

Comparação das razões C_K obtidas por diferentes laboratórios de dosimetria

Comparison of C_K values obtained by different dosimetry laboratories

Laura N. Rodrigues^{1,2}, Patrícia M. de Siqueira²

¹ Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, Brasil – Rio de Janeiro (RJ), Brasil

² Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN/CNEN) – São Paulo (SP), Brasil

Resumo

A fim de implementar o novo código de prática da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) no Brasil, o Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (LNMRI/IRD) e o Laboratório de Calibração de Instrumentos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (LCI/IPEN) estão realizando calibrações em termos de kerma no ar e em termos de dose absorvida na água, em feixes de ^{60}Co . As razões $N_{D,w}/N_K$ obtidas são comparadas com valores da literatura, obtendo-se concordância satisfatória. As diferenças entre os valores das razões C_K ($N_{D,w}/N_K$) obtidas no presente trabalho e os valores da literatura são devidas a vários fatores. Esses fatores podem ser as variações entre as câmaras, que devem ser objeto de diferenças nas incertezas estimadas pelos Laboratórios de Dosimetria Padrão Primário (PSDL), e as diferenças nos padrões utilizados por cada Instituto de Metrologia Nacional (NMI). No entanto, se forem conhecidas as razões entre cada NMI e o *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM), para os padrões de kerma no ar e de dose absorvida na água, é possível a normalização das razões C_K medidas para as “razões equivalentes ao BIPM”. Todos os resultados de razões C_K obtidos foram convertidos para as “razões equivalentes ao BIPM” para facilitar a comparação. Neste artigo, é discutida a utilização da razão C_K como parâmetro dependente da câmara e como indicador de controle de qualidade na verificação de resultados das calibrações rotineiras.

Palavras-chave: Protocolos de dosimetria, padronização secundária, laboratório de dosimetria, dose absorvida.

Abstract

In order to implement the new IAEA code of practice in Brazil the national calibration laboratories, the National Laboratory for Metrology of Ionizing Radiation and the Laboratory of Instrument Calibration, are calibrating clinical dosimeters in terms of both air kerma and absorbed dose to water in a ^{60}Co gamma ray beam. The $N_{D,w}/N_K$ ratios thus obtained are then compared with the literature values; a satisfactory agreement has been found. The differences between the C_K values obtained in the present work and the literature values may be due to several components. These could be the chamber-to-chamber variations which may be subject to different estimated uncertainties by *Primary Standard Dosimetry Laboratories* (PSDLs), and the variations in the standards used by each National Metrology Institute (NMI). However, since the ratio of both air kerma and absorbed dose to water standards for each NMI to those of the *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) are known, it is possible to reduce the measured ratios to the expected “BIPM equivalent ratios”. All these C_K results have been converted to the “BIPM equivalent values” to facilitate comparison. The use of the C_K value as a chamber dependent parameter and quality control indicator to verify the results of the routine calibrations is discussed in this paper.

Keywords: Dosimetry protocols, secondary standardization, dosimetry laboratory, absorbed dose.

Introdução

Desde 1978, o Comitê Alemão de Padrões (*Normenausschuss Radiologie im DIN – Deutsches Institut für Normung*) propõe formalmente a calibração de instrumentos de campo em termos de “dose absorvida na água” para toda a faixa de energia de feixes de fótons utilizados em Radioterapia¹. Entretanto, esta aproximação não foi adotada na época, uma vez que não existia

a disponibilidade de nenhum padrão de dose absorvida na água.

A vantagem principal de se utilizar a dose absorvida na água como padrão básico é que a mesma grandeza é empregada ao longo de toda a cadeia metrológica, desde os padrões primários até os instrumentos de campo. Além disso, a grandeza dose absorvida, em termos da qual os padrões primários determinam as suas leituras, estará próxima do efeito físico em que o padrão se baseia, o que

minimizará a aplicação de vários fatores de correção, assim como as incertezas envolvidas neste procedimento. É importante ressaltar que este conceito de calibração em termos de dose absorvida na água aplica-se a todos os tipos de radiação e para todas as energias.

Seguindo este conceito, vários laboratórios de calibração (NIST, NRC, METAS, LSDG, NPL e PTB)² desenvolveram ou estão desenvolvendo calorímetros como padrão primário para dose absorvida na água para radiação gama de ⁶⁰Co, bem como em aceleradores lineares. A primeira etapa neste procedimento é fornecer o fator de calibração em termos de dose absorvida na água para os usuários no feixe de referência, geralmente radiação gama de ⁶⁰Co. A segunda etapa consiste na determinação dos fatores de correção da câmara que dependem da qualidade do feixe para várias energias.

Desde a publicação do protocolo 277³ da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, do inglês *International Atomic Energy Agency*), vários países que tinham o seu próprio protocolo passaram a adotá-lo visando à uniformização da dosimetria em Radioterapia em nível internacional. Logo após a sua publicação, foi criado um Programa de Pesquisa Coordenado (CRP) pela IAEA com o objetivo de testar este protocolo. Além disso, houve a necessidade de aperfeiçoamento no cálculo dos fatores de correção e coeficientes de interação, de forma que as incertezas pudessem ser reavaliadas e, se possível, minimizadas. O trabalho desenvolvido pelo Programa de Pesquisa Coordenado resultou em um Relatório Técnico da IAEA⁴, no qual ficou estabelecido que a dosimetria para feixes de ⁶⁰Co, feixes de fótons e elétrons de altas energias ($E_0 > 10$ MeV) estavam consistentes com os conceitos estabelecidos pelo protocolo da IAEA.

Simultaneamente, surgiu uma proposta de um novo formalismo para a determinação da dose absorvida na água⁵. Neste formalismo, as etapas para a determinação da dose são bastante simplificadas e, conseqüentemente, as incertezas envolvidas são menores. Alguns laboratórios primários já estão utilizando este formalismo, com o objetivo de determinar a dose absorvida na água. Além do mais, várias comparações internacionais promovidas pelo *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) têm sido realizadas nos últimos anos com o propósito de aplicar este novo formalismo.

A IAEA publicou a versão final de um novo código de prática, o *Technical Reports Series* No. 398, baseado inteiramente em padrões de dose absorvida na água⁶. Este código de prática está sendo implementado gradualmente no Brasil, realizando a substituição do código de prática utilizado no país, o IAEA *Technical Reports Series* No. 277³, que é baseado em padrões de kerma no ar⁷.

Nos dois laboratórios de calibração do Brasil, o Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI) e o Laboratório de Calibração de Instrumentos (LCI), nos quais não há acesso a um acelerador linear, a aproximação utilizada é fornecer aos centros de Radioterapia o fator de calibração em termos de dose

absorvida na água para a câmara de ionização, na qualidade de referência do ⁶⁰Co, e derivar teoricamente os fatores de correção para o modelo apropriado de câmara, que deve ser aplicado para outras qualidades de feixe. Neste artigo, são discutidas as investigações realizadas com o intuito de mostrar a confiabilidade na utilização do código de prática 398 e os resultados de sua implementação.

Material e métodos

Com o objetivo de implementar o novo formalismo, baseado em padrões de dose absorvida na água, uma série de comparações tem sido realizada desde 1997⁸. O primeiro estágio dessa implementação foi analisar a estabilidade, a longo prazo, de quatro câmaras padrões secundários, utilizadas como instrumentos de transferência (câmaras NE 2561), com rastreabilidade ao BIPM, em termos da grandeza de interesse.

Portanto, o procedimento adotado no LNMRI e no LCI foi analisar a razão entre o fator de calibração em termos de dose absorvida na água e o fator de calibração em termos de kerma no ar, obtidos no ⁶⁰Co, para os quatro padrões de transferência utilizados, antes de oferecer o serviço de calibração em termos de dose absorvida na água aos usuários. Além disso, foi feita uma série de comparações entre estes padrões a fim de determinar o comportamento geral das câmaras.

Em ambos os laboratórios de calibração do Brasil, o LNMRI e o LCI, a implementação da calibração em termos de dose absorvida na água das câmaras de ionização dos hospitais iniciou-se em julho de 2002⁹. A partir de então, a estabilidade a longo prazo do padrão de trabalho é verificada em termos de kerma no ar e em termos de dose absorvida na água antes de cada calibração das câmaras dos usuários.

O segundo estágio da implementação consistiu na calibração dos padrões de transferência e de referência do LNMRI e do LCI, a fim de avaliar a razão $N_{D,w}/N_K$ para estes padrões. Em uma análise preliminar, as razões obtidas foram comparadas com os valores determinados por outros laboratórios, como o *National Physical Laboratory* (NPL), no Reino Unido, o Laboratório de Dosimetria da IAEA, entre outros.

As medidas foram feitas em uma instalação para irradiação com raios gama de ⁶⁰Co, que contém um irradiador de Cobalto-60 Gammatron, modelo S80 (Siemens). As câmaras foram colocadas em um dispositivo de posicionamento fixo para garantir o seu correto posicionamento. O centro das câmaras foi alinhado com o plano de referência, e as correntes de ionização foram medidas utilizando-se um eletrômetro modelo 10002 (PTW, Germany). No procedimento convencional, as correntes foram medidas a uma tensão de polarização de -300 V (tensão de polarização normal) e a uma tensão de -150 V, a fim de determinar o fator de correção para recombinação, que foi determinado por meio do método das duas voltagens, de acordo com

a IAEA⁷. Foram feitas séries de 5 medidas consecutivas e reproduzíveis, corrigidas para os valores de pressão e temperatura de referência (20°C e 101,325 kPa). As correntes de fuga foram medidas antes e depois de cada conjunto de medidas e verificou-se que seus valores relativos são geralmente menores que 0,10%. Em ambos os laboratórios, não foram aplicadas correções para polaridade.

Para a calibração no ar, foi utilizada uma distância fonte-câmara de 100 cm, e o tamanho do campo a essa distância foi de 10 cm x 10 cm. Com o intuito de minimizar as incertezas de posicionamento, as calibrações foram realizadas utilizando-se o método da substituição¹⁰.

A determinação da dose absorvida no LCI obedece às mesmas recomendações estabelecidas pela IAEA⁶, que são as seguintes: a distância da fonte ao plano de referência é de 100 cm; o tamanho do campo utilizado para calibração no ar e na água, no plano de referência, é de 10 cm x 10 cm; a profundidade de referência na água é de 5 cm. Um objeto simulador de água foi desenvolvido pela IAEA e distribuído dentre os Laboratórios de Dosimetria Padrão Secundários (SSDLs) pertencentes à rede IAEA/World Health Organization (WHO). O objeto simulador de água padrão da IAEA (30 cm x 30 cm x 30 cm com posições fixas para as câmaras) foi empregado utilizando-se uma capa de acrílico (PMMA) de 0,5 mm de espessura, também fornecida pela IAEA. Sua janela frontal possui 10 cm x 10 cm, com espessura de 1 mm.

Todas as câmaras de ionização foram posicionadas com a haste perpendicular à direção do feixe e as marcas apropriadas, tanto das câmaras como dos suportes de acrílico, voltadas para a fonte. Para que sejam atingidas as condições de trabalho, o sistema de medida é ligado, no mínimo, uma hora antes das medidas. Além disso, após ser feito o arranjo das câmaras no ar ou na água, é feito o equilíbrio com a temperatura ambiente pelo mesmo período de tempo. De acordo com Perroche e Boutillon¹¹, as câmaras devem ser submetidas a uma pré-irradiação de 15 minutos para prevenir fugas extras.

No tocante às grandezas de influências, a temperatura do ar nas câmaras é definida como sendo a mesma que a da água após o equilíbrio térmico. O tanque de água, objeto simulador e suportes de acrílico à prova d'água são deixados no interior da sala de irradiação para que seja alcançado o equilíbrio apropriado. A temperatura da água medida, em geral, será um grau abaixo da temperatura da sala de irradiação, devido à evaporação¹². A pressão atmosférica é verificada antes e após cada série de medidas. A umidade relativa é mantida entre 40 e 60%, não sendo aplicado fator de correção neste caso.

Resultados

Os valores de referência de kerma no ar e dose absorvida na água utilizados para determinação do fator de calibração em termos dessas grandezas de interesse são considerados como o valor médio das medidas feitas ao longo

de um período de 30 meses. Por questão de normalização, os valores são corrigidos para a data de 30/07/2002, para ambas as grandezas. O tempo de meia vida do ⁶⁰Co de 1.925,5 dias, desvio padrão (s)=0,5 dia, utilizado no LCI é o mesmo recomendado pela IAEA¹³. Neste contexto, foi observada uma variação média de ±0,39% para ambas as grandezas durante este período de tempo.

Os padrões de transferência do LNMRI utilizados para esta comparação são três câmaras de ionização cavitárias de grafite, modelo 2561 (Nuclear Enterprises, Wichita, Kansas, USA). A razão $N_{D,w}/N_K$ obtida no BIPM para os 3 padrões de transferência (números de série 168, 207 e 264) é igual a 1,091, s=0,003, que é compatível com outras medidas feitas no BIPM para as câmaras NE2561¹⁴, cujo resultado é 1,091, s=0,002. Uma boa concordância é verificada também ao comparar-se com razões semelhantes de 1,093, s=0,001 e 1,091, s=0,001, obtidos no NPL¹⁵ e na IAEA¹⁶, respectivamente, observando-se que a IAEA também é rastreável ao BIPM.

Com base nesta comparação, os outros dois padrões de transferência (números de série 158 e 169) foram calibrados no LNMRI em termos de kerma no ar e de dose absorvida na água, a fim de se obter a razão $N_{D,w}/N_K$, conhecida como razão C_K . O quinto padrão de transferência (número de série 169) participou de uma comparação promovida pela Rede IAEA/WHO em 1997¹⁷. O programa de testes de competência verificou a habilidade dos SSDLs em transferir a calibração de seu padrão de referência ao usuário¹⁸. Dessa forma, o SSDL calibrou uma câmara de ionização de sua escolha e a enviou à IAEA para calibração. Os fatores de calibração N_K e $N_{D,w}$ foram medidos no LNMRI e no Laboratório de Dosimetria da IAEA, e os valores obtidos foram comparados. O valor do coeficiente de calibração N_K medido no LNMRI para este modelo de câmara também foi determinado; a razão $N_{K,LNMRI}/N_{K,IAEA}$ obtida para esta câmara foi 1,000, e a razão correspondente $N_{D,w,LNMRI}/N_{D,w,IAEA}$ medida para esta câmara foi 0,990, identificada como participante nº 4 nesta intercomparação promovida pela IAEA¹⁷. Desta forma, a razão $N_{D,w,LNMRI}/N_{K,LNMRI}$ é conhecida e igual a 1,081, sendo este valor comparado com a razão $N_{D,w,IAEA}/N_{K,IAEA}$ obtida para a mesma câmara, cujo valor foi 1,092. A razão C_K medida no Laboratório de Dosimetria da IAEA concorda em 1% com o valor medido no LNMRI. Esta consistência na determinação dos fatores N_K e $N_{D,w}$ está dentro do limite de aceitação de 1,5% recomendado pela IAEA. Além do mais, como apontado por Andreo¹⁹, a comparação entre o BIPM e os outros Laboratórios de Dosimetria Padrão Primários (PSDLs, do inglês *Primary Standard Dosimetry Laboratory*) tem mostrado que a maioria deles concorda em torno de 1%.

A estabilidade a longo prazo dos padrões secundários do LNMRI foi avaliada a partir dos resultados de recalibração e também de comparações feitas em 1997, em termos de kerma no ar e de dose absorvida na água. O procedimento típico estabelecido para as comparações consistiu na normalização de todas as medidas em relação ao resultado obtido com o padrão nacional do LNMRI

(câmara NE 2561, número de série 168). A recalibração do padrão nacional no BIPM mostrou uma variação de $\pm 0,08\%$ na razão $N_{D,w}/N_K$, ao longo de 6 anos. No entanto, uma variação global de $\pm 0,22\%$ foi encontrada para os outros dois padrões secundários após sua recalibração. A estabilidade a curto prazo foi determinada a partir dos resultados obtidos durante as comparações, mostrando uma variação máxima de $0,18\%$ comparativamente à resposta do padrão nacional em um feixe de ^{60}Co .

Uma vez que estes resultados demonstraram a validade da abordagem adotada neste trabalho, alguns dosímetros clínicos passaram a ser calibrados, totalizando 154 câmaras de ionização. A razão C_K obtida para as câmaras NE 2571 tem excelente concordância com o valor obtido no BIPM de $1,098$, $s=0,001^{20}$, o valor obtido no NPL de $1,098^{14}$, o valor obtido na IAEA de $1,097$, $s=0,001^{16}$, o valor obtido no Bhabha Atomic Research Centre (BARC) de $1,095$, $s=0,006^{21}$, e o valor obtido no PTB de $1,092$, cujo desvio padrão (s) não foi explicitado pelos autores²².

A razão C_K obtida para as câmaras Farmer PTW N30001 mostrou uma concordância de $+0,18\%$ comparada à razão obtida na IAEA de $1,095$, $s=0,002^{16}$, e à razão obtida no BARC de $1,092$, $s=0,002^{21}$. O valor obtido na IAEA refere-se às câmaras de modelo N30001/30010, com 68 calibrações, e o valor observado pode ser considerado como um valor médio entre os valores obtidos no LCI e no BARC. No Laboratório de Dosimetria da IAEA, foi verificado que a estabilidade das câmaras N30001 excede o limite de tolerância de $0,5\%$ recomendado pelo Padrão Internacional (IEC, do inglês *International Electrotechnical Commission*)²³. O fabricante identificou e corrigiu o problema, produzindo um novo modelo de câmara de ionização, a câmara N30010. Do ponto de vista construtivo, as câmaras N30001 e N30010 são praticamente idênticas, no que diz respeito às dimensões internas da cavidade e da parede, capa de *build-up* e material do eletrodo central. As câmaras N30006 e N30013 são idênticas; portanto, os resultados foram agrupados.

As câmaras tipo Farmer (Nuclear Enterprises, Wichita, Kansas, USA) também foram investigadas, uma vez que ainda são comuns no país. O valor obtido para a razão C_K com as câmaras NE 2505/3A e NE 2581 mostrou uma variação máxima de $+1,2\%$ e $+0,8\%$, respectivamente, comparado com os valores da literatura. No entanto, as discrepâncias observadas nas câmaras tipo Farmer NE 2581 pode ser explicada considerando-se o material utilizado na capa de *build-up*, que, em alguns casos, é poliestireno e, em outros casos, é polimetilmetacrilato (PMMA)²⁴. No Código de Prática 398⁶ da IAEA, pode-se observar que na calibração destas câmaras foi obtida uma variação semelhante nos resultados. Devido a esta particularidade, as câmaras foram separadas em dois grupos diferentes, uma vez que o comportamento da câmara é pronunciado durante as calibrações em termos de kerma no ar, e as calibrações em termos de dose absorvida na água são feitas sem a capa de *build-up*. Somente os resultados das câmaras com a capa de *build-up*, cujo material

é o polimetilmetacrilato (PMMA), são apresentados neste trabalho.

As diferenças encontradas para as câmaras Exradin A12 se devem principalmente ao processo de fabricação das mesmas. Verificando-se de forma semelhante a análise feita para as câmaras NE 2581, as câmaras Exradin podem ser divididas de acordo com seu número de série, sendo um grupo as câmaras de números de série ###, e o outro grupo as de números de série XA010###. De acordo com o fabricante²⁵, o primeiro grupo foi fabricado pela Exradin a partir de moldagem feita por injeção. Por outro lado, o segundo grupo foi fabricado pela Standard Imaging, construindo-se as partes da câmara separadamente. Considerando-se todas as câmaras em um mesmo grupo, são observadas grandes diferenças nas razões C_K . Em consequência disso, as câmaras foram divididas em dois grupos distintos, a fim de se considerarem as diferenças de construção das mesmas. Adicionalmente, foi reportada na literatura¹¹ uma variação no fator de calibração para as câmaras com parede à prova d'água, cujo material é o A150 (material tecido-equivalente), nas calibrações em termos de kerma no ar, logo após a calibração na água. Os autores obtiveram dois valores para o fator de calibração N_K para este modelo de câmara, que difere de $0,3\%$ quando a determinação foi repetida vários meses depois. Para minimizar este efeito, recomenda-se que seja feita a calibração deste modelo de câmara primeiramente em termos de kerma no ar, seguida pela calibração em termos de dose absorvida na água. Deve ser ressaltado que o LNMRI participou de uma comparação recente promovida pelo Sistema Inter-Americano de Metrologia (SIM), cujo resultado mostrou uma concordância de $-0,2\%$ na calibração em termos de dose absorvida na água, comparado ao valor obtido no BIPM para este modelo de câmara²⁶.

Somente uma determinação da razão C_K foi feita para a câmara Exradin A14. Para finalizar, as câmaras Wellhöfer FG 65, Victoreen 580-006 e Sun Nuclear 100-730 também foram analisadas na presente investigação.

As razões C_K determinadas pelo LNMRI e pelo LCI são dadas na Tabela 1. Os valores obtidos por outros laboratórios de dosimetria, como BIPM, NPL, PTB, IAEA e BARC também são fornecidos para comparação. A incerteza relativa do fator de calibração N_K no LNMRI é de $0,8\%$ (fator de cobertura $k = 2$) e do fator $N_{D,w}$ é de $0,9\%$ (fator de cobertura $k = 2$), resultando em uma incerteza combinada de $1,2\%$ (fator de cobertura $k = 2$) para a razão $N_{D,w}/N_K$.

Discussão

Na comparação entre as razões C_K obtidas no presente trabalho e os valores da literatura, deve ser ressaltado que as diferenças observadas podem ser devidas às variações nos padrões utilizados por cada Instituto Nacional de Metrologia (NMI, do inglês *National Metrology Institute*). No entanto, uma vez que é conhecida a razão entre cada NMI em relação ao BIPM, dos padrões de kerma no ar

Tabela 1. Razões C_K determinadas pelo Laboratório de Calibração de Instrumentos (LCI) e Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI). O desvio padrão é relativo ao conjunto de câmaras investigado.

Modelo de câmara (NMI)	Amostragem	Razão C_K	Desvio padrão (%)
NE 2561			
LCI	02	1,091	0,69
BIPM ¹⁴	16	1,091	0,23
IAEA ¹⁶	40	1,091	0,09
NPL ¹⁵	37	1,093	0,13
NE 2571			
LCI	35	1,098	0,60
BARC ²¹	06	1,095	0,28
IAEA ¹⁶	70	1,097	0,09
NPL ¹⁵	01	1,098	---
PTB ²²	01	1,092	---
N 30001			
LCI	16	1,097	0,77
BARC ²¹	03	1,092	0,22
IAEA ¹⁶	68	1,095	0,98
N 30002			
LCI	02	1,095	---
IAEA ¹⁷	01	1,093	---
N 30004			
LCI	02	1,095	0,09
N 30006/30013			
LCI	19	1,097	0,46
N 23333			
LCI	08	1,092	0,88
NE 2505/3A			
LCI	10	1,091	1,00
IAEA ¹⁷	03	1,089	0,63
NE 2505/3B			
LCI	02	1,075	0,38
NE 2581			
LCI	05	1,091	0,77
BARC ²¹	01	1,095	---
IAEA ¹⁷	02	1,085	0,88
Exradin A12			
LCI			
XA010###	10	1,098	0,57
###	17	1,102	1,21
A14			
LCI	01	1,097	---
FG 65			
LCI	06	1,097	0,31
Victoreen 580-006			
LCI	06	1,094	1,00
SNC 100730			
LCI	02	1,109	1,99

NMI: Instituto de Metrologia Nacional; BIPM: *Bureau International des Poids et Mesures*; IAEA: Agência Internacional de Energia Atômica; NPL: *National Physical Laboratory*; BARC: *Bhabha Atomic Research Centre*.

e dose absorvida na água, é possível normalizar as razões medidas à “razão equivalente ao BIPM” para facilitar a comparação.

Seguindo este conceito, uma vez que as razões dos padrões de kerma no ar e de dose absorvida na água entre o NMI e o BIPM são determinadas por meio das expressões $[K(NMI)/K(BIPM)]$ e $[D_w(NMI)/D_w(BIPM)]$, a razão equivalente ao BIPM dos fatores de calibração é dada por:

$$\frac{N_{D,w}(BIPM)}{N_K(BIPM)} = [N_{D,w}(NMI)/N_K(NMI)] \left[\frac{K(NMI)/K(BIPM)}{D_w(NMI)/D_w(BIPM)} \right]$$

Onde:

$N_{D,w}(BIPM)$: fator de calibração em termos de dose na água medido pelo BIPM;

$N_K(BIPM)$: fator de calibração em termos de kerma no ar medido pelo BIPM;

$N_{D,w}(NMI)$: fator de calibração em termos de dose na água medido pelo NMI;

$N_K(NMI)$: fator de calibração em termos de kerma no ar medido pelo NMI;

$K(NMI)$: valor da taxa de kerma no ar medido pelo NMI;

$K(BIPM)$: valor correspondente medido pelo BIPM;

$D_w(NMI)$: valor da dose absorvida na água medido pelo NMI;

$D_w(BIPM)$: valor correspondente medido pelo BIPM.

O valor da razão $[K(LNMRI)/K(BIPM)]$ é 1,0004, $s=0,0023$ ²⁷. O valor da razão $[D_w(LNMRI)/D_w(BIPM)]$ – em que $D_w(LNMRI)$ é o valor da dose absorvida na água medido pelo LNMRI – é efetivamente 1,000, $s = 0,003$, assumindo-se que o padrão secundário do LNMRI é calibrado no BIPM e que o LCI é rastreável ao LNMRI. A expressão acima torna-se:

$$\frac{N_{D,w}(BIPM)}{N_K(BIPM)} = [N_{D,w}(LNMRI/LCI)/N_K(LNMRI/LCI)] \frac{1,0004 \pm 0,0023}{1,000 \pm 0,003}$$

Portanto,

$$\frac{N_{D,w}(BIPM)}{N_K(BIPM)} = 1,0004 C_K(LNMRI/LCI)$$

Na Tabela 2, são fornecidos os resultados obtidos pelo LNMRI e pelo LCI, juntamente com os resultados obtidos por outros NMIs, como o BIPM, BARC, National Institute of Standards and Technology (NIST), National Physical Laboratory (NPL), NRC, IAEA e o PTB. Todos os resultados foram convertidos na “razão equivalente ao BIPM”, para remover a diferença existente entre os padrões primários e facilitar a comparação. Assim como o LCI, o BARC não possui padrão de dose absorvida na água, não possuindo, assim, o valor $R_{D,w}$, e a IAEA não possui padrões primários. Os valores correspondentes a estes laboratórios estão correlacionados com os do BIPM e, portanto, entre si.

Tabela 2. “Razões equivalentes ao BIPM” obtidas pelo Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI) e pelo Laboratório de Calibração de Instrumentos (LCI), fornecidas juntamente com os resultados de outros Institutos de Metrologia Nacionais (NMIs). O desvio padrão é relativo ao conjunto de câmaras investigado.

Câmara	Amostragem	Razão equivalente ao BIPM	Desvio padrão (%)
NE 2561			
LCI	02	1,091	0,69
BIPM ¹⁴	16	1,091	0,23
NPL ¹⁵	37	1,097	0,13
NE 2571			
LCI	26	1,099	0,45
BIPM ²⁹	15	1,098	0,09
BARC ²¹	06	1,101	0,28
NPL ¹⁵	01	1,102	---
NIST ²⁹	05	1,104	0,32
NRC ²⁹	05	1,098	0,14

BIPM: *Bureau International des Poids et Mesures*; NPL: *National Physical Laboratory*; BARC: *Bhabha Atomic Research Centre*; NIST: *National Institute of Standards and Technology*; NRC: *National Research Council (Canada)*.

Pela Tabela 2, verifica-se que as razões C_K obtidas no LCI para as câmaras NE 2561 são comparáveis às obtidas pelo BIPM e NPL. Por outro lado, para as câmaras NE 2571, todos os NMIs concordam entre si dentro das incertezas padrões estatísticas. Os resultados do LCI estão em concordância de -0,5% com o NIST, -0,3% com o NPL e +0,1% com o NRC. Uma vez que as “razões equivalentes ao BIPM” suprimem qualquer possível variação nos padrões utilizados por cada NMI, as diferenças constatadas acima podem ser consideradas como uma verificação importante de controle de qualidade para todos os laboratórios.

Conclusão

O método adotado nesta investigação e a comparação das razões $N_{D,w}/N_K$ com os valores da literatura fornecem confiabilidade aos resultados obtidos e permitem que os fatores de calibração em termos de dose absorvida na água sejam fornecidos com prontidão aos hospitais do Brasil.

Na comparação das razões C_K obtidas no presente trabalho com os valores da literatura, as diferenças devem-se principalmente às variações entre os padrões utilizados por cada NMI ou Laboratório de Dosimetria. No entanto, conhecendo-se a razão entre o BIPM e cada NMI dos padrões de kerma no ar e de dose absorvida na água, é possível normalizar as razões medidas à “razão equivalente ao BIPM”²⁹. Uma vez que as “razões equivalentes ao BIPM” suprimem qualquer possível variação nos padrões utilizados por cada NMI ou Laboratório de Dosimetria, as

diferenças encontradas entre as razões C_K obtidas pelo LCI e por outros NMIs ou Laboratórios de Dosimetria podem ser consideradas como uma verificação importante de controle de qualidade para todos os laboratórios.

Agradecimentos

As autoras são gratas à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), Brasil, pelo suporte financeiro parcial a este trabalho, e aos comentários de Linda V. E. Caldas e Penelope Allisy-Roberts.

Referências

- Reich H. Choice of the measuring quantity for therapy-level dosimeter. *Phys Med Biol.* 1979;24(5):895-900.
- Allisy PJ, Burns DT, Andreo P. International framework of traceability for radiation dosimetry quantities. *Metrologia.* 2009;46(2):S1-S8.
- International Atomic Energy Agency. Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams. An International Code of Practice. Technical Reports Series No. 277. Vienna: IAEA; 1987.
- International Atomic Energy Agency. Review of data and methods recommended in the International Code of Practice: IAEA Technical Report Series No. 277. Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams, Proceedings of a Consultants Meeting, International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA, 1993.
- Hohlfeld K. The standard DIN 6800. Procedures for absorbed dose determination in radiology by the ionization method. *Dosimetry in Radiotherapy IAEA-SM-298/31*, International Atomic Energy Agency, I:13-22;1988.
- International Atomic Energy Agency. Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy. Technical Reports Series No. 398. Vienna: IAEA; 2000.
- International Atomic Energy Agency. Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams. 2nd edition Technical Report Series No.277. Vienna: IAEA; 1997.
- Rodrigues LN, Nascimento DMFR, Baptista LMAM. Quality assurance program of standards of Radiotherapy at LNMRI/IRD World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering. *Medical and Biological Engineering and Computing.* 1997;35(Suppl. 2):1089.
- Rodrigues LN, Da Silva CM. Implementation of the new IAEA code of practice in Brazil Standards and Codes of Practice in Medical Radiation Dosimetry. *Proceedings of IAEA Symposium*; Vienna. 2003;1:257-262.
- International Atomic Energy Agency. Calibration of Dosimeters used in Radiotherapy. Technical Report Series No. 374, Vienna; 1994.
- Perroche A-M, Boutillon M. Long-term stability of measurements in the ⁶⁰Co field at the BIPM. *Metrologia.* 1995;32(1):43-50.
- Lillicrap SC, Owen B, Williams JR, Williams PC. Code of Practice for high-energy photon therapy dosimetry based on the NPL absorbed dose calibration service. *Phys Med Biol.* 1990;35(10):1355-60.
- International Atomic Energy Agency. X-ray and gamma-ray standards for detector calibration. TecDoc 619. Vienna: IAEA; 1991.
- Boutillon M. Personal communication; 1995.
- Sharpe P. Progress Report on radiation dosimetry at NPL Consultative Committee for Ionization Radiation. Working document CCRI(I)/01-21:1-7. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures; 2001.
- Czap L, Meghzifene A, Shortt KR, Andreo P. Stability of reference class ionization chambers used for radiotherapy dosimetry: IAEA experience

- International Symposium on Standards and Codes of Practice in Medical Radiation Dosimetry. Book of Extended Synopses. IAEA-CN-96-32P, 64-65. Vienna: IAEA; 2002.
17. Meghzifene A, Czap L, Andreo P. Intercomparison of ionization chamber calibration factors in the IAEA/WHO network of SSDs. *SSDL Newsletter* 38:13-19. Vienna: IAEA; 1998.
 18. Shortt KR, Meghzifene A, Izewska J, Pernicka F, Tölli H, Vatnitsky S, et al. IAEA Subprogramme on Dosimetry and Medical Radiation Physics (DMRP). Report on Activities, 2001-2002. Consultative Committee for Ionization Radiation. Working Document CCRI(I)/03-08:1-18. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures; 2003.
 19. Andreo P. Absorbed dose beam quality factors for the dosimetry of high-energy photon beams. *Phys Med Biol.* 1992;37(12):2189-211.
 20. Allisy-Roberts PJ, Burns DT. Dosimetry comparisons and calibrations at the BIPM Consultative Committee for Ionization Radiation. . Working document CCRI(I)/99-1:1-14. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures; 1999.
 21. Vijayam M, Shigwan JB, Patki VS, Soman AT, Govinda Rajan KN, Shaha VV, et al. Verification of the IAEA Code of Practice for medium energy X-ray beams and experimental determination of C_k values at Co-60 energy for different types of ionisation chambers. International Symposium on Standards and Codes of Practice in Medical Radiation Dosimetry. Book of Extended Synopses. IAEA-CN-96-61P:122-123. Vienna: IAEA; 2002.
 22. Kramer HM. Informative progress report on the standards for water absorbed dose at PTB. Consultative Committee for Ionization Radiation. Working document CCRI(I)/01-20:1-2. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures; 2001.
 23. International Electrotechnical Commission. Medical Electrical Equipment. Dosimeters with Ionization Chambers as used in Radiotherapy. Standard IEC-60731. Geneva: International Electrotechnical Commission; 1997.
 24. Andreo P. Personal communication; 2002.
 25. Nelson K. Personal communication; 2002.
 26. Shortt KR, Ross CK, Seuntjens JP. The role of comparisons in confirming the accuracy of dosimetric standards. Recent Developments in Accurate Radiation Dosimetry. Proceedings of the International Workshop Montreal; 2001; Seuntjens JP, Mobit PN. editors. Madison, WI: Medical Physics Publishing; 2002.
 28. Rogers DWO. Values of $N_{D,w}/N_K$ measured at NMIs for different ion chambers. Consultative Committee for Ionization Radiation. Working document CCRI(I)/03-50:1. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures; 2003.
 27. Allisy-Roberts PJ, Boutillon M, Rodrigues LN. Comparison of the standards of air kerma of the LNMRI and the BIPM for ^{60}Co γ rays. Rapport BIPM-96/3:1-7. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures; 1996.
 28. Allisy-Roberts P. Personal communication; 2004.
 29. Shortt KR, Shobe J, Domen S. Comparison of dosimetry calibration factors at the NRCC and the NIST. National Research Council of Canada. National Institute of Standards and Technology. *Med Phys.* 2000;27(7):1644-54.

