

METODOLOGIA PARA COMPARAÇÃO LABORATORIAL DE CAMPOS DE REFERÊNCIA DE RADIAÇÃO BETA DE $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm

*Jhonny A. Benavente¹, Sibe R. Reynaldo¹, Patrícia L. Antônio², Luiz C. Meira-Belo³,
Linda V. Caldas², Teógenes A. da Silva^{1,3}*

¹ Pós-graduação em Ciências e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, CDTN/CNEN, Belo Horizonte (MG)
jabc@cdtn.br, sirr@cdtn.br

²Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN, São Paulo (SP), patrilan@ipen.br, lcaldas@ipen.br

³Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN/CNEN, Belo Horizonte (MG)
lcomb@cdtn.br, silvata@cdtn.br

Resumo

Avaliou-se uma metodologia para verificação da coerência metrológica entre campos de radiação nos sistemas padrões secundários, BSS2, usando-se uma câmara de extrapolação e filmes radiocrômicos. Resultados indicaram que a metodologia foi viável somente para os campos de radiação das fontes beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , já que para ^{147}Pm grandes discrepâncias foram obtidas.

Palavras chave: metrologia de radiação beta, comparação laboratorial, câmara de extrapolação, filmes radiocrômicos.

1. INTRODUÇÃO

A coerência metrológica entre os sistemas padrões é uma exigência para a confiabilidade das medidas de grandezas dosimétricas no campo das radiações ionizantes. Avanços científicos e tecnológicos ocorreram na metrologia da radiação beta, com a instalação do novo sistema padrão secundário BSS2 no país e adoção das radiações de referência internacionalmente recomendadas [1,2].

O Laboratório de Calibração de Dosímetros do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (LCD/CDTN), em Belo Horizonte, implantou o BSS2 e estuda metodologias para caracterizar os campos de radiação beta, avaliando a homogeneidade do campo de radiação, determinando a exatidão e as incertezas na medida da dose absorvida no ar [3].

A implantação do BSS2 no Laboratório de Calibração de Instrumentos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (LCI/IPEN) exige que investigação da coerência metrológica entre os sistemas padrões seja analisada.

O objetivo principal deste trabalho foi estudar a viabilidade de uso de uma câmara de extrapolação e de filmes radiocrômicos para a verificação da coerência metrológica entre sistemas padrões de campos de radiação beta BSS2 do LCD/CDTN e do LCI/IPEN, em termos da medida da dose absorvida no ar.

3. MÉTODOS

Como detectores de comparação, foram usados a câmara de extrapolação PTW modelo 23391 e os filmes radiocrômicos *Gafchromic*® modelo EBT.

A confiabilidade metrológica da câmara de extrapolação e dos filmes radiocrômicos foi confirmada no LCD/CDTN. A caracterização da câmara PTW 23391 foi realizada por meio de testes de corrente de fuga, repetitividade, reprodutibilidade e determinação da resposta em termos de dose absorvida no ar, para campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. Coeficientes de calibração foram determinados pela razão entre a taxa de dose absorvida no ar certificada pelo BSS2 do LCD/CDTN [4] (Tabela 1) e o coeficiente angular da curva de extrapolação para cada campo de radiação (Figura 1.a).

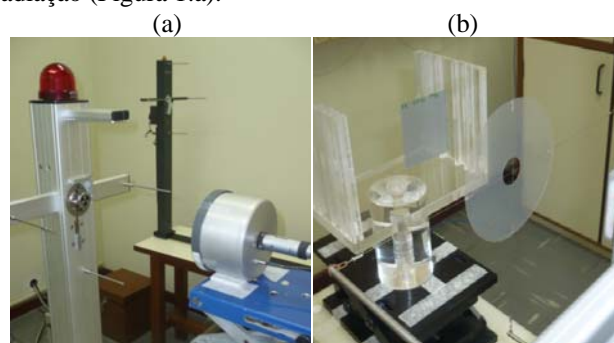


Fig. 1. (a) Câmara de extrapolação PTW 23391 e (b) amostra de filme radiocrômico EBT sob condições de irradiação no sistema BSS2/CDTN.

Tabela 1. Taxas de dose absorvida no ar certificadas do sistema BSS2 do LCD/CDTN.

Fonte	Distância (cm)	Taxa de Dose absorvida no ar ($\mu\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$)
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	30	$17,6 \pm 0,2$
^{85}Kr	30	$45,5 \pm 0,6$
^{147}Pm	20	$2,55 \pm 0,04$

A caracterização dos filmes radiocrômicos EBT foi realizada investigando a resposta radiocrômica em função da dose absorvida no ar, na faixa de 0,1 a 5,0 Gy, para os campos de radiação de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm do BSS2/CDTN. Coeficientes de calibração foram obtidos pela razão entre a dose absorvida no ar certificada pelo BSS2 do LCD/CDTN e os valores de densidade óptica líquida para campo de radiação (Figura 1.b) [5].

A Figura 2 apresenta a resposta radiocrômica das amostras dos filmes radiocrômicos EBT, irradiados nos campos da fonte $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, com valores de dose absorvida de 0,1 a 5,0 Gy, digitalizados com o scanner *Microtek* 9800XL.

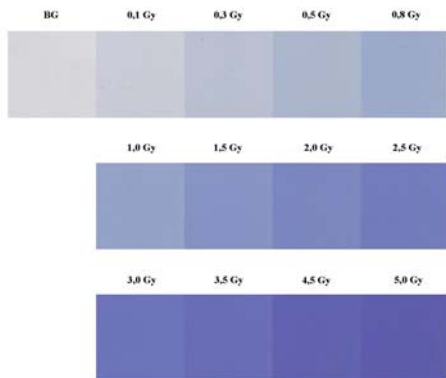


Fig. 2. Representação dos filmes radiocrômicos irradiados em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, digitalizados com o scanner *Microtek*.

Um ensaio de verificação da coerência metrológica entre os sistemas BSS2 foi realizado para os campos de radiação beta do $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm . A coerência metrológica entre os sistemas BSS2 do LCD/CDTN e do LCI/IPEN foi verificada com a câmara de extrapolação por meio da comparação entre os coeficientes de calibração e com os filmes radiocrômicos por meio da determinação da grandeza dose absorvida. A Tabela 2 apresenta os valores das taxas de dose absorvida no ar certificadas do sistema BSS2 do LCI/IPEN [4].

Tabela 2. Taxas de dose absorvida no ar certificadas do sistema BSS2 do LCI/IPEN.

Fonte	Distância (cm)	Taxa de Dose absorvida no ar ($\mu\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$)
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	30	$18,27 \pm 0,24$
^{85}Kr	30	$44,5 \pm 0,6$
^{147}Pm	20	$2,64 \pm 0,06$

A câmara de extrapolação foi posicionada com o plano da janela de entrada perpendicular ao eixo central do feixe de radiação em cada BSS2 (Figura 3.a).

Medidas de carga elétrica integradas por 30 s foram obtidas, para as profundidades da câmara de 1,4 a 4,4 mm. Curvas de extrapolação foram obtidas em termos da corrente de ionização em função da profundidade da câmara para determinação dos coeficientes angulares.

Os filmes radiocrômicos, em amostras de $5 \times 5 \text{ cm}^2$, foram irradiados sobre um objeto simulador de PMMA, posicionados perpendicularmente ao eixo central do campo

de radiação (Figura 3.b), com doses absorvidas no ar de 0,1; 0,3 e 0,15 Gy para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , respectivamente. As respostas dos filmes radiocrômicos foram avaliadas após digitalização no scanner *Microtek* 9800XL e da análise realizada com o programa *Image J*.

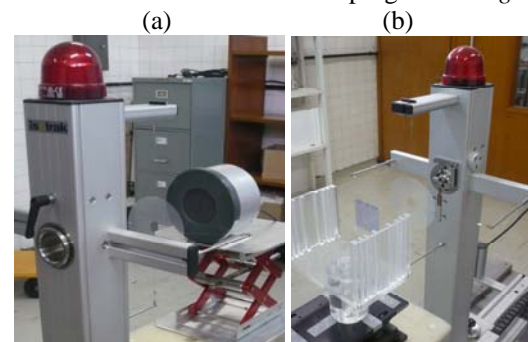


Fig. 3. (a) Câmara de extrapolação PTW 23391 e (b) amostra de filme radiocrômico EBT sob condições de irradiação no sistema BSS2/IPEN.

4. RESULTADOS

Os resultados das curvas de extrapolação da câmara PTW 23391 obtidas nos campos de radiação do $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm do BSS2/IPEN é apresentado na Figura 4.

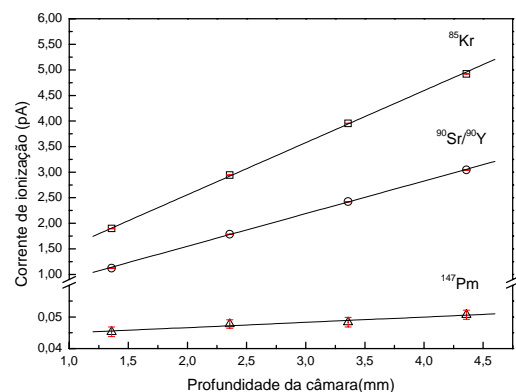


Fig. 4. Curvas de extrapolação da câmara PTW 23391 para os campos de radiação beta no sistema BSS2 do LCI/IPEN.

As curvas de extrapolação apresentaram comportamento linear, onde, os coeficientes de correlação obtidos foram de 0,9996 para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , e de 0,9267 para a de ^{147}Pm . A diferença entre os coeficientes angulares das retas está relacionada à intensidade do campo de radiação diretamente relacionada à atividade da fonte.

Na Figura 4, os valores da corrente de ionização para o campo de ^{147}Pm variaram na faixa de 0,045 a 0,051 pA, aproximadamente da ordem do valor médio encontrado da corrente de fuga, $5,593 \times 10^{-14} \text{ A}$, o que impossibilitou a realização de qualquer tipo de comparação das grandezas envolvidas neste tipo de campo de radiação.

A Tabela 3 apresenta os valores dos coeficientes de calibração da câmara PTW 23391 obtidos a partir das taxas de doses absorvidas no ar certificadas no BSS2 do LCD/CDTN em função do coeficiente angular das curvas de extrapolação. A Tabela 4 mostra o resultado das medidas de

taxas de doses absorvidas no ar determinadas a partir dos coeficientes angulares no sistema BSS2/IPEN.

Tabela 3. Coeficientes de calibração em termos de dose absorvida no ar da câmara de extrapolação, obtidos no LCD/CDTN.

Fonte	Distância (cm)	Taxa de Dose absorvida no ar ($\mu\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$)	Coeficiente de calibração ($\mu\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}^{-1}$)
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	30	$13,63 \pm 0,04$	$(23,14 \pm 0,15) \times 10^{+12}$
^{85}Kr	30	$30,10 \pm 0,04$	$(31,06 \pm 0,13) \times 10^{+12}$
^{147}Pm	20	$2,73 \pm 0,05$	$(26,02 \pm 6,61) \times 10^{+13}$

Tabela 4. Coeficientes angulares e taxa de dose absorvida no ar, obtidos com a câmara de extrapolação no LCI/IPEN.

Fonte	Distância (cm)	Coeficiente angular ($10^{-13}\text{ A}\cdot\text{mm}^{-1}$)	Taxa de dose absorvida no ar ($\mu\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$)
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	30	$6,399 \pm 0,022$	$14,61 \pm 0,04$
^{85}Kr	30	$10,082 \pm 0,025$	$32,34 \pm 0,04$

A diferença dos valores das taxas de dose absorvida no ar obtidas com a câmara de extrapolação em campos do sistema BSS2/CDTN em relação às taxas de dose absorvida no ar dadas pelo certificado (Tabela 2) foi de -22,5%, -33,8% e -7,1% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , respectivamente.

Para o caso das medições realizadas nos campos do BSS2/IPEN, a diferença dos valores das taxas de dose absorvida no ar em relação às taxas de dose absorvida no ar dadas pelo certificado (Tabela 2) foi de -20,0% e -27,4% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , respectivamente.

A Tabela 5 apresenta a comparação entre os coeficientes de calibração da câmara de extrapolação PTW 23391 dos campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr do BSS2 do LCI/IPEN em relação aos campos do LCD/CDTN.

Tabela 5. Coeficientes angulares e taxa de dose absorvida no ar, obtidos com a câmara de extrapolação no LCI/IPEN.

Fonte	Distância (cm)	Coeficiente de calibração ($10^{+12}\mu\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}^{-1}$)		Diferença (%)
		IPEN	CDTN	
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	30	$22,84 \pm 0,09$	$23,14 \pm 0,15$	-1,3
^{85}Kr	30	$32,08 \pm 0,09$	$31,06 \pm 0,13$	3,3

A comparação entre as medidas realizadas mostrou que os valores dos coeficientes de calibração apresentaram diferenças de -1,3% e 3,3% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , respectivamente. As incertezas expandidas dos coeficientes de calibração foram determinadas pelo desvio padrão das medidas, incerteza tipo A, com fatores de abrangência $k = 2,07$ e $2,18$, respectivamente e para um nível de confiança de aproximadamente 95%.

As respostas dos filmes radiocrômicos foram avaliadas após digitalização no scanner *Microtek 9800XL* e da análise realizada com o programa *Image J*. Os resultados em termos de dose absorvida no ar obtidos com os filmes radiocrômicos irradiados nos sistemas BSS2 do LCD/CDTN e do LCI/IPEN em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (0,1 e 0,3 Gy), ^{85}Kr

(0,1 e 0,3 Gy) e ^{147}Pm (0,15 Gy) são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Comparação dos valores de dose absorvida obtidos com os filmes radiocrômicos nos sistemas BSS2 do LCD/CDTN e do LCI/IPEN.

Fonte	Distância (cm)	Dose Absorvida no ar (Gy)		Diferença (%)
		LCD/CDTN	LCI/IPEN	
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	30	$0,100 \pm 0,019$	$0,100 \pm 0,019$	0,0
		$0,344 \pm 0,023$	$0,353 \pm 0,024$	2,6
^{85}Kr	30	$0,085 \pm 0,019$	$0,077 \pm 0,018$	-9,1
		$0,372 \pm 0,031$	$0,372 \pm 0,031$	0,0
^{147}Pm	20	$0,250 \pm 0,046$	$0,117 \pm 0,024$	-53,3

Os resultados mostram que as incertezas dos valores das doses absorvidas, para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , foram no máximo de 23% para a dose de 0,1 Gy e de 7% para 0,3 Gy. As diferenças dos valores de dose absorvida determinados no LCI/IPEN em relação aos valores obtidos no LCD/CDTN foram, no máximo, de 3% e de -9% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , respectivamente. As pequenas diferenças encontradas sugerem que os valores das incertezas podem estar superestimados; adicionalmente, tais diferenças podem ter sido causadas pelo não alinhamento geométrico dos campos de radiação.

Para o campo da fonte de ^{147}Pm , pode-se observar que o valor da incerteza esteve em torno de 20% e que a diferença entre os valores de dose absorvida foi de -53%. A alta diferença foi causada pelos pequenos valores de densidade óptica do filme radiocrômico, que aumentaram as incertezas no procedimento de medida.

Na Tabela 7 são apresentadas as diferenças entre os valores de dose absorvida obtidos experimentalmente a partir das amostras de filmes EBT, irradiadas em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , dos sistemas BSS2 do LCD/CDTN e do LCI/IPEN.

Tabela 7. Diferença entre os valores de dose absorvida avaliados em relação aos valores de dose absorvida nominais, obtidos a partir dos filmes radiocrômicos irradiados no BSS2 do LCI/CDTN e do LCI/IPEN em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

Fonte	Dose Absorvida no ar (Gy)		Dose Absorvida no ar (Gy)	
	LCD/CDTN	Diferença (%)	LCI/IPEN	Diferença (%)
	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	$0,100 \pm 0,019$	0,0	$0,100 \pm 0,019$
	$0,344 \pm 0,023$	14,7	$0,353 \pm 0,024$	17,7
^{85}Kr	$0,085 \pm 0,019$	-15,0	$0,077 \pm 0,018$	-23,0
	$0,372 \pm 0,031$	24,0	$0,372 \pm 0,031$	24,0
^{147}Pm	$0,250 \pm 0,046$	66,7	$0,117 \pm 0,024$	-22,0

A razão dos valores de dose absorvida dos filmes radiocrômicos avaliados no LCD/CDTN e no LCI/IPEN pelos valores nominais de dose absorvida dados pelos sistemas BSS2 estão apresentados na Figura 5.

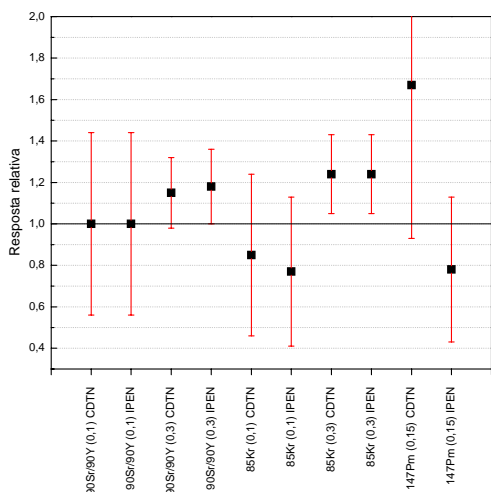


Fig. 5. Razão dos valores de dose absorvida dos filmes radiocrômicos avaliados no LCD/CDTN e no LCI/IPEN pelos valores de dose absorvida nominais dadas pelos sistemas BSS2 irradiados em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

Os resultados dos filmes radiocrômicos irradiados com dose absorvida de 0,1 e 0,3 Gy para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , apresentaram diferenças de até 24% (Tabela 7). Para o caso do campo de ^{147}Pm , os altos valores das incertezas impossibilitaram a comparação.

5. CONCLUSÃO

A comparação entre as medidas das taxas de dose absorvida no ar obtidas pela câmara de extrapolação PTW 23391 no BSS2 do LCD/CDTN em relação às taxas de dose absorvida no ar dadas pelo certificado de calibração, apresentaram diferenças de -23%, -34% e 7% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , respectivamente.

A viabilidade da metodologia de utilização da câmara de extrapolação foi demonstrada a partir da comparação entre os laboratórios do LCD/CDTN e o LCI/IPEN. A comparação entre os valores das taxas de dose absorvida no ar determinadas pela câmara de extrapolação em relação às taxas de dose absorvida no ar dadas pelo certificado de calibração do BSS2 do LCI/IPEN, apresentaram diferenças de -20% e -27% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , respectivamente. Para o campo da fonte de ^{147}Pm , os valores da corrente de ionização medida foram da mesma ordem da corrente de fuga, o que impossibilitou a comparação.

A comparação entre o LCI/IPEN em relação ao LCD/CDTN mostrou que os valores dos coeficientes de calibração determinados com a câmara de extrapolação, apresentaram diferenças máximas de -1% e 3% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , respectivamente.

A viabilidade da metodologia de utilização dos filmes radiocrômicos foi demonstrada a partir da comparação entre os laboratórios do LCD/CDTN e o LCI/IPEN. Os valores de dose absorvida no ar de 0,1; 0,3 e 0,15 Gy determinados com os filmes radiocrômicos EBT, apresentaram diferenças máximas de 3%, -9% e -53% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , respectivamente. A alta diferença apresentada para o campo da fonte de ^{147}Pm foi devida principalmente à

baixa taxa de dose absorvida e à baixa atividade do espectro de ^{147}Pm .

O ensaio de comparação laboratorial realizado indicou que a utilização dos detectores tipo câmara de extrapolação PTW 23391 e filmes radiocrômico EBT é adequada somente para os campos de radiação de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr e que existe ainda possibilidade de redução das incertezas associadas.

AGRADECIMENTOS

À CNEN pela bolsa de mestrado de Jhonny Antonio Benavente Castillo. À FAPEMIG pelo apoio financeiro por meio do projeto “Implantação do Sistema Metrológico Secundário e Primário de Campos de Radiação Beta de Minas Gerais”, Edital TIB 2009-2011. Este trabalho integra o projeto do INCT Metrologia das Radiações em Medicina.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN/SP pela oportunidade para a realização da comparação laboratorial.

REFERÊNCIAS

- [1] International Commission On Radiation Units And Measurements. ICRU Report 56: *Dosimetry of external beta rays for radiation protection*. Bethesda, 1997.
- [2] International Organization for Standardization -ISO – *Reference beta radiations for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of beta-radiation energy* International Standard 6980-1, 2 and 3, 1996.
- [3] S. R. Reynaldo; T. A. Da Silva - . *Implantação do Novo Sistema Padrão Secundário de Radiação Beta no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear*. In: International Nuclear Atlantic Conference (INAC 2005), 2005.
- [4] AEA TECHNOLOGY. **Operation manual Beta Secondary Standard 2, BSS2**. Braunschweig, Germany, 2000.
- [5] J. A. Benavente, L. C. Meira-Belo, S. R. Reynaldo, T. A. da Silva. “*Caracterização de campos de radiação beta utilizando filmes radiocrômicos*”. Revista Brasileira de Física Médica, v4 n3, p 71-74, 2010.