

INTERCOMPARAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE ATIVIDADE UTILIZADOS EM SERVIÇOS DE MEDICINA NUCLEAR*

Alessandro Martins da Costa¹, Linda V.E. Caldas²

Resumo **OBJETIVO:** O objetivo deste trabalho foi estabelecer um padrão de trabalho para intercomparação e calibração de medidores de atividade (calibradores de dose) utilizados na maioria dos serviços de medicina nuclear, para determinação da atividade dos radionuclídeos administrados aos pacientes nos exames específicos ou nos procedimentos terapêuticos. **MATERIAIS E MÉTODOS:** Foi utilizado um calibrador de dose comercial, um conjunto de fontes radioativas padrões, além de seringas, frascos e ampolas contendo soluções de radionuclídeos utilizados em medicina nuclear. **RESULTADOS:** O calibrador de dose comercial foi calibrado com soluções de radionuclídeos utilizados em medicina nuclear. Os testes simples do instrumento, tais como o teste de linearidade e da variação da resposta com o volume da fonte a uma concentração de atividade constante, foram descritos e realizados. **CONCLUSÃO:** O instrumento estudado pode agora ser utilizado como sistema de referência para intercomparação e calibração de outros instrumentos medidores de atividade, como um método de controle da qualidade de calibradores de dose utilizados em serviços de medicina nuclear.

Unitermos: Medicina nuclear; Calibrador de dose; Padrão de trabalho; Intercomparação; Calibração; Controle da qualidade.

Abstract *Intercomparison and calibration of dose calibrators used in nuclear medicine facilities.*

OBJECTIVE: The aim of this work was to establish a working standard for intercomparison and calibration of dose calibrators used in most of nuclear medicine facilities for the determination of the activity of radionuclides administered to patients in specific examinations or therapeutic procedures. **MATERIALS AND METHODS:** A commercial dose calibrator, a set of standard radioactive sources, and syringes, vials and ampoules with radionuclide solutions used in nuclear medicine were utilized in this work. **RESULTS:** The commercial dose calibrator was calibrated for radionuclide solutions used in nuclear medicine. Simple instrument tests, such as linearity response and variation response with the source volume at a constant source activity concentration were performed. **CONCLUSION:** This instrument may be used as a reference system for intercomparison and calibration of other activity meters, as a method of quality control of dose calibrators utilized in nuclear medicine facilities.

Key words: Nuclear medicine; Dose calibrator; Working standard; Intercomparison; Calibration; Quality control.

INTRODUÇÃO

Os serviços de medicina nuclear fazem uso de um calibrador de dose para determinar a atividade de radionuclídeos administrados a pacientes para propósitos diagnósticos e/ou terapêuticos. Um calibrador de dose consiste essencialmente de uma câmara de ionização do tipo poço e de um eletrômetro com mostrador digital que

permite uma leitura direta em unidades de atividade (múltiplos da unidade becquerel ou submúltiplos da unidade anteriormente empregada, curie).

A medição de atividade é feita utilizando-se uma condição fixa, pré-definida do instrumento, tal como uma tecla, um potenciômetro ou um fator de multiplicação ajustado eletronicamente para cada radionuclídeo particular.

A aceitação geral dos calibradores de dose pelos serviços de medicina nuclear deve-se a sua simplicidade de operação, estabilidade a curto e a longo prazos e sua versatilidade de operação, permitindo a medição da atividade de soluções radioativas em frascos, seringas e ampolas.

A norma da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) que estabelece os

requisitos de radioproteção e segurança para os serviços de medicina nuclear⁽¹⁾ adota o termo curiômetro para definir o instrumento destinado a medir a atividade de radionuclídeos utilizados em medicina nuclear, em vez do termo mais comum, criado comercialmente, calibrador de dose. No último termo, dose quer dizer dose farmacêutica, isto é, a quantidade prescrita de uma substância a ser administrada para propósitos médicos. Este termo pode ser mal interpretado como dose absorvida ou como dose equivalente, que são grandezas radiológicas coincidentemente também aplicáveis ao uso de radionuclídeos em medicina nuclear. Por este motivo, a popularização do termo calibrador de dose é infeliz. Na Argentina foi adotado o termo espanhol para calibradores de atividade

* Trabalho realizado no Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares – Comissão Nacional de Energia Nuclear (Ipen-CNEN), São Paulo, SP

1. Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear.

2. Doutora em Ciências na Área de Física Nuclear.

Endereço para correspondência: Dr. Alessandro Martins da Costa, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Avenida Professor Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária, São Paulo, SP, 05508-900. E-mail: amcosta@net.ipen.br

Recebido para publicação em 20/1/2003. Aceito, após revisão, em 20/3/2003.

(“calibradores de actividad”). Cientistas franceses introduziram o termo “actvimètre”, que em espanhol pode ser adaptado como “activímetro”. Este termo utiliza a palavra grega “metron” (medição ou instrumento de medição) em vez de calibrador, também sujeito a críticas⁽²⁾. No Brasil, o termo curiômetro utiliza a palavra curie (nome da unidade de atividade anteriormente empregada). Como o curie (Ci) não faz parte do Sistema Internacional, devendo ser substituída pelo becquerel (Bq), talvez o mais correto seria usar o termo medidor de atividade. Neste trabalho resolveu-se adotar o termo mais utilizado internacionalmente, calibrador de dose.

Uma vez que o calibrador de dose é empregado para determinar a atividade do radionuclídeo administrado ao paciente num exame específico ou em procedimento terapêutico, é de vital importância que esteja em perfeito funcionamento. Isto só pode ser assegurado se determinados procedimentos de garantia da qualidade forem seguidos. Alguns testes de controle da qualidade devem ser feitos diariamente, outros trimestralmente e outros semestralmente ou anualmente, testando-se, por exemplo, a exatidão e a precisão, a reprodutibilidade e a linearidade de resposta^(1,3-13).

Os calibradores de dose comerciais são normalmente calibrados utilizando soluções padrões dos radionuclídeos (calibração direta)⁽¹⁴⁻¹⁸⁾ de um laboratório nacional de padrões (ou rastreável a ele), ou alternativamente por comparação com um instrumento de referência (calibração indireta). Na calibração indireta as medições do instrumento a ser calibrado e do instrumento de referência diretamente calibrado são comparadas pela introdução de uma fonte de referência sob condições idênticas de medição no poço de cada uma das câmaras. As condições operacionais da fonte a ser medida são aplicadas e a medição do primeiro instrumento é ajustada.

A intercomparação é um dos melhores procedimentos para o programa de garantia da qualidade em determinada área de atuação, particularmente em medicina nuclear, porque não somente a calibração do instrumento é verificada mas também toda a série de medições, incluindo o desempenho do pessoal que opera os instrumentos^(2,19-32). Em uma intercomparação, são

distribuídas amostras de solução contendo um radionuclídeo conhecido, mas com a atividade desconhecida pelos participantes. Depois de medições cuidadosas pelo organizador, os participantes medem a atividade sob as condições usuais e relatam seus valores ao organizador da intercomparação. Mais tarde, cada participante é informado do valor certificado da atividade de sua amostra. Este procedimento serve também para fornecer uma recalibração do instrumento do usuário. Todos os resultados recebidos são tratados por métodos estatísticos e relatados anonimamente.

O nosso objetivo foi estabelecer um padrão de trabalho para intercomparação e calibração de calibradores de dose utilizados em serviços de medicina nuclear.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi utilizado um calibrador de dose comercial, que foi implementado como sistema de referência, nível padrão de trabalho. Também foi utilizado um conjunto de fontes radioativas padrões, com certificados de calibração. Soluções padronizadas de radionuclídeos foram utilizadas para calibração do sistema de referência. Fontes não seladas de tecnécio-99m foram utilizadas para os testes de linearidade e de geometria no sistema de referência.

O calibrador de dose comercial, modelo 13001, foi desenvolvido no Instituto de Engenharia Nuclear, CNEN, Rio de Janeiro. As medições de atividade são realizadas por circuitos eletrônicos desenvolvidos em conjunto com uma câmara de ionização do tipo poço, a argônio pressurizado, extremamente sensível e estável.

As medições podem ser feitas sob uma faixa de atividade da ordem de 37 kBq até 74 GBq (de 1 mCi até 2 Ci).

A seleção do radionuclídeo a ser medido é feita por meio de um mostrador numérico mecânico, situado no painel dianteiro. A leitura da atividade é feita por meio de um mostrador digital de 3½ dígitos em quatro escalas calibradas diretamente em mCi (0,001–1,999 mCi; 0,001–19,99 mCi; 0,001–199,9 mCi; 0,001–1999 mCi).

Uma blindagem externa à câmara de ionização protege o usuário da exposição a radiações intensas, bem como reduz o

efeito da radiação de fundo em medições de níveis de radiação baixos. Tendo em vista que o equipamento foi calibrado com a blindagem colocada na sua posição, a possibilidade de se realizar medições incorretas causadas pelo uso da blindagem fica eliminada.

O equipamento possui, ainda, como acessórios, um protetor para o poço, utilizado para evitar a contaminação acidental da câmara de ionização, e um recipiente bastante estável para amostras, projetado para acomodar os mais variados tipos de seringas no disco anular superior, bem como diversos tipos de frascos e ampolas no copo inferior. Em caso de contaminação do protetor do poço, a sua substituição é possível. O protetor deve estar sempre na sua posição, pois a câmara foi calibrada com ele. O recipiente para amostras é colocado no interior do protetor do poço e tem um efeito de blindagem desprezível. O equipamento possui também uma característica bastante útil que é a compensação da radiação de fundo por meio de um potenciômetro multivoltas situado no painel dianteiro. O ajuste é independente da escala e do isótopo selecionado.

As três fontes padrões utilizadas como referência são o cobalto-57, o bário-133 e o céσιο-137, da Amersham, Inglaterra, que têm certificados de calibração rastreáveis aos padrões mantidos nos laboratórios do Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Alemanha. Estas três fontes cobrem a faixa de energia de utilização de um calibrador de dose. Cada uma é constituída de um frasco de polietileno de 25 ml contendo o radionuclídeo distribuído em aproximadamente 10 ml de resina e selado com resina inativa. As fontes padrões de referência são designadas para simular a geometria de um radionuclídeo de meia-vida curta em solução num frasco similar.

Amostras de soluções dos radionuclídeos mais comumente utilizados clinicamente foram padronizadas, com emissão de certificados de calibração. Foram utilizadas ampolas de vidro com aproximadamente 1 ml de solução e parede com 1 mm de espessura para calibração do sistema de referência. As soluções padronizadas foram o cromo-51, o gálio-67, o tecnécio-99m, o iodo-123, o iodo-131, o samário-153 e o tálio-201.

RESULTADOS

O sistema de referência foi calibrado para diversos radionuclídeos utilizados clinicamente. Uma fonte padrão de cada radionuclídeo foi colocada no poço da câmara de ionização e a escala do instrumento foi posicionada para o intervalo de atividade adequado. O mostrador mecânico foi variado até que a leitura do mostrador digital correspondesse à atividade certificada. Para alguns radionuclídeos, tais como o cromo-51, a corrente de ionização produzida é muito baixa e, por isso, para se obter a atividade da fonte, é necessário multiplicar a leitura obtida por um fator 10. Os números de calibração obtidos são apresentados na Tabela 1. Estes números de calibração são somente para o instrumento de referência e não devem ser utilizados para instrumentos similares.

Tabela 1 Números de calibração do sistema de referência, calibrador de dose IEN 13001.

Radionuclídeo	Número de calibração
Cromo-51	155
Cobalto-57	096
Gálio-67	088
Tecnécio-99m	101
Iodo-123	164
Iodo-131	180
Bário-133	217
Césio-137	236
Samário-153	029
Tálio-201	076

A reprodutibilidade (estabilidade a longo prazo) do sistema de referência é verificada periodicamente, utilizando-se a fonte de césio-137. Com a fonte dentro do poço da câmara, selecionam-se as condições de operação para cada radionuclídeo para o qual o instrumento está calibrado e mede-se a atividade, registrando-se o resultado. Como as condições de operação selecionadas para a realização deste teste não são aquelas apropriadas para a fonte de césio-137, a atividade registrada é, em geral, diferente da atividade verdadeira da fonte. Este fato, entretanto, não tem importância para o estudo da reprodutibilidade. Uma verificação trimestral é geralmente suficiente para se avaliar a reprodutibilidade nestas condições⁽¹⁰⁾. Durante um ano de estudo nenhum resultado das medições

divergiu do limite de aceitação recomendado no manual do fabricante ($\pm 5\%$), o que indica que não houve falha no desempenho do instrumento nas condições de medição selecionadas.

Foram realizados também os seguintes testes com o sistema de referência: exatidão, precisão, linearidade de resposta e de geometria. Os limites de aceitação foram baseados nas recomendações do manual do fabricante.

Como o sistema de referência indica os valores de atividade somente em submúltiplos de curie (mCi), todos os resultados foram transformados para múltiplos de becquerel (MBq e GBq), para apresentação em unidades do Sistema Internacional.

A exatidão e a precisão do sistema de referência foram verificadas com as fontes padrões de referência de cobalto-57, bário-133 e césio-137. O limite de aceitação para os testes de exatidão e de precisão recomendado no manual do fabricante é de $\pm 5\%$. Selecionadas as condições operacionais apropriadas, cada fonte a ser medida foi introduzida no poço da câmara e foram registradas dez medições espaçadas de 30 segundos. O desvio percentual entre a média das atividades medidas (dez medições) e a atividade da fonte padrão já com a aplicação do fator de correção para o decaimento radioativo foi menor que 0,5% para as três fontes, como pode ser observado na Tabela 2. Considerando o limite de aceitação de $\pm 5\%$, estes resultados mostram um desempenho excelente do sistema de referência para o teste de exatidão.

A Tabela 3 apresenta o desvio percentual entre a atividade individual medida e a média das atividades medidas, que constitui o teste de precisão do sistema. Para as três fontes, todas as medições de atividade apresentaram desvio percentual menor que 0,5%, que está dentro de $\pm 5\%$, que é o limite de aceitação para o teste de precisão.

A linearidade de resposta do sistema de referência foi testada pelo acompanhamento do decaimento radioativo de uma amostra de tecnécio-99m de atividade inicial de 42,4 GBq, em 10 ml de solução num frasco de vidro de 30 ml. Foram selecionadas as condições de operação apropriadas para o tecnécio-99m. Com a fonte no poço da câmara, foi obtida uma medição. O dia e a hora da medição foram registrados. Este procedimento foi repetido a cada duas horas durante cada dia de trabalho por quatro dias.

Uma estimativa da incerteza em uma única medição foi feita transferindo-se a incerteza da atividade da fonte padrão utilizada para calibração ($\pm 2,0\%$), que neste caso é a componente dominante na incerteza total.

Tabela 2 Teste de exatidão do sistema de referência, calibrador de dose IEN 13001. Desvio percentual entre a média das medidas, $A_{\text{média}}$, e a atividade da fonte padrão com correção para o decaimento, A.

	$A_{\text{média}}$ (MBq)	A (MBq)	Desvio (%)
Cobalto-57	40,94	40,81	0,3
Bário-133	7,881	7,881	0,0
Césio-137	8,739	8,695	0,5

Tabela 3 Teste de precisão do sistema de referência, calibrador de dose IEN 13001. Atividade medida, A_i , e desvio percentual com relação à média das medidas mostradas na Tabela 2. O desvio padrão experimental, $s(A_i)$, também é apresentado.

	Cobalto-57		Bário-133		Césio-137	
	A_i (MBq)	Desvio (%)	A_i (MBq)	Desvio (%)	A_i (MBq)	Desvio (%)
	41,03	0,22	7,881	0	8,732	-0,08
	41,07	0,32	7,881	0	8,769	0,34
	41,03	0,22	7,881	0	8,732	-0,08
	41,11	0,42	7,881	0	8,732	-0,08
	41,03	0,22	7,918	0,47	8,695	-0,50
	41,11	0,42	7,881	0	8,732	-0,08
	40,92	-0,05	7,881	0	8,732	-0,08
	40,03	0,22	7,881	0	8,769	0,34
	41,00	0,15	7,884	-0,47	8,732	-0,08
	41,07	0,32	7,881	0	8,769	0,34
$s(A_i)$	0,32		0,017		0,023	

A Figura 1 mostra a atividade medida em função do tempo decorrido em relação à primeira medição e a curva teórica baseada no decaimento da fonte calculado a partir da medição feita 30 horas após o início do teste. Nenhuma medição individual da atividade divergiu do limite de aceitação recomendado no manual do fabricante ($\pm 10\%$), o que indica que a resposta do instrumento é linear em toda a faixa de atividade em que o teste foi realizado.

Quando foi estabelecida a calibração do instrumento, foram utilizadas soluções padrões de radionuclídeos em um determinado recipiente. Outros recipientes, tais como frascos e seringas de plástico ou de vidro, podem ter volumes e propriedades de absorção diferentes, e para estes devem ser determinados fatores de correção.

No teste de geometria foi avaliada a variação da atividade medida em função do volume de uma amostra, mantendo-se a quantidade de material radioativo presente (^{99m}Tc) no calibrador de dose de referência.

Foram utilizadas seringas descartáveis de plástico de 1 e 5 ml com um volume inicial de amostra de 0,2 ml, e também uma de 10 ml com um volume inicial da amostra de 0,4 ml. O volume da amostra nas seringas foi aumentado gradativamente, com adições de água destilada (0,2 ml para as seringas de 1 e 5 ml, e 0,4 ml para a seringa de 10 ml), até se alcançar o volume máximo de cada seringa. Após cada adição, agitou-se levemente a seringa para se tornar homogênea a solução radioativa. Quando o volume máximo de cada seringa foi alcançado, o seu conteúdo foi transferido para um frasco de 30 ml e completado até o volume de 10 ml e uma nova medição da amostra foi feita. Foram então determinados os fatores de correção, dividindo-se a atividade medida no frasco de 30 ml pelas atividades medidas na seringa.

As Tabelas 4, 5 e 6 mostram os fatores de correção, para as seringas de 1 ml, 5 ml e 10 ml, respectivamente, em função do volume da amostra.

CONCLUSÕES

Um calibrador de dose comercial, fabricado no Brasil, foi calibrado com soluções padrões de radionuclídeos utilizados clinicamente (calibração direta). Também fo-

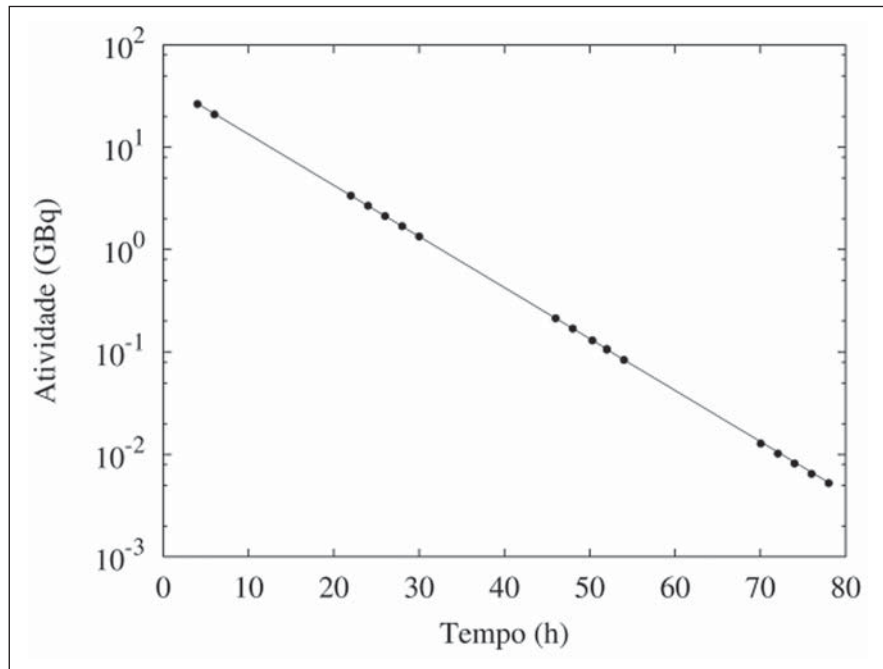


Figura 1. Teste de linearidade do sistema de referência, calibrador de dose IEN 13001.

Tabela 4 Fatores de correção do sistema de referência, calibrador de dose IEN 13001, para uma seringa descartável de 1 ml, utilizando-se uma amostra de ^{99m}Tc com um volume inicial de 0,2 ml.

Volume (ml)	Fator de correção	Incerteza
0,2	0,880	0,025
0,4	0,898	0,025
0,6	0,898	0,025
0,8	0,936	0,026
1,0	0,956	0,027

ram descritos e realizados testes simples do instrumento, tais como os de exatidão, precisão, linearidade de resposta e variação da resposta com o volume da fonte a uma concentração de atividade constante, tendo os resultados se mostrado dentro dos limites de aceitação, indicando a alta qualidade metrológica deste sistema de referência.

O instrumento calibrado e testado neste trabalho pode, agora, ser utilizado como referência para uma intercomparação dos calibradores de dose dos serviços de medicina nuclear do país. Este procedimento permitirá a recalibração dos instrumentos dos usuários.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior),

da Fapesp (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), e do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

REFERÊNCIAS

1. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Requisitos de radioproteção e segurança para serviços de medicina nuclear. CNEN-NN-3.05, abril 1996.
2. Rodríguez Pasqués RH, Rotta MC, De Cabrejas ML. Experience on radionuclide calibrators at the National Atomic Energy Commission of Argentina. Int J Nucl Med Biol 1983;10:97-101.
3. Hare DL, Hendee WR, Whitney WP, Chaney EL. Accuracy of well ionization chamber isotope calibrators. J Nucl Med 1974;15:1138-41.
4. Kowalsky RJ, Johnston RE, Chan FH. Dose calibrator performance and quality control. J Nucl Med Technol 1977;5:35-40.
5. American National Standard Institute. Calibration and usage of "dose calibrator" ionization chamber for the assay of radionuclides. ANSIN42.13, 1978.
6. Davis DA, Giomuso CA, Miller WH, et al. Dose calibrator activity linearity evaluations with ALARA exposures. J Nucl Med Technol 1981;9:188-90.
7. Jain AN, Rehman MA. Quality control of dose calibrators. Nuklearmedizin 1981;20:247-50.
8. Williams CC, Kereiakes JG, Grossman LW. The accuracy of ^{99m}Tc molybdenum assays in ^{99m}Tc technetium solutions. Radiology 1981;138:445-8.
9. Ahluwalia B. Dose calibrator linearity - a regulatory requirement. Health Phys 1985;49:967-9.
10. Weber DA, Paras P, Harris CC, et al. Initial testing and quality control for radionuclide dose calibrators. Committee on Standardization of Nuclear Medicine Instrumentation, American College of Nuclear Physicians. Nucl Med Commun 1986;7:555-65.

Tabela 5 Fatores de correção do sistema de referência, calibrador de dose IEN 13001, para uma seringa descartável de 5 ml, utilizando-se uma amostra de ^{99m}Tc com um volume inicial de 0,2 ml.

Volume (ml)	Fator de correção	Incerteza
0,2	0,978	0,028
0,4	0,978	0,028
0,6	0,978	0,028
0,8	0,978	0,028
1,0	1,000	0,028
1,2	1,000	0,028
1,4	1,000	0,028
1,6	1,000	0,028
1,8	1,000	0,028
2,0	1,000	0,028
2,2	1,000	0,028
2,4	1,000	0,028
2,6	1,023	0,028
2,8	1,023	0,028
3,0	1,023	0,028
3,2	1,023	0,028
3,4	1,023	0,028
3,6	1,023	0,028
3,8	1,023	0,028
4,0	1,023	0,028
4,2	1,046	0,030
4,4	1,046	0,030
4,6	1,046	0,030
4,8	1,046	0,030
5,0	1,046	0,030

Tabela 6 Fatores de correção do sistema de referência, calibrador de dose IEN 13001, para uma seringa descartável de 10 ml, utilizando-se uma amostra de ^{99m}Tc com um volume inicial de 0,4 ml.

Volume (ml)	Fator de correção	Incerteza
0,4	0,944	0,027
0,8	0,944	0,027
1,2	0,944	0,027
1,6	0,962	0,027
2,0	0,962	0,027
2,4	0,962	0,027
2,8	0,962	0,027
3,2	0,962	0,027
3,6	0,962	0,027
4,0	0,962	0,027
4,4	0,962	0,027
4,8	0,962	0,027
5,2	0,981	0,028
5,6	0,981	0,028
6,0	0,981	0,028
6,4	0,981	0,028
6,8	1,000	0,028
7,2	1,000	0,028
7,6	1,000	0,028
8,0	1,000	0,028
8,4	1,020	0,029
8,8	1,020	0,029
9,2	1,020	0,029
9,6	1,020	0,029
10,0	1,020	0,029

11. Dydek GJ, Blue PW, Tyler HN Jr. Comparison of attenuators for linearity testing of the dose calibrator. *J Nucl Med Technol* 1989;16:111–5.
12. Santry DC, Bowes GC. Half-life of ^{99m}Tc in linearity testing of radionuclide calibrators. *Health Phys* 1989;57:673–5.
13. International Atomic Energy Agency. Quality control of nuclear medicine instruments. Vienna: IAEA-TECDOC-602, 1991.
14. Coursey BM, Calhoun JM, Cessna JT. Radioassays of yttrium-90 used in nuclear medicine. *Nucl Med Biol* 1993;20:693–9.
15. Zimmerman BE, Cessna JT, Schima FJ. The stan-

ardization of the potential bone palliation radiopharmaceutical $^{117m}\text{Sn}(+4)\text{DTPA}$. *Appl Radiat Isot* 1998;49:317–28.

16. Zimmerman BE, Cessna JT. The standardization of ^{62}Cu and experimental determinations of dose calibrator settings for generator-produced $^{62}\text{CuPTSM}$. *Appl Radiat Isot* 1999;51:515–26.
17. Zimmerman BE, Cessna JT, Unterweger MP, Li AN, Whiting JS, Knapp FF Jr. A new experimental determination of the dose calibrator setting for ^{188}Re . *J Nucl Med* 1999;40:1508–16.
18. Zimmerman BE, Cessna JT. Experimental determinations of commercial 'dose calibrator' settings for

nuclides used in nuclear medicine. *Appl Radiat Isot* 2000;52:615–9.

19. Genna S, Webster EW, Brantley JC, *et al.* A nuclear medicine quality control program. *J Nucl Med* 1972;13:285–6.
20. Hauser W. The 1972 nuclear medicine survey. Radionuclide identification and activity measurement. *Am J Clin Pathol* 1974;61:943–6.
21. Hauser W. Results of the 1972 CAP/NBS study of radionuclide measurements. *Am J Clin Pathol* 1975;63:545–8.
22. Szörényi A, Vágvölgyi J. Experiences of the metrological supervision of radionuclide calibrators in Hungary. *Int J Nucl Med Biol* 1983;10:91–6.
23. Woods MJ. Intercomparison of radionuclide calibrator measurements in U.K. hospitals. *Int J Nucl Med Biol* 1983;10:103–5.
24. Herrera NE, Paras P. Q-series. The College of American Pathologists surveillance of activity (dose) calibrators. *Int J Nucl Med Biol* 1983;10:107–10.
25. Golas DB, Calhoun JM. U.S. National Bureau of Standards/Atomic Industrial Forum radioactivity measurements assurance program. *Int J Nucl Med Biol* 1983;10:163–8.
26. Paras P, Comer FM, Demeis F, Coursey BM, Calhoun JM, Golas DB. Evaluation of radionuclide dose-calibrator measurements. *Trans Amer Nucl Soc* 1986;53:18.
27. Reher DFG, Merlo P. A quality control exercise of radionuclide calibrators among Belgian hospitals. *Eur J Nucl Med* 1990;17:103–5.
28. Debertain K, Schrader H. Intercomparisons for quality assurance of activity measurements with radionuclide calibrators. *Nucl Instr Meth* 1992;A312:241–5.
29. Furnari JC, De Cabrejas ML, Rotta MC, *et al.* Impact of dose calibrators quality control programme in Argentina. *Nucl Instr Meth* 1992;A312:269–71.
30. Woods MJ, Keightley JD, Ciocanel M. Intercomparison of ^{67}Ga solution sources in UK hospitals, 1996. Teddington, Aug. 1996. NPL Report CIRA (EXT) 012.
31. Woods MJ, Keightley JD, Ciocanel M. Intercomparison of ^{123}I solution sources in UK hospitals, 1996. Teddington, Jan. 1997. NPL Report CIRA (EXT) 017.
32. Iwahara A, Oliveira AE, Tauhata L, *et al.* Performance of dose calibrators in Brazilian hospitals for activity measurements. *Appl Radiat Isot* 2002;56:361–7.