

Dependência energética e angular de monitores portáteis para radiação beta

Fernanda B. C. Nonato e Linda V. E. Caldas

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN - CNEN/SP

Av. Professor Lineu Prestes 2242

05508-000 São Paulo, SP

fbnonato@ipen.br

lcaldas@ipen.br

Abstract

After the calibration of 28 detectors Geiger-Müller and 6 ionization chambers with gamma radiation, they were tested in standard beta radiation beams ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ e ^{204}Tl), with the objective to study the energy dependence of their responses. The angular dependence was also determined for $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ beams. The response of the monitors showed high energy and angular dependence. Furthermore, the results of most of the tested equipment were not satisfactory in relation to the international standards requirements.

Resumo

Após a calibração de 28 detectores portáteis Geiger-Müller e de 6 câmaras de ionização com radiação gama, eles foram testados em feixes padronizados de radiação beta ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ e ^{204}Tl), com o objetivo de estudar a dependência energética de suas respostas. A dependência angular foi também determinada para feixes de $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$. A resposta dos monitores apresentou dependências energética e dependência angular altas. Além disso, os resultados da maioria dos equipamentos não foram satisfatórios em relação aos critérios das normas internacionais.

Introdução

A radiação beta vem sendo muito aplicada nas áreas industrial e médica. Na medicina, as fontes de radiação beta são muito utilizadas em procedimentos de braquiterapia, nos tratamentos de lesões superficiais nos olhos e na pele. Alguns trabalhos foram desenvolvidos no IPEN, como comparação de métodos de calibração [1], e desenvolvimento de sistemas de referência [2], ambos com aplicadores clínicos de radiação beta. Foram também estudadas as dependências energética e angular de materiais termoluminescentes [3] e de dosímetros fotográficos [4] para radiação beta; dependência energética de detectores OSL em feixes de radiação beta [5] e desempenho de monitores de contaminação de superfície [6].

Existe, portanto, a necessidade de assegurar a proteção do local e do trabalhador por meio da monitoração que pode ser realizada por detectores Geiger-Müller ou câmaras de ionização. Esses instrumentos obtêm medidas em exposição, dose absorvida ou dose equivalente. Para certificar a boa funcionalidade dos instrumentos, é necessário que eles sejam calibrados sob condições padronizadas, ou seja, em feixes padronizados de radiação [7].

O Laboratório de Calibração de Instrumentos (LCI), que faz parte da Gerência de Metrologia das Radiações, do IPEN, em São Paulo, Brasil, oferece serviços de calibração de instrumentos com radiações gama, X, beta e alfa, possibilitando assim o estudo da resposta dos monitores portáteis utilizados em radioproteção para radiação beta.

As normas ISO 6980-2 [8] e 6980-3 [9] e a norma européia EN 60846 [10] tratam dos procedimentos de calibração de monitores portáteis para radiação beta, por meio do estudo das respostas da dependência angular e energética dos instrumentos. Os monitores de área são calibrados no Laboratório Beta do IPEN em termos de taxa de dose absorvida no ar, utilizando-se um sistema padrão secundário de fontes de radiação beta.

Objetivo

O objetivo deste trabalho foi estudar um conjunto de detectores Geiger-Müller e câmaras de ionização em relação a sua dependência energética e angular em campos de radiação beta, como uma das formas de assegurar a confiabilidade dos monitores portáteis utilizados em radioproteção.

Materiais e Métodos

Para este trabalho foram inicialmente calibrados 28 detectores Geiger-Müller e 6 câmaras de ionização com radiação gama e a seguir eles foram testados em feixes padronizados de radiação beta, de um sistema padrão secundário, marca Buchler, modelo BSS1. Este sistema possui quatro fontes: duas fontes de $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ com atividades diferentes, uma fonte de ^{204}Tl e uma fonte de ^{147}Pm , com certificados de calibração do laboratório primário alemão Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). Para o estudo dos detectores com fontes de radiação beta, neste trabalho foram utilizadas apenas as fontes de radiação de $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ e de ^{204}Tl . As características das fontes utilizadas estão descritas na Tabela 1. O conjunto (irradiador e fontes) pode ser observado na Figura 1.

Tabela 1- Características das fontes de radiação beta utilizadas neste trabalho

Fonte	Atividade (MBq)	Data da Calibração (PTB)	Distância (cm)	Taxa de Dose Absorvida no Ar ($\mu\text{Gy s}^{-1}$)
$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	74,07	12/01/1981	30	1,71
^{204}Tl	18,50	09/06/1990	30	0,41

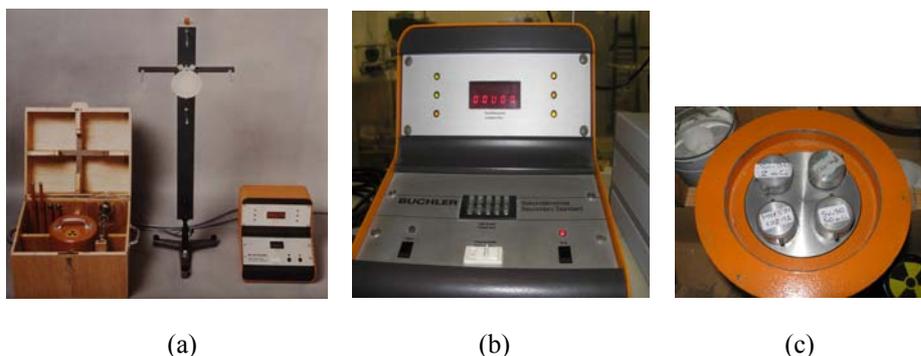


Figura 1-(a) Sistema padrão secundário beta; (b) Sistema de acionamento das fontes e de controle do tempo de irradiação; (c) Fontes de radiação beta na blindagem

Neste estudo, cada detector portátil foi posicionado sobre um suporte especial, a uma distância da fonte de radiação, sendo que o ponto de referência do aparelho foi sempre o centro geométrico do tubo Geiger-Müller ou da câmara de ionização. Este centro geométrico era coincidente com o centro do campo de radiação da fonte utilizada. Foi escolhida uma escala do instrumento adequada à taxa de dose da fonte, de acordo com a distância entre a fonte e o instrumento. Foram obtidas dez medidas cada vez que se submeteu o instrumento à radiação. Primeiramente foram efetuadas medidas de radiação de fundo (sem exposição à fonte) e, a seguir, utilizando-se a fonte de $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ na posição frontal. Após a exposição à fonte de $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, cada monitor portátil foi submetido ao feixe de ^{204}Tl , com o objetivo de estudar a dependência energética da resposta dos monitores.

Para o estudo da dependência angular, foi construído pela Oficina Mecânica do IPEN, um suporte de placas de acrílico, Figura 2, que exerce a função de um goniômetro para se realizar o estudo da dependência angular dos aparelhos calibrados com radiação beta. Este goniômetro é constituído por uma parte retangular de 21cm de largura, 30cm de comprimento e 1cm de espessura; sobre a placa de acrílico retangular foi acoplada uma placa circular de acrílico de 26 cm de diâmetro e 1 cm de espessura. Foram obtidas leituras de 0° e $\pm 45^\circ$ para averiguar a dependência angular, de acordo com a norma EN 60846:2004 [10]. Para alguns aparelhos foi ainda feita uma varredura angular com ângulos de $0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ, \pm 60^\circ, \pm 90^\circ$.

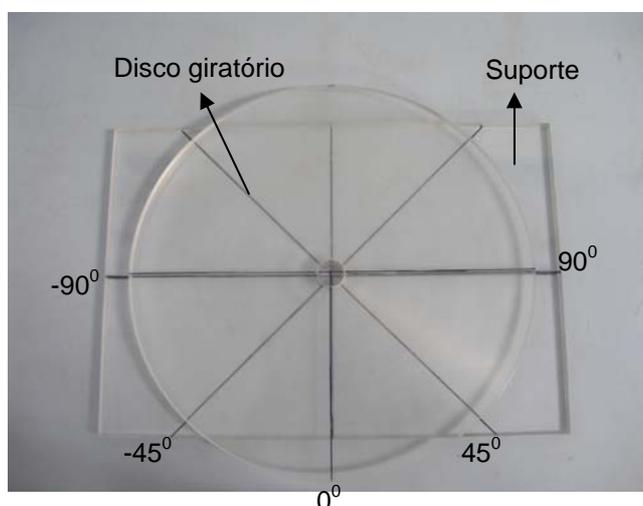


Figura 2-Suporte de placas de acrílico para estudo de dependência angular dos monitores portáteis

Foram estudados 28 detectores Geiger-Muller de 6 marcas diferentes, especificados pelos modelos e códigos na Tabela 2. Foram estudadas 6 câmaras de ionização de 2 marcas especificadas por modelos e códigos de acordo com a Tabela 3. Alguns equipamentos são nacionais e outros são importados.

Tabela 2- Características dos detectores Geiger-Müller testados neste estudo

Marca	Modelo	Detecta Radiações	Capacidade de Leitura	Escalas	Sonda
I	A1...A12	α , β , gama, X	0,02 mR/h a 1R/h ou 0,2 μ Sv/h a 10mSv/h	X 1; X 10; X 100 e X 1000	externa
	B1	α , β , gama, X	0,05 μ Sv/h a 10 mSv/h ou 5 μ R/h a 1R/h	X 1; X 10; X 100 e X 1000	externa
	C1	α , β , gama	0,02 mR/h a 1R/h	X 1; X 10; X 100 e X 1000	externa
II	D1 e D2	α , β , gama	0 a 2R/hr	X 0.1; X1; X10 e X 100	interna
	E1	gama	0 μ R/h a 9999 R/h	digital	interna
III	F1...F3	gama, X	0 a 3,5 R/h	digital	externa
	G1	α , β , gama, X	0 a 50 mR/h	X 1; X 10 e X 100	externa
IV	H1 e H2	α , β , gama, X	0 a 1R/h	X 0,1; X 1; X 10; X 100; X 1000	externa
V	I1...I3	α , β , gama	0,01 μ Sv/h a 1mSv/h ou 1 μ R/h a 0,1R/h	digital	interna
VI	J1 e J2	α , β , gama	0-500 μ Sv/h ou 0-50 mR/h	X 10 e X 100	interna

Tabela 3- Características das câmaras de ionização testadas neste trabalho

Marca	Modelo	Detecta	Capacidade de Leitura (R/h)	Escalas	Volume da Câmara de Ionização (cm ³)
VII	K1...K 5	α acima de 4 MeV; β acima de 100 keV; gama e X acima de 7 keV	0 a 50 R/h	digital	200
VIII	L1	α acima de 4 MeV; β acima de 100 keV; gama e X acima de 7 keV	1 a 50 R/h	digital	349

Resultados

Primeiramente foram obtidas os coeficientes de calibração para $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ representados nas Tabelas 4 e 5 e para ^{204}Tl representados nas Tabelas 6 e 7. O coeficiente de calibração f_c é dado pela razão entre o valor verdadeiro, dado em taxa de dose absorvida no ar \dot{D}_{ar} e o valor medido pelo instrumento M :

$$f_c = \frac{\dot{D}_{ar}}{M} \quad (1)$$

A seguir foram determinados os fatores de correção F_c para a dependência energética da resposta dos monitores para $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ e ^{204}Tl , obtida pela razão entre os seus coeficientes de calibração $f_c(^{204}\text{Tl})$ e $f_c(^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y})$ apresentada na Tabela 8 e 9:

$$F_c = \frac{f_c(^{204}\text{Tl})}{f_c(^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y})} \quad (2)$$

Tabela 4- Coeficiente de calibração dos detectores Geiger-Müller para $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$

Marca	Modelo	Taxa de Dose Absorvida ($\mu\text{Gy/h}$)	Coeficiente de Calibração $f_c(^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y})$	
I	A1	775,8	2,59	Gy/Sv
	A2	775,8	2,43	Gy/Sv
	A3	767,3	2,96	Gy/Sv
	A4	766,2	3,15	Gy/Sv
	A5	766,2	2,74	Gy/Sv
	A6	765,6	3,10	Gy/Sv
	A7	766,2	2,56	Gy/Sv
	A8	766,2	3,05	Gy/Sv
	A9	775,2	24,10	mGy/R
	A10	775,2	25,87	mGy/R
	A11	774,1	32,39	mGy/R
	A12	774,1	32,31	mGy/R
II	B1	775,8	24,40	mGy/R
	C1	765,6	34,90	mGy/R
	D1	767,2	12,81	mGy/R
III	D2	764,8	11,78	mGy/R
	E1	3105,6	10,39	mGy/R
	F1	776,0	11,49	mGy/R
IV	F2	776,0	11,60	mGy/R
	F3	775,9	10,50	mGy/R
	G1	345,0	12,44	mGy/R
	H1	775,7	11,42	mGy/R
V	H2	764,8	10,71	mGy/R
	I1	776,0	3,30	Gy/Sv
	I2	776,0	3,20	Gy/Sv
VI	I3	776,0	3,28	Gy/Sv
	J1	764,8	42,65	mGy/R
	J2	764,8	3,89	Gy/Sv

Tabela 5- Coeficiente de calibração das câmaras de ionização para $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$

Marca	Modelo	Taxa de Dose Absorvida ($\mu\text{Gy/h}$)	Coeficiente de Calibração $f_c(^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y})$ (mGy/h)
VII	K1	776	11,36
	K2	773,4	11,92
	K3	773,4	11,06
	K4	765,9	12,92
	K5	3086,6	9,77
VIII	L1	776,0	13,29

Tabela 6- Coeficiente de calibração dos detectores Geiger-Müller para ^{204}Tl

Marca	Modelo	Taxa de Dose Absorvida ($\mu\text{Gy/h}$)	Coeficiente de Calibração $f_c (^{204}\text{Tl})$	
I	A1	109,0	4,34	Gy/Sv
	A2	109,0	4,14	Gy/Sv
	A3	100,2	4,96	Gy/Sv
	A4	99,2	5,43	Gy/Sv
	A5	99,2	5,34	Gy/Sv
	A6	43,8	8,77	Gy/Sv
	A7	99,2	6,13	Gy/Sv
	A8	99,2	5,46	Gy/Sv
	A9	109,0	55,61	mGy/R
	A10	108,3	58,85	mGy/R
	A11	47,7	88,24	mGy/R
	A12	47,7	88,24	mGy/R
	B1	109,0	45,02	mGy/R
C1	43,8	7,91	mGy/R	
II	D1	100,2	204,45	mGy/R
	D2	43,5	98,80	mGy/R
	E1	48,7	93,63	mGy/R
III	F1	48,5	77,05	mGy/R
	F2	48,5	101,13	mGy/R
	F3	48,5	61,38	mGy/R
	G1	48,7	121,73	mGy/R
IV	H1	48,5	25,28	mGy/R
	H2	43,5	62,10	mGy/R
V	I1	48,5	9,30	Gy/Sv
	I2	48,5	9,30	Gy/Sv
	I3	48,5	9,10	Gy/Sv
VI	J1	97,9	112,47	mGy/R
	J2	97,9	13,63	Gy/Sv

Tabela 7- Coeficiente de calibração das câmaras de ionização para ^{204}Tl

Marca	Identificação	Taxa de Dose Absorvida ($\mu\text{Gy/h}$)	Coeficiente de Calibração $f_c (^{204}\text{Tl})$ (mGy/R)
VII	K1	48,54	21,01
	K2	47,31	18,48
	K3	47,31	17,08
	K4	43,94	19,44
	K5	46,49	18,52
VIII	L1	48,54	22,90

Tabela 8- Coeficiente de correção da dependência energética da resposta dos detectores Geiger-Müller

Marca	Modelo	F_c	Marca	Modelo	F_c
I	A1	1,68	II	D1	15,96
	A2	1,70		D2	8,39
	A3	1,68		E1	9,01
	A4	1,72	III	F1	6,71
	A5	1,95		F2	8,72
	A6	2,83		F3	5,85
	A7	2,39	IV	G1	9,79
	A8	1,79		H1	2,21
	A9	2,31	V	H2	5,80
	A10	2,27		I1	2,82
	A11	2,72		I2	2,91
	A12	2,73	VI	I3	2,77
B1	1,85	J1		2,64	
C1	0,23	J2		3,50	

Tabela 9- Coeficiente de correção da dependência energética da resposta das câmaras de ionização

Marca	Modelo	F_c
VII	K1	1,85
	K2	1,55
	K3	1,54
	K4	1,50
	K5	1,90
VIII	L1	1,72

Como se pode verificar, existe uma dependência energética muito grande em relação às radiações de $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ e ^{204}Tl : os fatores de correção variaram entre 1,67 e 9,71 no caso dos detectores Geiger-Müller e entre 1,50 e 1,89 no caso das câmaras de ionização. Estes resultados mostram os enormes erros que podem ser cometidos se as medidas não forem devidamente interpretadas e corrigidas. Mesmo no caso das câmaras de ionização, os fatores obtidos mostram uma dependência energética alta, entre 50% e 89%.

Para o estudo da dependência angular, foram realizadas medidas $M(0^0)$, $M(+45^0)$, $M(-45^0)$, para ângulos de 0^0 , $+45^0$ e -45^0 respectivamente, e obtidos os fatores de correção para ângulos F_{a+} e F_{a-} .

$$F_{a+} = \frac{M(0^0)}{M(+45^0)} \quad (3)$$

$$F_{a-} = \frac{M(0^0)}{M(-45^0)} \quad (4)$$

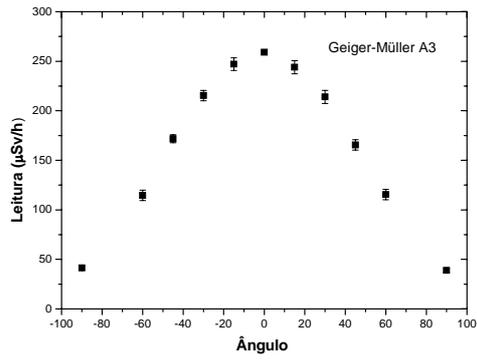
Os resultados do estudo da resposta angular dos detectores Geiger-Müller e das câmaras de ionização, estão apresentados na Tabela 10. Todos os monitores de radiação apresentaram fatores de correção para dependência angular maior que 40%, sendo este o valor máximo de variação estabelecido pela norma EN 60846 [10] para estudos de dependência angular entre 0^0 e $\pm 45^0$. Neste estudo, nenhum detector teria sido aprovado neste teste de desempenho.

Alguns detectores Geiger-Müller e uma câmara de ionização foram ainda submetidos a uma varredura angular de $0^0, \pm 15^0, \pm 30^0, \pm 45^0, \pm 60^0, \pm 90^0$. A resposta da variação angular dos monitores pode ser observada nas

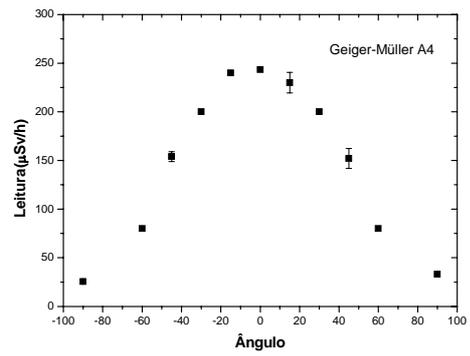
Figuras 3, 4 e 5 em função dos ângulos. Como se pode observar, os monitores possuem comportamentos diferentes dependendo do modelo, e até para um mesmo modelo, como demonstrado no caso do modelo A: o detector A5 apresentou uma curva mais estreita em relação aos outros detectores de mesmo modelo.

Tabela 10. Fator de correção da resposta angular dos instrumentos para uma variação angular de 0° e $\pm 45^\circ$.

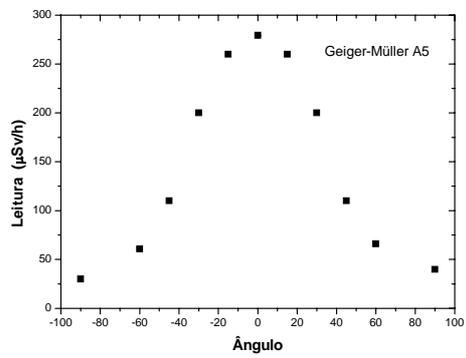
Medidas							
Marca	Ângulo	0°	45°	-45°	Unidade	F_{a+}	F_{a-}
Detectores Geiger-Müller							
I	A1	299,90 \pm 0,00	200,00 \pm 0,00	200,00 \pm 0,00	uSv/h	1,5	1,5
	A2	319,90 \pm 0,00	200,00 \pm 0,00	200,00 \pm 0,00	uSv/h	1,6	1,6
	A9	32,16 \pm 0,63	17,20 \pm 0,91	18,00 \pm 0,00	mR/h	1,87	1,78
	A10	29,96 \pm 0,00	16,80 \pm 1,03	16,00 \pm 0,00	mR/h	1,78	1,87
	A11	23,90 \pm 0,00	14,00 \pm 0,00	14,00 \pm 0,00	mR/h	1,71	1,71
	A12	23,96 \pm 0,00	14,00 \pm 0,00	14,00 \pm 0,00	mR/h	1,71	1,71
	B1	31,80 \pm 0,31	21,40 \pm 0,96	20,60 \pm 0,96	mR/h	1,49	1,54
II	E1	298,80 \pm 0,31	139,00 \pm 0,00	131,70 \pm 0,48	mR/h	1,43	1,51
III	F1	67,55 \pm 0,68	33,70 \pm 0,52	35,20 \pm 0,52	mR/h	2	1,92
	F2	66,90 \pm 1,35	33,60 \pm 0,72	31,40 \pm 2,20	mR/h	1,99	2,13
	F3	73,90 \pm 0,86	33,50 \pm 0,46	38,40 \pm 0,43	mR/h	2,2	1,92
	G1	27,74 \pm 0,91	18,70 \pm 0,48	17,90 \pm 0,56	mR/h	1,48	1,55
IV	H1	67,90 \pm 0,00	44,00 \pm 0,00	42,00 \pm 0,00	mR/h	1,54	1,61
V	I1	235,10 \pm 0,34	74,30 \pm 0,30	84,80 \pm 0,41	uSv/h	3,16	2,77
	I2	242,50 \pm 0,66	89,00 \pm 0,33	89,40 \pm 0,12	uSv/h	2,73	2,71
	I3	236,40 \pm 0,59	57,40 \pm 0,26	59,40 \pm 0,97	uSv/h	4,12	3,97
Câmaras de Ionização							
VII	K1	68,30 \pm 0,52	39,90 \pm 0,31	40,00 \pm 0,00	mR/h	1,72	1,72
	K2	64,90 \pm 0,00	39,00 \pm 0,31	34,10 \pm 0,00	mR/h	1,66	1,9
	K3	69,90 \pm 0,00	37,00 \pm 0,00	36,50 \pm 0,52	mR/h	1,89	1,91
	K5	315,90 \pm 5,16	149,40 \pm 0,69	167,70 \pm 0,82	mR/h	2,11	1,88
VIII	L1	58,40 \pm 1,17	39,50 \pm 0,52	38,50 \pm 0,52	mR/h	1,48	1,52



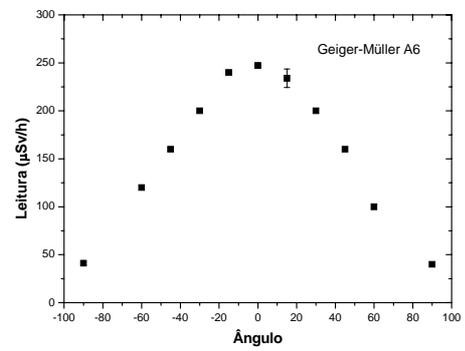
(a)



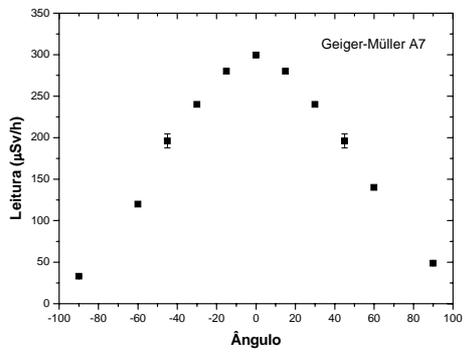
(b)



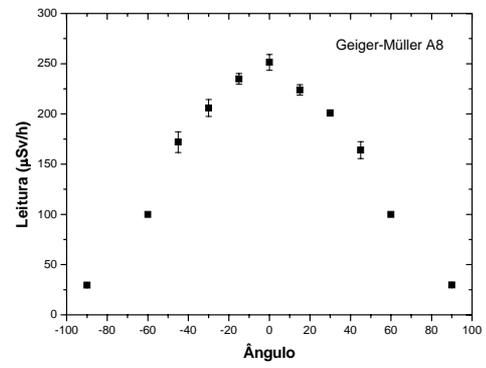
(c)



(d)

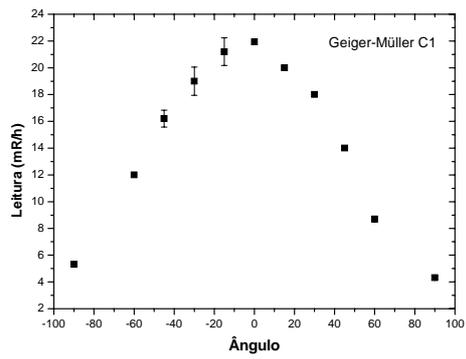


(e)

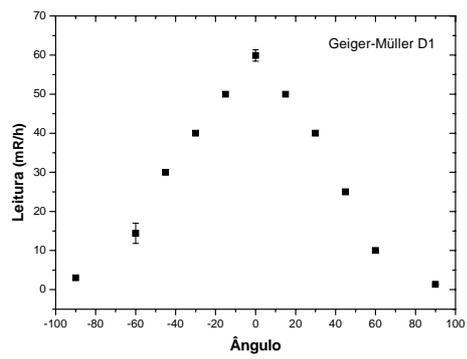


(f)

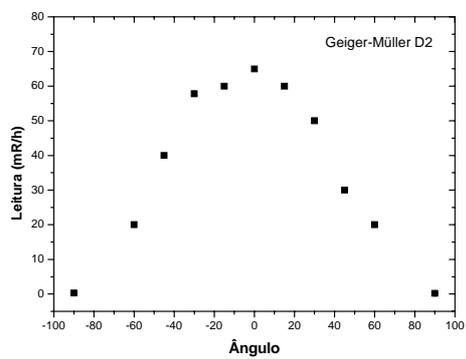
Figura 3- Resposta angular dos detectores Geiger-Müller para uma mesma marca I e de modelo A.



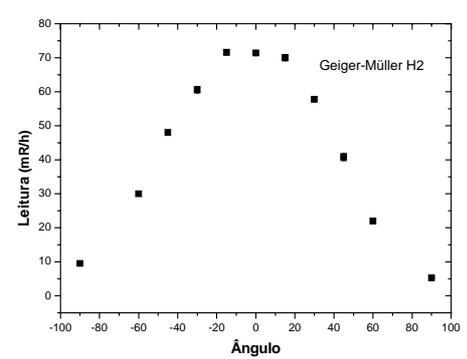
(g)



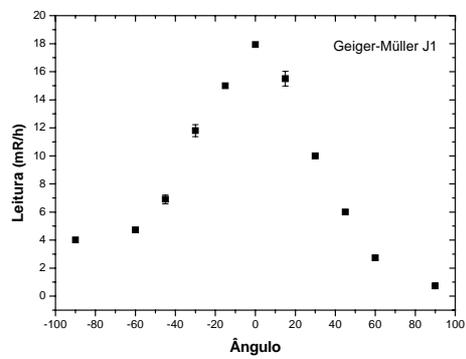
(h)



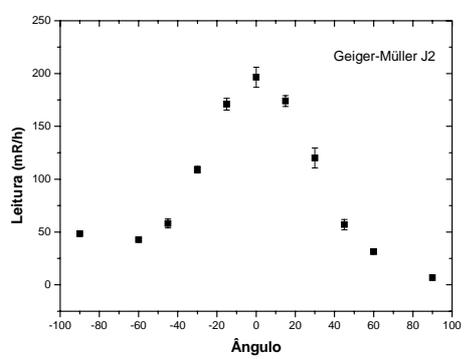
(i)



(j)



(k)



(l)

Figura 4- Resposta angular dos detectores Geiger-Müller para modelos variados C, D, H e J.

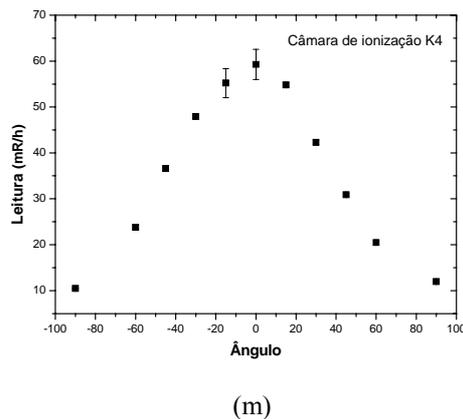


Figura 5- Resposta angular da câmara de ionização K4.

Conclusões

O estudo da dependência energética em relação às radiações de $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ e ^{204}Tl permitiu verificar o quão grande pode ser a variação dos fatores de correção, evidenciando uma alta dependência energética, até para as câmaras de ionização que apresentaram uma dependência energética de até 89%. Os fatores de correção para dependência angular foram maiores que 40%, que é o limite máximo estipulado pela norma internacional [10]. Deve-se, portanto, tomar muito cuidado ao se interpretar as medidas realizadas em instrumentos de detecção de radiação para fontes beta para monitoramento de área.

Agradecimentos

As autoras agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), projeto INCT em Metrologia das Radiações na Medicina, pelo apoio financeiro parcial.

Referências

- [1] ANTONIO, P. L., Estudo comparativo entre métodos de calibração de aplicadores clínicos de radiação beta. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/Universidade do estado de São Paulo, 2009.
- [2] OLIVEIRA, M. L., Desenvolvimento de um sistema de referência e de uma metodologia para calibração de aplicadores oftálmicos utilizados em braquiterapia. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/ Universidade do estado de São Paulo, 2005.
- [3] CECATTI, S. G. P. ; CALDAS, L. V. E., Dependência energética e angular de materiais termoluminescentes para monitoração beta. Radiologia Brasileira, v. 39, pp. 447-448, 2006.
- [4] BARBOSA, M. V. ; CALDAS, L. V. E., Dependência angular e energética de dosímetros fotográficos para a radiação beta. In: Anais do II Congresso Brasileiro de Físicos em Medicina, 1987, São Paulo.
- [5] PINTO, T. N. O. ; CECATTI, S. G. P. ; CALDAS, L. V. E., Energy dependence of OSL detectors in standard beta radiation beams. In: 12th International Congress of the International Radiation Protection Association, Proceedings, 2008, Buenos Aires.
- [6] DIAS, S. K. ; CALDAS, L. V. E, Performance of surface contamination monitors in alpha and beta radiation fields. Journal of Radiological Protection, v. 17, n. 4, pp. 1-5, 1997.
- [7] IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Calibration of radiation protection monitoring instruments.”, IAEA, Safety Reports Series 16, Vienna, 2000.

[8] ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Calibration fundamentals related to basic quantities characterizing the radiation field, ISO-6980- Part 2, Genève, 2004.

[9] ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Calibration of area and personal dosimeters and determination of their response as a function of beta radiation energy and angle of incidence, ISO-6980-Part 3, Genève, 2006.

[10] EN, EUROPEAN STANDARD, Radiation protection instruments - Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation, EN 60846, Brussels, 2004.