

Artigo Original

recebido: 19/10/1998 e aceito em 19/04/2000

**Comparação entre os protocolos
IAEA/TRS-277 e AAPM/TG-39 com
o novo protocolo IAEA/TRS-381
na dosimetria em feixes de
elétrons**

*Comparison of the IAEA/TRS-277 and
the AAPM/TG-39 protocols with the
new IAEA/TRS-381 for electrons
dosimetry*

L.H. Bardella

Laboratório de Ciências Radiológicas / UERJ
Instituto Nacional de Câncer - Rio de Janeiro - Brasil

C.E. de Almeida

Laboratório de Ciências Radiológicas / UERJ
Instituto Nacional de Câncer - Rio de Janeiro - Brasil
e-mail: cea@uerj.br

J. F. Gonçalves

Instituto Nacional de Câncer - Rio de Janeiro - Brasil

Resumo

Este trabalho apresenta uma comparação dos resultados obtidos na determinação da dose absorvida na água em feixe de elétrons usando os formalismos da AAPM/TG-39 (1994) e o da IAEA/TRS-277 (1987), com o novo protocolo IAEA/TRS-381 (1997). As medidas foram realizadas no acelerador linear modelo Therac 20, que produz feixes de elétrons de 6, 9, 13, 17 e 20 MeV, instalado no Instituto Nacional de Câncer/RJ. A curva de percentual de ionização para cada energia foi obtida, utilizando uma câmara de ionização de placas paralelas, tipo NACP, em um fantoma de água, com a finalidade de especificar a qualidade dos feixes. A calibração da câmara utilizada foi feita através da comparação com uma câmara cilíndrica tipo FARMER, com fator de calibração em termos da grandeza kerma no ar, N_k , usando o feixe de 20 MeV, de acordo com o formalismo de cada um dos protocolos. Após sua calibração, a câmara de ionização de placas paralelas foi utilizada para determinar a dose absorvida na água em cada um dos feixes. A maior diferença encontrada quando comparada as respostas obtidas foi entre os protocolos IAEA/TRS-381 e AAPM/TG-39, para o feixe de 13 MeV, em torno de 1,1%.

Palavras-chave: Controle da qualidade, Dosimetria, Feixe de elétrons, Protocolos.

Abstract

This work presents a comparison of the measured values of absorbed dose in water using the formalism of the American Association Physicists in Medicine AAPM/TG-39 (1983) and the International Atomic Energy Association (IAEA)- Technical Report Series, TRS-277, with the new International Code, IAEA/TRS-381 (1997) for electron beams. For this work it was used a Therac 20 which produces electron beams of 6, 9, 13, 17 and 20 MeV, installed at the National Cancer Institute. The depth-ionization curves studied for the selected electron energies were obtained using a plane parallel chamber in a water phantom, that was calibrated against a cylindrical chamber, in a 20 MeV electron beam according to each protocol. Then, it was used to determine the absorbed dose in water for each electron beam. The largest deviation of 1.1% was observed between IAEA/TRS-381 and AAPM/TG-39 protocols for electron beams of 13 MeV.

Keywords: Dosimetry, Electrons beams, Protocols, Quality assurance.

Introdução

A falta de detalhamento nas recomendações dos protocolos da American Association of Physicists in Medicine, Task Group 21, AAPM/TG-21, (1983) e da International Atomic Energy Agency, Technical Reports Series N. 277, IAEA/TRS-277 (1987) para a determinação do fator de calibração em termos de dose absorvida no ar, $N_{D,air}$, para câmaras de placas paralelas levou ao desenvolvimento de protocolos específicos, o AAPM/TG-39 (1994) e recentemente o IAEA/TRS-381 (1997). O objetivo deste trabalho é comparar os valores encontrados na determinação da dose absorvida na água, para feixes de elétrons, quando os resultados das leituras obtidas no fantoma de água são convertidos em dose absorvida. O formalismo de cada protocolo utiliza o fator de calibração da câmara de placas paralelas em termos de dose absorvida no ar, através da comparação com uma câmara cilíndrica previamente calibrada no Laboratório Padrão Secundário.

Materiais e Métodos

As medidas foram feitas em um fantoma de água com um sistema de aquisição de dados com deslocamento tridimensional, modelo Therascan, fabricado pela Theratronics International Ltd., Computer Products Group, Kanata, Ontario, Canadá, com interface para computador, permitindo um controle automático do posicionamento dos detetores, com uma precisão inferior a 1 mm.

Foram utilizados os seguintes conjuntos dosimétricos: uma câmara de ionização de placas paralelas fabricada pela Scanditronix, Scanditronix AB, Hubsborg, S-75229 Uppsala Sweden, modelo NACP-01, número de série 1801, associada a um eletrômetro Keithley, modelo 35617, N0 35466, fabricado pela Keithley Instruments, Inc., Cleveland, Ohio, U.S.A. e uma câmara cilíndrica tipo Farmer, fabricada pela Nuclear Enterprises Limited, Beth Road, Beenham, Reading, Berkshire RG7 5PR, England, modelo NE 2505/3, N0 1772, associada ao eletrômetro, modelo NE 2570/B, N0 913 do mesmo fabricante.

As medidas foram realizadas com feixes de elétrons com energias nominais de 6, 9, 13, 17 e 20 MeV produzidos pelo acelerador linear, modelo Therac 20, fabricado pela CGR MeV, 551, rue de la Minière, 78533 Buc, Cedex, France.

O trabalho foi realizado de acordo com as seguintes etapas:

Especificação da qualidade do feixe

Foram obtidas as leituras da ionização produzida pelo

feixe de radiação com a câmara localizada em diferentes profundidades no interior do fantoma de água. Na obtenção dessas leituras o tamanho de campo foi de $12 \times 12 \text{ cm}^2$ para os feixes de 6, 9 e 13 MeV, e de $20 \times 20 \text{ cm}^2$ para os feixes de 17 e 20 MeV, conforme recomendação do protocolo IAEA/TRS-381. A distância fonte superfície do fantoma de 100 cm e a dose monitor foram mantidas constantes. Tomou-se o cuidado de iniciar as medidas na posição mais profunda e deslocando a câmara até a superfície da água, evitando desse modo a formação de bolhas de ar na superfície da mesma, as quais poderiam interferir nas leituras obtidas, caso as medidas sejam obtidas iniciando na superfície até a posição mais profunda. A partir das leituras obtidas construiu-se a curva de ionização em função da profundidade, conforme mostrado na Figura 1.

A partir das curvas do percentual de ionização, foram obtidos os valores de R_{100} (profundidade, em cm de água, onde ocorre a máxima ionização), R_{50} (profundidade, em cm de água, onde ocorre 50% da ionização,) e R_p (o alcance prático dos elétrons, profundidade na qual a tangente a curva de ionização intercepta a linha na qual a curva de ionização é paralela ao eixo da profundidade), representados na Figura 1. Os parâmetros R_{50} e R_p são necessários para a determinação de \bar{E}_0 (energia média na superfície do fantoma) e \bar{E}_z (energia média na profundidade z), de acordo com as recomendações dos protocolos.

i - **Obtenção do valor de \bar{E}_0 :** Para o protocolo IAEA/TRS-381 o valor de \bar{E}_0 é dado por:

$$\bar{E}_0 \text{ (MeV)} = 0,818 + 1,935 R_{50} + 0,040 (R_{50})^2 \quad (1)$$

Tabela 1. Relação entre a energia média na superfície da água e o valor da profundidade onde ocorre 50% da ionização.

\bar{E}_0 (MeV)	R_{50} (cm)
5	2,1
6	2,5
7	3,0
8	3,4
9	3,8
10	4,3
12	5,1
14	5,9
16	6,7
18	7,6
20	8,4
22	9,2

Para o protocolo IAEA/TRS-277, o valor de \bar{E}_0 é obtido através da interpolação dos valores de R_{50} , pois nem todos os valores são tabelados. Na Tabela 1 são apresentados os valores utilizados para a determinação de \bar{E}_0 neste trabalho, os quais foram retirados da Tabela IV deste protocolo.

Para o protocolo AAPM/TG-39:

$$\bar{E}_0 = R50 \times 2,33 \quad (2)$$

ii - Obtenção do valor de \bar{E}_z : Para os protocolos IAEA/TRS-277 e IAEA/TRS-381:

$$\bar{E}_z = \left(\frac{\bar{E}_z}{\bar{E}_0} \right) \times \bar{E}_0 \quad (3)$$

A Tabela 2 apresenta os valores da razão \bar{E}_z / \bar{E}_0 para os diferentes valores correspondentes de z/R_p e \bar{E}_0 , representando uma amostra das Tabelas XIII e V dos respectivos protocolos, para os valores utilizados neste trabalho.

Para o protocolo AAPM/TG-39:

$$\bar{E}_z = \bar{E}_0 (1 - z/R_p) \quad (4)$$

Calibração da câmara de placas paralelas

O fator de calibração em termos de dose absorvida no ar para a câmara de ionização de placas paralelas, $N_{D,ar}^{pp}$, foi obtido através de comparação com uma câmara cilíndrica de referência, tipo Farmer, com volume de 0,6 cm³, com parede de grafite e eletrodo central de 1 mm de alumínio, a qual possui o fator de calibração em termos de dose absorvida no ar, $N_{D,ar}^{ref}$ para o feixe de ⁶⁰Co. A energia do feixe de elétrons selecionado foi de 20 MeV, uma vez que é recomendado pelo protocolo IAEA/TRS-381 que se use a maior energia disponível acima de 15 MeV. O ponto efetivo de medida¹ da câmara de ionização cilíndrica para os protocolos IAEA/TRS-277 e IAEA/TRS-381 está

Tabela 2. Razão da energia média na profundidade z , \bar{E}_z , e a energia média na superfície do fantoma, \bar{E}_0 . Profundidade em função de z/R_p , sendo z para este caso a profundidade de máxima ionização.

z/R_p	5 (MeV) \bar{E}_z / \bar{E}_0	\bar{E}_0 10 (MeV) \bar{E}_z / \bar{E}_0	20 (MeV) \bar{E}_z / \bar{E}_0
0,30	0,651	0,645	0,633
0,35	0,587	0,583	0,574
0,40	0,527	0,523	0,514
0,45	0,465	0,462	0,456
0,50	0,411	0,407	0,399
0,55	0,359	0,355	0,348

localizado a 0,5 de r na direção do feixe, onde r é o raio interno da câmara; para o IAEA/TG-39 este ponto é o centro geométrico da câmara enquanto que para a câmara de placas paralelas é definido no centro da superfície para todos os protocolos. O ponto efetivo de medida de ambas as câmaras foi colocado na profundidade onde ocorre o máximo de ionização R_{100} , profundidade denominada de referência, (z ou z_{ref}), a qual é de 3,2 cm de água para o feixe utilizado.

Seguindo recomendação dos Protocolos, a calibração foi realizada utilizando campo de 12x12 cm², na superfície do fantoma. Os valores das leituras obtidos com cada sistema de medidas foram corrigidos para levar em consideração a perda por recombinação de íons, ps, de acordo com Weinhaus *et al.* (1984), para os protocolos IAEA/TRS-277 e IAEA/TRS-381 e de acordo com a Figura 4 do protocolo AAPM/TG-21 (1983).

Dessa forma a determinação do fator $N_{D,ar}^{pp}$ foi feita usando as leituras obtidas com a tensão de polarização no eletrômetro de $\pm 300V$ e $\pm 75V$, para os protocolos IAEA/TRS-277 e IAEA/TRS-381, enquanto que para o AAPM/TG-39 os valores das tensões foram de $\pm 300V$ e $\pm 150V$. As médias das leituras foram corrigidas para levar em consideração as variações de pressão e temperatura ambiente durante o intervalo de medida.

Para a determinação de $N_{D,ar}^{pp}$, foram usadas as equações abaixo, proposta por cada protocolo:

$$\text{IAEA/TRS-277} \Rightarrow N_{D,ar}^{pp} = \frac{(MN_{D,air}(s_{w,air})P_u P_{cel})^{ref}}{(M(s_{w,air})P_u P_{cel})^{pp}} \quad (5)$$

$$\text{IAEA/TRS-381} \Rightarrow N_{D,air}^{pp} = N_{D,air}^{ref} \frac{(M P_{wall} P_{cav} P_{cel})^{ref}}{(M P_{wall} P_{cav})^{pp}} \quad (6)$$

$$\text{AAPM/TG-39} \Rightarrow N_{gas}^{pp} = \frac{(M N_{gas} P_{ion} P_{rep1})^{cil}}{(M P_{ion})^{pp}} \quad (7)$$

onde o significado dos termos das Equações 5-7 são apresentados no item a seguir, sendo discutido nos respectivos protocolos. Vale ressaltar que para os protocolos IAEA/TRS-277 e IAEA/TRS-381, M representa a leitura obtida e corrigida levando em conta a variação da pressão, da temperatura e a recombinação de íons, enquanto que para o protocolo AAPM/TG-39, M leva em consideração somente a variação da pressão e da temperatura.

Determinação da dose absorvida

Para a determinação da dose absorvida, o ponto efetivo de medida da câmara de ionização de placas paralelas foi colocado na profundidade de máxima

Tabela 3. Especificação de \bar{E}_Q e \bar{E}_Z segundo cada protocolo.

Energia Nominal (MeV)	IAEA/TRS-277		IAEA/TRS-381		AAPM/TG-39	
	\bar{E}_Q (MeV)	\bar{E}_Z (MeV)	\bar{E}_Q (MeV)	\bar{E}_Z (MeV)	\bar{E}_Q (MeV)	\bar{E}_Z (MeV)
6	5,65	2,44	5,61	2,42	5,50	2,86
9	7,95	3,01	7,82	2,95	7,88	3,74
13	12,38	5,56	12,08	5,43	12,23	6,60
17	17,00	9,19	16,70	9,03	16,66	11,00
20	19,25	11,52	19,12	11,44	18,87	12,64

ionização, a qual corresponde a 1,3 cm para 6 MeV, 2,1 cm para 9 MeV, 2,9 cm para 13 MeV, e 3,2 cm para 17 e 20 MeV. O tamanho do campo foi de 10 x 10 cm², na superfície do fantoma, localizada a 100 cm da fonte, para todas energias, conforme recomendação dos protocolos.

A determinação da dose absorvida na água, D_w , utilizando a câmara de placas paralelas, foi realizada usando o formalismo proposto por cada protocolo cujas expressões são apresentadas abaixo:

$$\text{IAEA/TRS-277 } D_w(P_{\text{eff}}) = M_u^{pp} N_{D,\text{air}}^{pp} (s_{w,\text{air}})_u P_u \quad (8)$$

$$\text{IAEA/TRS-381 } D_{w,Q}(P_{\text{eff}}) = M_Q N_{D,\text{air}}^{pp} (s_{w,\text{air}})_Q P_Q \quad (9)$$

$$\text{AAPM/TG-39 } D_{\text{med}} = MN_{\text{gas}} \left(\frac{L}{\rho} \right)_{\text{gas}}^{\text{med}} P_{\text{ion}} P_{\text{repl}} P_{\text{wall}} \quad (10)$$

sendo:

M_u^{pp} , M_Q e M as leituras obtidas corrigidas;

$N_{D,\text{air}}^{pp}$ o fator de calibração em termos de dose absorvida no ar;

N_{gas} o fator de calibração da cavidade de gás da câmara de ionização;

$(s_{w,\text{air}})_u$ e $(s_{w,\text{air}})_Q$ a razão dos poderes de frenagem mássico da água e do ar, no feixe do usuário;

$\left(\frac{L}{\rho} \right)_{\text{gas}}^{\text{med}}$ a razão dos poderes de frenagem mássico, do material do fantoma e do gás da câmara, neste caso o ar;

p_u o fator que leva em conta a diferença do espalhamento no fantoma e na cavidade de ar;

p_Q o fator de perturbação da câmara de ionização;

P_{ion} o fator que corrige as perdas por recombinação de íons que ocorrem durante as medidas no feixe do usuário;

P_{repl} o fator de correção para o posicionamento da câmara e

P_{wall} o fator de correção que leva em conta o fato do material da parede da câmara ter composição diferente do material do fantoma.

Os valores dos correspondentes fatores de correção podem ser obtidos nos respectivos protocolos.

Resultados

Especificação da qualidade do feixe

A Figura 1 apresenta a curva de percentual de ionização obtida para o feixe de 20 MeV com a indicação de como se obtém os parâmetros R_{100} , R_{50} e R_p para caracterizar os feixes. São também apresentados os valores dos respectivos parâmetros para as energias utilizadas. A partir destes valores foram determinados, segundo cada protocolo, os valores de \bar{E}_Q e \bar{E}_Z , apresentados na Tabela 3.

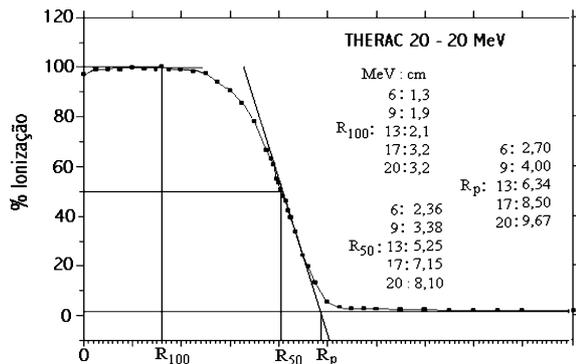


Figura 1. Curva do percentual de ionização típica para o feixe de elétrons de 20 MeV, válida para os protocolos em estudo.

Calibração da câmara de placas paralelas

O fator de calibração para a câmara de placas paralelas, cujos resultados são apresentados na Tabela 4, foi determinado utilizando-se o valor médio das leituras obtidas com cada câmara, para tensão ± 300 V, sendo corrigidas pelo fator p_s , pelas variações ambientais e também por outros fatores de correção apresentados nas Equações 5-7.

Tabela 4. Fator de calibração da câmara de ionização de placas paralelas.

	IAEA/TRS-277	IAEA/TRS-381	AAPM/TG-39
N_D (cGy/nC)	15,90	15,82	15,91

Tabela 5. Dose absorvida na água, normalizada para unidade monitor (UM), segundo cada protocolo.

Energia Nominal (MeV)	Dose Absorvida (cGy/UM)		
	IAEA/TRS-277	IAEA/TRS-381	AAPM/TG-39
6	0,837	0,837	0,835
9	0,871	0,877	0,879
13	0,834	0,836	0,845
17	0,858	0,859	0,864
20	0,857	0,857	0,855

Determinação da dose absorvida

Os valores para o cálculo da dose absorvida foram obtidos utilizando as Equações 8 a 10, seguindo o formalismo de cada protocolo. Os resultados da dose absorvida, os quais são apresentados na Tabela 5 para as diferentes energias, foram obtidos a partir das leituras e das correções de todos os fatores que influenciam as medidas, de acordo com cada um dos protocolos.

A maior diferença encontrada foi de 1,1% entre os protocolos IAEA/TRS-381 e AAPM/TG-39 para o feixe de 13 MeV. Esta diferença pode ser atribuída aos diferentes valores do poder de frenagem mássico (1,043 vs 1,038), ao método de determinação de p_s (1,017 vs 1,034) e de determinação do fator de correção de pressão e temperatura (1,007 vs 1,001) recomendados pelos protocolos, com valores numéricos para a temperatura de referência ligeiramente diferentes (20°C vs 22°C).

Esta diferença de 1,1% deve ser também levada em consideração junto às incertezas combinadas na determinação da dose absorvida na água usando câmara de placas paralelas. Deve-se ressaltar que esta câmara foi calibrada em feixes de elétrons, através da comparação com uma câmara cilíndrica previamente calibrada em laboratório padrão, cuja incerteza estimada na dose absorvida foi da ordem de 2,8%. A incerteza padrão combinada foi então determinada, resultando em 3%.

Conclusões

O estudo comparado realizado usando os formalismos e procedimentos propostos pelos diferentes protocolos mostram uma boa concordância dos valores das doses absorvidas (em torno de 1,1 %) para os tipos de câmaras de ionização utilizadas. O formalismo proposto pelo IAEA/TRS-381 para câmara de ionização de placas paralelas preenche a falta de clareza até então existente nos procedimentos para calibração com este tipo de câmara recomendada para feixes de elétrons.

Uma vantagem adicional para o uso do IAEA/TRS-381 relaciona-se com a proposta de utilização da calibração em feixes de ^{60}Co , tanto no ar quanto na água, caso o usuário não disponha de feixe de elétrons acima de 15 MeV. Dados obtidos por este grupo de trabalho, mostram uma variação da ordem de 0,5% para o fator de calibração, no ar, neste tipo de feixe se comparados ao obtido em o feixe de elétrons (20 MeV) (Bardella *et al.* 1998) para o referido conjunto dosimétrico utilizado.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a J. A. Balieri e P. J. Sena, por suas valiosas discussões e por toda ajuda durante este trabalho e também a Fundação Ari Frauzino pelo suporte financeiro.

Referências

- AAPM (1983). "A Protocol for the Determination of Absorbed Dose from High Energy Photon and Electron Beams". Task Group 21, American Association of Physicists in Medicine Radiation Therapy Committee. *Med. Phys.* v.10, n.6, p. 741-771.
- AAPM (1994). "The Calibration and Use of Plane Parallel Ionization Chamber for Dosimetry of Electron Beams: An Extension of the 1983 AAPM Protocol Report of AAPM Radiation Therapy Committee" Task Group N. 39. *Med. Phys.* v. 21, n.8, p. 1251-1261.
- Bardella, L. H., De Almeida, C. E., Gonçalves, J. F., Tarragó, M. E. (1997a). "Determinação do Fator de Calibração em Termos de Dose no Ar em Feixes de ^{60}Co ". *Revista Radiologia Brasileira*, v. 31, n. 5, p. 289-291.
- IAEA (1987). *Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams. An International Code of Practice*. Technical Reports Series N. 277, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA (1997). *The Use of Plane Parallel Ionization Chambers in High-Energy Electron and Photon Beams. An International Code of Practice for Dosimetry*. Technical Reports Series N. 381, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Weinhaus, M. S., Meli, J. A. (1984). "Determining P_{ion} the Correction Factor for Recombination Losses in an Ionization Chamber". *Med. Phys.* v.11, n. 6, p. 846-849.