

COMPARAÇÃO ENTRE FATORES DE CALIBRAÇÃO EM TERMOS DE DOSE ABSORVIDA NO AR PARA UMA CÂMARA DE IONIZAÇÃO DE PLACAS PARALELAS*

Roseli T. Bulla¹, Linda V.E. Caldas²

Resumo **OBJETIVO:** O objetivo deste trabalho foi realizar uma comparação entre os fatores de calibração em termos de dose absorvida no ar determinados em feixes gama (⁶⁰Co) e de elétrons. **MATERIAIS E MÉTODOS:** Foram utilizados um irradiador de ⁶⁰Co e um acelerador linear Varian, modelo Clinac 2100C, com feixes de fótons e de elétrons. Foram testadas uma câmara de ionização cilíndrica e três de placas paralelas. **RESULTADOS:** Os sistemas de medidas foram submetidos aos testes preliminares (estabilidade de resposta e corrente de fuga), com resultados muito bons. Os fatores de calibração em termos de dose absorvida no ar foram determinados utilizando-se quatro sistemas de medidas e dois tipos de objetos simuladores, com a obtenção de resultados dentro das recomendações internacionais. **CONCLUSÃO:** Os resultados mostraram que os fatores de calibração em termos de dose absorvida no ar obtidos para câmaras de ionização de placas paralelas, determinados em feixes de ⁶⁰Co, são no máximo 1,2% mais altos que os valores obtidos em feixes de elétrons de altas energias. *Unitermos:* Câmaras de ionização; Feixes de elétrons; Calibração de instrumentos.

Abstract *Comparison of absorbed dose to air calibration factors for a parallel plate ionization chamber.*

OBJECTIVE: The objective of this study was to compare the absorbed dose to air calibration factors determined in gamma (⁶⁰Co) and electron beams. **MATERIALS AND METHODS:** An irradiator with a ⁶⁰Co source and a Varian, Clinac 2100C linear accelerator with photon and electron beams were utilized. One thimble-type and three parallel-plate ionization chambers were tested. **RESULTS:** The measurement systems were submitted to preliminary tests (response stability and leakage current), with quite good results. The absorbed dose to air calibration factors were determined using four measurement systems and two types of phantoms. Results were obtained in compliance with the international recommendations. **CONCLUSION:** Absorbed dose to air calibration factors obtained for parallel plate ionization chambers, determined in ⁶⁰Co beams, at maximum, are 1.2% higher than the values obtained in high energy electron beams.

Keywords: Ionization chambers; Electron beams; Calibration of instruments.

INTRODUÇÃO

Nas medidas de dose absorvida em feixes de fótons e elétrons num ponto de referência, o dosímetro mais utilizado é a câmara de ionização, recomendada pelos protocolos internacionais⁽¹⁻¹¹⁾, em virtude da sua precisão e exatidão. No entanto, este tipo de câmara muitas vezes não possui o fator de calibração em termos de dose absorvida no ar, $N_{D,ar}$, que relaciona a dose no gás da câmara e a carga coletada; com isso, há necessidade de uma calibração para que sua resposta

indique a dose absorvida mais exata possível.

A determinação do fator de calibração $N_{D,ar}$ para uma câmara de placas paralelas, em feixes de ⁶⁰Co e de elétrons, não possui rastreabilidade assegurada, mas sim em termos de N_K ; o valor de $N_{D,ar}$ é derivado a partir deste termo e são recomendados diferentes procedimentos pelos protocolos de dosimetria, sendo que a recomendação internacional é a utilização do protocolo TRS 381⁽¹⁰⁾. Neste caso, o fator de calibração $N_{D,ar}$ da câmara de ionização de placas paralelas é obtido a partir da comparação do valor da dose absorvida na água D_w determinado em um feixe de elétrons de energia alta com uma câmara de referência cilíndrica, que possui um valor $N_{D,ar}$ conhecido. Uma intercomparação similar em um objeto simulador em um feixe de radiação gama do ⁶⁰Co também permite a determinação de $N_{D,ar}$

para este tipo de câmara, desde que se considere a correção apropriada para a diferença entre a composição da câmara e o material do simulador⁽¹²⁻¹⁶⁾.

Vários trabalhos têm estimado valores de $N_{D,ar}$ para várias câmaras de placas paralelas e alguns trabalhos mostram que o valor de $N_{D,ar}$ é mais alto na calibração com feixes de ⁶⁰Co em objetos simuladores do que com feixes de elétrons de altas energias^(12,13). Assim sendo, este trabalho foi realizado com o objetivo de analisar algumas técnicas de calibração de dosímetros clínicos, determinando o fator de calibração $N_{D,ar}$ para câmaras de placas paralelas nos feixes de radiação gama de ⁶⁰Co do Laboratório de Calibração de Instrumentos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (LCI-IPEN/São Paulo) e com feixes de elétrons de altas energias do Hospital Israelita Albert Einstein (HIAE).

* Trabalho realizado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Comissão Nacional de Energia Nuclear, São Paulo, SP.

1. Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear.

2. Doutora em Ciências na Área de Física Nuclear.

Endereço para correspondência: Dra. Linda V.E. Caldas, Avenida Professor Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária, São Paulo, SP, 05508-000. E-mail: lcaldas@ipen.br / rtbulla@ig.com.br

Recebido para publicação em 10/5/2005. Aceito, após revisão, em 27/8/2005.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os fatores de calibração das câmaras de ionização de placas paralelas foram determinados usando-se quatro sistemas de medidas: uma câmara cilíndrica (sistema A) com o fator de calibração em termos de kerma no ar e, conseqüentemente, com um fator de calibração em termos de dose absorvida no ar, conhecida em feixes de ^{60}Co como câmara referência, e três câmaras de placas paralelas (sistemas B, C e D). Todas as câmaras acopladas a seus respectivos eletrômetros e suas especificações estão apresentadas na Tabela 1.

Os parâmetros empregados no cálculo do valor de $N_{D,ar}$ são fornecidos pelo protocolo TRS 381 (Tabela 2). Como se espera uma diferença nos valores do fator de calibração $N_{D,ar}$ entre os dois métodos de medidas (i.é, em feixes de ^{60}Co e de elétrons), deve ser tomada atenção máxima para minimizar os erros e reproduzir as condições de calibração (Tabela 3) recomendadas pelo protocolo TRS 381.

O posicionamento das câmaras durante a calibração, no LCI-IPEN e no HIAE, foi obtido com o auxílio de sistemas de raios laser, que foram alinhados com os centros geométricos dos sistemas de colimação. As câmaras foram posicionadas paralelas à direção dos feixes, e para reduzir a incerteza aleatória na medida da carga, as medidas foram obtidas por meio de dez leituras consecutivas correspon-

dentos a uma medida (tomando-se o valor médio) em cada tensão.

1. Sistemas de radiação

Foram utilizados um irradiador com uma fonte de ^{60}Co , Philips, modelo XR-2000, do LCI-IPEN, e um acelerador linear, Varian, modelo Clinac 2100C, pertencente ao HIAE, com dois feixes de fótons com energias nominais de 6 e 18 MeV e cinco feixes de elétrons com energias nominais de 4, 6, 9, 12 e 16 MeV.

As condições ambientais, tanto do LCI-IPEN como da Radioterapia do HIAE, foram controladas por meio de sistemas de ar condicionado, desumidificadores, e com auxílio de um barômetro portátil, um termômetro digital e um higrômetro.

2. Sistemas de medidas

Foram utilizados sistemas de medidas com câmaras de ionização acopladas aos seus respectivos eletrômetros Keithley, modelo 35614 EBS, e a um eletrômetro Physikalisch-Technische Werkstätten (PTW), modelo 10002, cujas especificações estão apresentadas na Tabela 1. O sistema de referência utilizado foi uma câmara Nuclear Enterprises (NE), tipo dedal, modelo 2505/3A, série 2080, com rastreabilidade ao Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), Rio de Janeiro, RJ.

O tempo de estabilização dos sistemas constituídos pelas câmaras e seus eletrô-

metros foi de 30 minutos antes do início das medidas.

3. Objetos simuladores

Foram utilizados os seguintes objetos simuladores (“phantoms”):

a) Simulador de água fabricado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), com dimensões de $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$, cujo material das suas paredes e dos suportes das câmaras de ionização é acrílico (PMMA), pertencente ao IPEN.

b) Simulador sólido, projetado e fabricado no IPEN, com dimensões de $30 \times 30 \times 20 \text{ cm}^3$, cujo material das placas e dos suportes das câmaras de ionização é acrílico (PMMA), pertencente ao IPEN.

c) Simulador de água, PTW, com dimensões de $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$, cujo material das suas paredes e dos suportes das câmaras de ionização é acrílico (PMMA), pertencente ao HIAE.

4. Parâmetros do feixe de elétrons

As propriedades dosimétricas dos feixes clínicos de elétrons dependem significativamente do espectro de energia (ou distribuição de energia). Este espectro pode ser caracterizado por meio de parâmetros como para a energia nominal de 16 MeV:

$(E_{p,0}) = 16,70 \text{ MeV}$, a energia mais provável na superfície do objeto simulador;
 $(\bar{E}_0)^2 = 15,85 \text{ MeV}$, a energia média na superfície do objeto simulador;

Tabela 1 Características físicas e códigos das câmaras de ionização utilizadas neste trabalho.

Características	Câmaras de ionização			
	A	B*	C	D
Câmara	NE	IPEN	PTW	PTW
Fabricante				
Tipo	Dedal	Placas paralelas	Placas paralelas	Placas paralelas
Modelo	2505/3A	—	23.343	23.343
Série	2019	—	2395	1369
Volume nominal (cm^3)	0,6	0,056	0,055	0,055
Parede: material	Grafite	PMMA	PMMA	PMMA
espessura (g/cm^2)	0,065	—	—	—
Raio da cavidade (mm)	3,2	—	—	—
Capa de equilíbrio eletrônico: material	PMMA	PMMA	PMMA	PMMA
espessura (g/cm^2)	0,551	0,500	0,500	0,500
Eletrodo: diâmetro (mm)	—	6,0	6,0	6,0
espaçamento (mm)	—	2	2	2
Janela: material	—	Mylar aluminizado	Poliétileno grafite	Poliétileno grafite
espessura (mg/cm^2)	—	0,2	102	102
Largura do anel de guarda (mm)	—	0,7	0,2	0,2

* A câmara deste sistema não é impermeável, podendo ser utilizada apenas com o simulador sólido. Os demais sistemas possuem câmaras impermeáveis, podendo-se utilizar os simuladores sólido e de água.

Tabela 2 Parâmetros utilizados nos cálculos.

Radiação	Fatores de correção	Câmaras de ionização		
		NE 2505	PTW 23.343	IPEN
⁶⁰ Co	P_{wall}	0,9908	1,009 (em água) 1,006 (PMMA)	1,000 (PMMA)
	P_{cel}	1,0000	—	—
	P_{dis}	0,9872	—	—
Elétrons	P_{wall}	1,0000	1,000	1,000
	P_{cel}	0,9980	—	—
	P_{cav}	0,9825	1,000	1,000

Tabela 3 Condições de referência para os feixes de radiação gama de ⁶⁰Co e os feixes de elétrons.

	⁶⁰ Co (IPEN)	Elétrons (HIAE)
Simulador de água – dimensões (cm ³)	30 × 30 × 30	40 × 40 × 40
Simulador sólido – dimensões (cm ³)*	30 × 30 × 20	30 × 30 × 20
Campo de radiação (cm ²)	10 × 10	10 × 10
Distância fonte–câmara ou fonte–superfície (cm)	100	100
Profundidade de referência no simulador (cm)	5 [†]	2 [‡]

* Simulador sólido: conjunto de placas de PMMA de 30 × 30 × 1 cm³ cada uma; este material foi escolhido devido às características da câmara de placas paralelas, modelo PTW/Markus (sistemas B e C). [†] No simulador sólido ou de placas de PMMA, esta profundidade é equivalente a 4,74 cm, pois 1 mm de água corresponde a 0,874 mm de PMMA. [‡] Conforme a IAEA⁽¹⁴⁾, corrigida para o plástico.

$(E_p)_z = 11,19$ MeV, a energia mais provável numa profundidade de referência; $E_z/E_0 = 0,706$.

RESULTADOS

1. Calibração num objeto simulador em feixes de ⁶⁰Co

A calibração das câmaras de ionização de placas paralelas foi feita em feixes de ⁶⁰Co no irradiador Philips, do LCI-IPEN.

A câmara de placas paralelas foi calibrada em comparação com uma câmara de ionização cilíndrica previamente calibrada dentro de um simulador de água. As câmaras foram posicionadas alternativamente numa profundidade de referência num simulador, e o fator $N_{D,ar}$ foi obtido da comparação das doses absorvidas com as duas câmaras.

Neste método, o ponto efetivo de medidas para as câmaras fica a uma profundidade de referência de 5 cm, isto é, o centro da superfície frontal da cavidade de ar da câmara de placas paralelas é definido num ponto efetivo da câmara cilíndrica, que é igual a 0,6.r na frente do centro da câmara (r é o raio da cavidade). Porém, por razões práticas, coloca-se o centro da câmara cilíndrica numa profun-

didade de 5 cm e faz-se a correção para o efeito de deslocamento com um fator (P_{dis}^{Ref}). Este fator de deslocamento garante que o centro de qualquer câmara de ionização cilíndrica usada num simulador esteja a uma mesma profundidade, independente do diâmetro da câmara.

A Figura 1 apresenta um diagrama de montagem experimental utilizada para medidas em ⁶⁰Co.

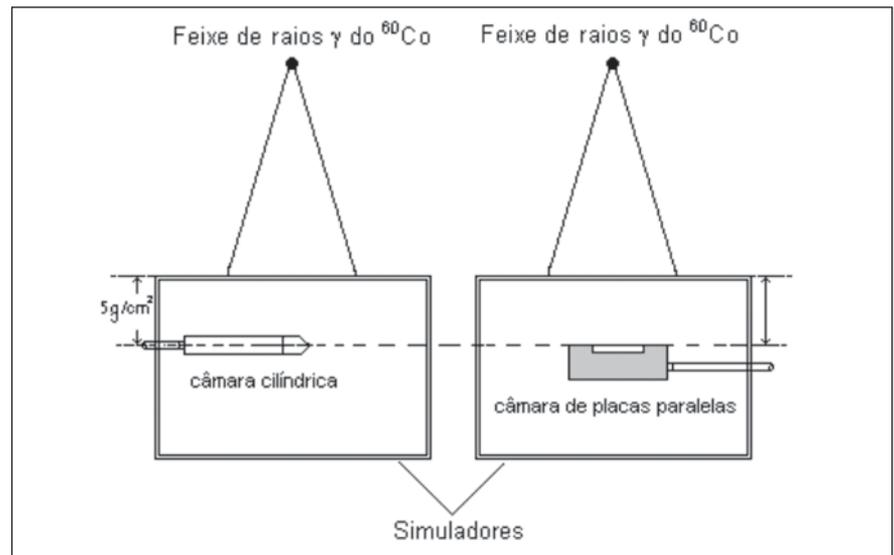


Figura 1. Montagem experimental em feixes de ⁶⁰Co.

Por meio da expressão (1), foi obtido $N_{D,ar}$ para a câmara de placas paralelas:

$$N_{D,ar}^{pp} = N_{D,ar}^{Ref} \cdot \frac{M^{Ref}}{M^{pp}} \cdot \frac{P_{wall}^{Ref} \cdot P_{cel}^{Ref} \cdot P_{dis}^{Ref}}{P_{wall}^{pp}} \quad (1)$$

onde:

$N_{D,ar}^{pp}$: fator de calibração da câmara em termos de dose absorvida no ar;

M^{Ref} e M^{pp} : ($M = \bar{M}_o \cdot f_{Tp} \cdot k_h \cdot P_s$) – leituras das câmaras de ionização cilíndrica e de placas paralelas, respectivamente, para correções ambientais de referência: pressão e temperatura, (f_{Tp}), e umidade relativa do ar (k_h); e para correção da recombinação (P_s);

P_{wall}^{Ref} : fator de correção para atenuação da parede da câmara cilíndrica de referência;

P_{cel}^{Ref} : fator que leva em conta a “não equivalência de ar” do material no eletrodo central de uma câmara de ionização;

P_{dis}^{Ref} : $1 - 0,004.r$, onde r é o raio interno da câmara de referência em mm, para um feixe de ⁶⁰Co, segundo Johansson *et al.*⁽¹⁴⁾, artigo no qual a publicação TRS 381⁽¹⁰⁾ se baseia.

P_{wall}^{pp} : fator de correção de atenuação da parede da câmara de placas paralelas.

Neste procedimento, os fatores de calibração das câmaras de ionização são obtidos em termos de kerma no ar e, conseqüentemente, são determinados os fatores de calibração em termos de dose absorvida no ar, ($N_{D,ar}$), em feixes de radiação gama do ⁶⁰Co. As medidas realizadas

no Laboratório de Calibração de Dosímetros Clínicos do IPEN, para determinação de $N_{D,ar}$ (mGy/nC), utilizando simuladores de água e de PMMA (conforme Tabela 3), e a câmara de referência NE 2505/3A do sistema A com os sistemas B e C do LCI-IPEN e sistema D do HIAE são apresentados na Tabela 4.

Para as medidas realizadas no simulador sólido é necessário fazer a correção na leitura da medida, $M_{plást}$, pela expressão: $M^{pp} = M_{plást} \cdot h_m$, onde $h_m = 1,00975$ para uma profundidade máxima de referência; no caso do ^{60}Co , são 5 cm de água, para se obter o fator de calibração nas condições de referência.

Na Tabela 4 é possível observar que, ao se comparar simultaneamente os dois métodos de calibração (na água e no PMMA), o comportamento da câmara de ionização de placas paralelas do sistema C pode ser considerado excelente, com uma variação percentual entre os métodos de apenas 0,05%. O sistema D apresenta, na comparação, variação percentual de 2,1%. Cada valor corresponde à média de vários fatores, obtidos em diferentes datas, com uma incerteza que não ultrapassa 1,4%.

No cálculo das incertezas associadas foram levados em consideração a incerteza do equipamento na calibração do sistema no laboratório padrão, os fatores ambientais (temperatura, pressão e umidade relativa do ar), as incertezas no instrumento de medida experimental, o tempo de estabilidade das câmaras e os fatores de perturbação das câmaras para cada tipo de radiação.

2. Calibração com feixes de elétrons

A calibração das câmaras de ionização de placas paralelas foi realizada em feixes de elétrons com energia nominal de 16 MeV num acelerador linear, modelo Clinac 2100C, pertencente ao HIAE.

Neste método, as medidas foram obtidas num simulador sólido utilizando-se a mesma metodologia do simulador de água, em que as câmaras de placas paralelas foram calibradas em comparação com uma câmara de ionização cilíndrica previamente calibrada e com $N_{D,ar}$ conhecido numa profundidade de referência (para os elétrons de energia nominal de

16 MeV foi de 2 g/cm² em água). Foram feitas correções nas medidas, $M_{plást}$, realizadas com o objeto simulador de placas sólidas, que deve ser de mesmo material da câmara de placas paralelas e nas condições de referência da Tabela 3.

A Figura 2 apresenta um diagrama da montagem experimental utilizada para as medidas no acelerador linear.

O fator de calibração $N_{D,ar}$ é calculado utilizando-se a expressão (1); os parâmetros de correção empregados no cálculo segundo o protocolo TRS 381 são dados na Tabela 2.

Neste procedimento, os fatores de calibração das câmaras de ionização foram obtidos em termos da dose absorvida no ar, determinados em feixes de elétrons com energia nominal de 16 MeV. Os resultados das medidas efetuadas no HIAE, $N_{D,ar}$ (mGy/nC), utilizando-se os simuladores de água e de PMMA (Tabela 3), e a câmara de referência NE 2505/3A do sis-

tema A, os sistemas B e C do LCI-IPEN e o sistema D do HIAE, são apresentados na Tabela 4.

Nesta tabela, comparando-se os dois métodos de calibração (na água e no objeto simulador de PMMA), o sistema C apresenta uma diferença percentual menor que 0,1% e o sistema D, uma diferença máxima de 0,8%. A incerteza máxima associada ao fator de calibração é de 1,8% nas calibrações com câmaras de placas paralelas, que está dentro do limite recomendado pelos protocolos da IAEA^(3,11).

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Os resultados encontrados mostram que os valores de $N_{D,ar}$ para as câmaras de placas paralelas determinados em feixes de ^{60}Co são 1,2% mais altos que o valor obtido em feixes de elétrons de altas energias. Pode-se relacionar esta diferença nas séries de medidas, como em

Tabela 4 Fatores de calibração, em termos de dose absorvida no ar, $N_{D,ar}$ (mGy/nC), das câmaras de ionização de placas paralelas, determinados em feixes de ^{60}Co e de elétrons nos simuladores de água e de PMMA.

Sistemas	$N_{D,ar}$ (mGy/nC)			
	Câmara cilíndrica NE de referência (sistema A)			
	^{60}Co		Elétrons	
	Método em água	Método em PMMA	Método em água	Método em PMMA
B	—	312,71	—	317,19
C	473,27	473,52	467,83	468,06
D	448,46	439,05	455,84	452,35

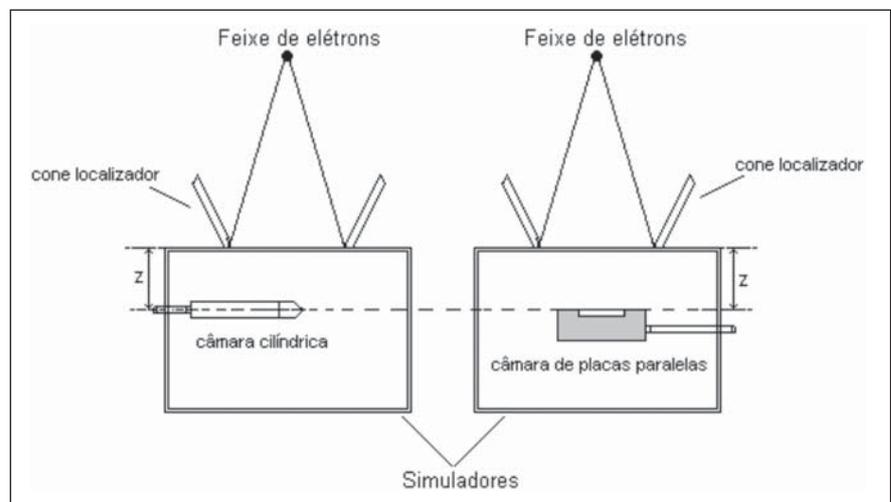


Figura 2. Montagem experimental em feixes de elétrons.

alguns trabalhos publicados^(12,13,17), mas isto logo é descartado, pois na medida de carga a máxima incerteza entre as medições é de $\pm 0,15\%$ para cada tensão. Atribui-se esta discrepância aos fatores de correção de atenuação da parede das câmaras de placas paralelas, dados pelo protocolo, que não devem estar coerentes quando se realiza a calibração em feixes de fótons.

McEwen *et al.*⁽¹⁸⁾ mostraram que as câmaras de ionização de placas paralelas do tipo Markus não são muito confiáveis em suas respostas em relação a outras câmaras em feixes de elétrons, devido à grande variação do fator de perturbação deste tipo de câmara, em função da energia E_z , isto é, pode ocorrer grande variação de P_u em função de E .

O comportamento da câmara de ionização de placas paralelas do sistema C pode ser considerado excelente, com uma diferença percentual de apenas 0,05% entre os dois métodos de calibração utilizando dois objetos simuladores diferentes.

Os resultados deste estudo estão perfeitamente dentro do que as recomendações internacionais sugerem para uma calibração deste tipo de câmara e em relação à incerteza total associada ao fator de calibração da câmara, tanto em termos de dose absorvida no ar em feixes de radiação gama de ^{60}Co como de elétrons.

Agradecimentos

As autoras agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico

e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro parcial no desenvolvimento deste projeto; ao Sr. Marcos Xavier, pelo suporte técnico; à Dra. Laura Natal Rodrigues, por sugestões importantes no texto; ao Hospital Israelita Albert Einstein, pela oportunidade de utilização do acelerador linear; e em especial ao Dr. José Carlos Cruz, pelas discussões proveitosas.

REFERÊNCIAS

1. A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams. *Med Phys* 1983;10:741–771.
2. Haybittle JL, Bradshaw AL, Burns JE, Morris WT, Pitchford WG. Code of practice for electron beam dosimetry in radiotherapy. *Phys Med Biol* 1985; 30:1169–1194.
3. International Atomic Energy Agency. Absorbed dose determination in photon and electron beams. An international code of practice. Technical Reports Series No. 277. Vienna: IAEA, 1st ed. 1987, 2nd ed. 1997.
4. International Commission on Radiation Units and Measurements. Radiation dosimetry: electron beams with energies between 1 and 50 MeV. ICRU Report 35. Bethesda, MD: ICRU, 1984.
5. Procedures in external radiation therapy dosimetry with electron and photon beams with maximum energies between 1 and 50 MeV. Recommendations by the Nordic Association of Clinical Physics (NACP). *Acta Radiol Oncol* 1980;19: 55–79.
6. Electron beams with mean energies at the phantom surface below 15 MeV. Supplement to the recommendations by the Nordic Association of Clinical Physics (NACP) 1980. *Acta Radiol Oncol* 1981;20:401–415.
7. Sociedad Española de Física Médica. Procedimientos recomendados para la dosimetria de fotones y electrones de energias comprendidas entre 1 MeV y 50 MeV en radioterapia de haces externos. Publicación n.1. Madrid, Spain: SEFM, 1984.
8. Sociedad Española de Física Médica. Suplemento al documento Procedimientos recomendados para la dosimetria de fotones y electrones de energias comprendidas entre 1 MeV y 50 MeV en radioterapia de haces externos. Publicación n.2. Madrid, Spain: SEFM, 1987.
9. International Atomic Energy Agency. Review of data and methods recommended in the international code of practice: IAEA Technical Reports Series No. 277, absorbed dose determination in photon and electron beams. Tec-Dos-897. Vienna: IAEA, 1996.
10. International Atomic Energy Agency. The use of plane parallel ionization chambers in high energy electron and photon beams. An international code of practice for dosimetry. Technical Reports Series No. 381. Vienna: IAEA, 1997.
11. IAEA Network of Secondary Standard Dosimetry Laboratories. Dose determination with plane-parallel ionization chambers in therapeutic electron and photon beams. Vienna: IAEA/WHO, 1999.
12. Kubo H. N_{gas} values of the memorial parallel-plate chambers determined in ^{60}Co and high-energy electron beams. *Med Phys* 1991;18:749–752.
13. Murali V, Meenaskshi S, Lakshmanam AV. Comparison of the calibration factor N_{gas} for a plane-parallel ionization chambers determined in ^{60}Co and high-energy electron beams. *Phys Med Biol* 1993;39:1503–1507.
14. Johansson KA, Mattsson LO, Lindborg I, Svensson H. Absorbed dose determination with ionization chambers in electron and photon beams with energies between 1 and 50 MeV. In: International Symposium on National and International Standardization of Radiation Dosimetry. Atlanta 1977. IAEA-SM-222/35;1978.
15. Mattsson LO, Johansson KA, Svensson H. Calibration and use of plane-parallel ionization chambers for the determination of absorbed dose in electron beams. *Acta Radiol Oncol* 1981;20:385–399.
16. Attix FH. A proposal for the calibration of plane-parallel ion chamber by accredited dosimetry calibration laboratories. *Med Phys* 1990;17:931–933.
17. Bjerke H, Järvinen H, Grimbergen TWM, *et al.* Comparison of two methods of therapy level calibration at ^{60}Co gamma beams. *Phys Med Biol* 1998;43:2729–2740.
18. McEwen MR, Williams AJ, DuSautoy AR. Determination of absorbed dose calibration factors for therapy level electron beam ionization chambers. *Phys Med Biol* 2001;46:741–755.