 \times 10^{-7}$  newton por metro de comprimento.”

#### Unidade de base: o kelvin

A definição da unidade de temperatura termodinâmica foi dada pela 10ª CGPM (CGPM 1956), que escolheu o ponto tríplice da água como ponto fixo fundamental, atribuindo-lhe a temperatura de 273,16 °K por definição. A 13ª CGPM<sup>11</sup> formulou a definição da unidade de temperatura termodinâmica: “o kelvin, unidade de temperatura termodinâmica, é a fração  $1/273,16$  da temperatura termodinâmica no ponto tríplice da água”. Esta mesma CGPM decidiu também que a unidade kelvin e seu símbolo K fossem utilizados para expressar um intervalo ou uma diferença de temperatura.

#### Unidade de base: o mol

Desde a descoberta das leis fundamentais da química, utilizaram-se diversas unidades denominadas, por exemplo, “átomo grama” ou “molécula grama”, para especificar quantidades de diversos elementos ou compostos químicos. Estas unidades eram estritamente ligadas aos “pesos atômicos” ou aos “pesos moleculares”. Originalmente, os “pesos atômicos” eram referidos ao elemento químico oxigênio. Porém, enquanto os físicos separavam os isótopos no espectrógrafo de massa e atribuíam o valor 16 a um dos isótopos do oxigênio, os químicos atribuíam o mesmo valor à mistura (levemente variável) dos isótopos 16, 17 e 18, que, para eles, constituía o elemento oxigênio natural.

Um acordo entre a União Internacional de Física Pura e Aplicada e a União Internacional de Química Pura e Aplicada resolveu esta dualidade em 1959-1960. Desde então, físicos e químicos concordam em atribuir o valor 12 para o isótopo 12 do carbono. A escala unificada assim obtida estabelece os valores das “massas atômicas relativas”. Faltava determinar a massa que corresponde à unidade de quantidade de carbono 12. Por acordo internacional, essa massa foi fixada em 0,012 kg, e foi dado o nome de mol à unidade da grandeza “quantidade de matéria”. Dessa forma, a definição adotada para o mol é a seguinte<sup>12</sup>: “o mol é a quantidade de matéria de um sistema contendo tantas entidades elementares quantos átomos existem em 0,012 kg de carbono 12. Quando se utiliza o mol, as entidades elementares devem ser especificadas, podendo ser átomos, moléculas, íons, elétrons, assim como outras partículas, ou agrupamentos especificados em tais partículas”. Nesta definição, entende-se que se faz referência aos átomos de carbono 12 livres, em repouso e no seu estado fundamental.

#### Unidade de base: a candela

As unidades de intensidade luminosa baseadas em padrões de chama ou filamento incandescente foram substituídas em 1948 pela “vela nova”, que correspondia à luminância do emissor de radiação Planck (corpo negro) à temperatura

de solidificação da platina. Em 1948, foi adotado o novo nome internacional, candela, para designar a unidade de intensidade luminosa. No entanto, em virtude das dificuldades experimentais da realização do irradiador de Planck a temperaturas elevadas e das novas possibilidades oferecidas pela radiometria, foi adotada, em 1979, a nova definição<sup>13</sup>: “a candela é a intensidade luminosa, em uma dada direção de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  hertz e cuja intensidade energética nessa direção é  $1/683$  watt por esterradianos”.

#### Unidades possuidoras de nomes especiais e símbolos particulares

Por questões de comodidade, certas unidades derivadas receberam nome especial e símbolo particular. Estes nomes e símbolos podem ser utilizados, por sua vez, para expressar outras unidades derivadas, sobretudo as unidades das grandezas relativas à radiação ionizante, tais como: atividade (becquerel – Bq); dose absorvida, energia específica, kerma (gray – Gy); equivalente de dose, equivalente de dose ambiente, equivalente de dose direcional, equivalente de dose individual, dose equivalente em um órgão (sievert – Sv).

Na prática, a fim de reduzir o risco de confusão entre grandezas de mesma dimensão, emprega-se, para exprimir sua unidade, de preferência um nome especial ou uma combinação particular de unidades. No âmbito das radiações ionizantes, utiliza-se a unidade SI de atividade, becquerel, mais vezes que o segundo elevado à potência menos um; e emprega-se a unidade SI de dose absorvida e a unidade SI de equivalente de dose, gray e sievert respectivamente, mais frequentemente que joule por kg. Os nomes especiais becquerel, gray e sievert foram introduzidos especificamente por motivos de risco para a saúde humana que poderiam resultar de erros no uso das unidades: segundo elevado à potência menos um e joule por kg.

Recentemente, foi publicado um artigo de revisão<sup>14</sup> no qual é apresentada uma evolução histórica neste último século das grandezas e unidades empregadas na dosimetria das radiações ionizantes. Especificamente na área de Proteção Radiológica, também foi publicada uma revisão bem interessante a respeito dos padrões internacionais para dosímetros empregados neste campo de interesse<sup>15</sup>.

#### Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia

O Vocabulário Internacional de Metrologia<sup>12</sup> foi traduzido por um Grupo de Trabalho de Terminologia da Rede Brasileira de Calibração, com o objetivo de padronizar e apresentar o atual estado da arte da linguagem metrológica brasileira.

#### Graus de equivalência de metrologia em dosimetria das radiações ionizantes

O arranjo de reconhecimento mútuo assinado por 38 Institutos Nacionais de Metrologia no BIPM, em fevereiro

de 1988, objetivou o estabelecimento dos graus de equivalência metrológica entre os padrões primários das principais grandezas físicas do SI. Na dosimetria das radiações ionizantes e na radioatividade, as grandezas em questão são o kerma no ar, a dose absorvida na água e na atividade. Para estabelecer os graus de equivalência entre os NMI para uma dada grandeza física, o principal elemento a ser avaliado é o valor de referência de uma comparação-chave.

A seguir, serão descritos os principais padrões primários que servem como base para se estabelecer a rastreabilidade das medições na dosimetria das radiações ionizantes, assim como na radioatividade.

#### **Câmara de ar-livre: requisitos**

- Campo elétrico na região coletora precisa ser uniforme.
- Campo elétrico precisa ser suficiente para reduzir a recombinação iônica.
- Dimensões precisam ser suficientemente grandes para que a maioria da energia dos elétrons liberados seja dissipada dentro do ar no interior da câmara.
- Ionização produzida pela radiação espalhada fora do feixe precisa ser pequena.
- Radiação proveniente de outras partes fora da abertura de entrada precisa ser reduzida por meio de uma blindagem adequada em torno da câmara.

#### **Vantagens da câmara de ar-livre**

- Possibilita um conhecimento preciso da massa de ar na qual os elétrons estão sendo liberados pela radiação.
- Assegura a coleta do número de íons igual ao número total de íons produzidos por esses elétrons.
- Mede precisamente a corrente de ionização resultante.

#### **Padrões de radioatividade**

A grande variedade de partículas emitidas pelos radionuclídeos implica alterações das fontes radioativas e, conseqüentemente, a realização de um padrão primário único em metrologia de radionuclídeos não é mais planejada. Desta forma, as referências primárias consistem na combinação de instrumentos e métodos de medição específicos a cada tipo de radionuclídeos ou, alternativamente, na medida direta da atividade das fontes radioativas. Sendo assim, as fontes são preparadas de forma que os padrões de radioatividade sejam os mais puros e mais homogêneos possíveis.

#### **International Reference System**

O Sistema Internacional de Referência (SIR), coordenado pelo BIPM, é um sistema criado com a finalidade de possibilitar aos Laboratórios Nacionais de Metrologia (LNM) verificarem seu grau de confiança de suas medições de atividade pela comparação com outros laboratórios. Dessa forma, emissores  $\gamma$  (líquidos ou gasosos) são enviados para o BIPM pelos LNM, onde eles são comparados com fontes padrão de meia-vida alta (como, por exemplo, o  $^{226}\text{Ra}$ ) usando câmaras de

ionização pressurizadas. Esse sistema de referência é um sistema simples, com alta estabilidade e que possibilita o estabelecimento dos graus de conformidade entre os laboratórios participantes dessas comparações interlaboratoriais.

#### **Banho de sulfato de manganês**

Neste sistema de padronização primária para fluência de nêutrons, uma fonte de Am-Be (padrão nacional de fluência) é introduzida no centro da parte interior do banho. Após um período de 24 horas, retira-se a fonte e é introduzido, no interior do banho de sulfato de manganês, um detector de cintilação para medir sucessivamente o decaimento gama dos átomos de manganês. Desta forma, o valor da taxa de fluência de nêutrons emitido pelo padrão nacional é comparado ao resultado obtido na padronização feita no BIPM.

#### **Ionometria**

A ionometria é o método de medição para a determinação da energia média por unidade de massa, transferida a uma massa conhecida de gás, da qual pode ser deduzida a energia transferida ao material circundante. Essas energias estão relacionadas à carga elétrica que a radiação ionizante libera por ionização. As câmaras de ionização são instrumentos que apresentam uma grande sensibilidade, e são utilizáveis para todas as radiações. Geralmente, as câmaras de ionização são empregadas para as medidas primárias de exposição e de kerma no ar (feixes de fótons). Além disso, elas são empregadas em medidas relativas de taxa de dose absorvida nos tecidos (radiação  $\gamma$ ) ou de taxa de dose absorvida na água (feixes de fótons e elétrons).

#### **Câmara cavitária: vantagens**

- É compacta: alcance dos elétrons na parede sólida é mil vezes maior do que no ar.
- Pode medir campos multidirecionais.
- Determinação da dose absorvida em qualquer material da parede por meio da teoria da cavidade.
- Pode ter várias configurações, possibilitando a medida da dose de partículas carregadas, nêutrons e fótons.
- As cavidades de gás podem ser pequenas e planas para medir a dose na superfície de um objeto simulador, a dose em profundidade e a dose em vários pontos.
- Carga coletada pode ser medida em um tempo real por meio de um eletrômetro.

#### **Calorimetria**

Este método de medição permite determinar, em uma massa conhecida de um determinado material (da ordem do grama), a energia média depositada pela radiação e que é transformada em calor. Por suas características básicas, o calorímetro é considerado como um padrão primário para a grandeza dose absorvida. Existem dois tipos

de calorímetros: o calorímetro de grafite e o calorímetro de água. Ambos apresentam uma baixa sensibilidade, da ordem de 1 mK/Gy, podendo ser utilizados apenas para energias acima de 1 MeV.

#### Calorímetro de grafite: vantagens

- Defeito térmico de calor conhecido.
- Toda a energia absorvida é transformada em calor.
- Tem alta difusibilidade térmica de forma que o calor é espalhado em torno de qualquer componente.
- É similar à água.
- É facilmente usinável.

#### Calorímetro de grafite: problemas

- Isolamento térmico do disco.
- Perda de calor pelo disco.
- Medidas de variações de temperatura da ordem de mK com precisão suficiente em laboratório, nas quais pode ocorrer uma variação de um grau durante uma série de medidas.

#### Dosimetria Fricke

O princípio de funcionamento do dosímetro Fricke é baseado na oxidação de uma solução aquosa ácida de sulfato ferroso. A quantidade de conversão de  $Fe^{+2}$  para  $Fe^{+3}$  está diretamente relacionada à dose absorvida no meio em questão e, pela medida da variação da densidade ótica com um espectrômetro, é determinada a dose absorvida. No entanto, a incerteza inerente ao rendimento radioquímico faz com que este sistema seja utilizado apenas para medidas relativas.

#### Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio do INCT em Metrologia das Radiações na Medicina (FAPESP e CNPq). Agradeço também aos comentários e sugestões da Doutora Linda V.E. Caldas.

## Referências

1. Frota MN. Metrology in Chemistry: a new challenge for the Americas: proceedings of the First Interamerican Workshop on Metrology in Chemistry. Rio de Janeiro: Qualimark; 1998. p. 1-25.
2. Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM). Portaria INMETRO nº 029 de 1995. Instituto Nacional de Metrologia e Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). 5ª Ed. Rio de Janeiro: SENAI; 2007.
3. BIPM. Mutual Recognition of national Measurement Standards and of Calibration and Measurement Certificates Issued by National Metrology Institutes (CIPM MRA). Sèvres, France: Comité International des Poids et Mesures; 1999.
4. Allisy PJ, Burns DT, Andreo P. International framework of traceability for radiation dosimetry quantities. *Metrologia*. 2009;46:S1-S8.
5. Quinn TJ. Base units of the Système International d'Unités, their accuracy, dissemination and international traceability. *Metrologia*. 1994;31: 515-27.
6. Giacomo P. News from the BIPM, New Definition of the Metre. *Metrologia* 1984;20(1):25-30.
7. Terrien J. News from the International Bureau of Weight and Measures. *Metrologia*. 1969;4(1):43.
8. Quinn TJ. News from the BIPM – International Report. *Metrologia*. 2000;37(10):94.
9. CGPM. Résolution de la 8<sup>e</sup> réunion de la CGPM. Substitution des unités électriques absolues aux unités dites «interantionnelles». *Comptes Rendus de la 8<sup>e</sup> CGPM*, p. 53, 1934.
10. CGPM. Résolution de la 9<sup>e</sup> réunion de la CGPM. Concernant la question des retouches à apporter à la Convention du Mètre. *Comptes Rendus de la 9<sup>e</sup> CGPM*, p. 72, 1949.
11. CGPM. Résolution 4 de la 13<sup>e</sup> réunion de la CGPM, Définition de l'unité SI de températurethermodynamique (kelvin). *Comptes Rendus de la 13<sup>e</sup> CGPM*, p. 104, 1969.
12. INMETRO. Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. 2ª edição, 2000.
13. CGPM. Résolution 3 de la 16<sup>e</sup> réunion de la CGPM. Unité SI d'intensité lumineuse (candela). *Comptes Rendus de la 16<sup>e</sup> CGPM*, p. 100, 1980.
14. Jennings WA. Evolution over the past century of quantities and units in radiation dosimetry. *J Radiol Prot*. 2007;27(1):5-16.
15. Behrens R, Ambrosi P. Review of international standards for dosimeters. *Rad Prot Dosim*. 2008;128:159-68.