

Avaliação do equivalente de dose pessoal “ $H_p(d)$ ” em um sistema de monitoração individual externa para raios X e gama

C. Santoro¹; J. A. Filho¹; M. A. P. Santos²

¹Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, 50740-540, Recife-PE e Departamento de Física, Universidade Católica de Pernambuco, 50050-900, Recife-PE, Brasil

²Comissão Nacional de Energia Nuclear, Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste, 50740-540, Recife-PE, Brasil

chris@unicap.br; jaf@ufpe.br; masantos@cnen.gov.br
(Recebido em 01 de outubro de 2007; aceito em 20 de novembro de 2007)

A monitoração individual externa tem o objetivo de estimar a exposição às fontes externas de radiação ionizante X e γ , as quais os trabalhadores ocupacionais estão submetidos, rotineiramente ou potencialmente, a fim de assegurar que condições radiológicas para o local de trabalho sejam aceitáveis, seguras e satisfatórias. A avaliação da dose recebida por trabalhadores deve atender os limites autorizados por organismos nacionais regulatórios. Atualmente dois sistemas de unidades radiométricas convivem, ambos sendo baseados em resoluções da International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). No chamado sistema convencional, as doses recebidas pelos trabalhadores são avaliadas por meio da dose superficial (H_x), que é estimada por dosímetros, usados na superfície do tórax, calibrados em termos do kerma no ar. No sistema mais recente, as doses recebidas pelos trabalhadores são avaliadas por meio do equivalente de dose pessoal ($H_p(d)$), sendo os dosímetros calibrados em termos da dose sobre um fantoma. Este sistema aprimora a forma de avaliar, por considerar a influência do espalhamento e absorção da radiação pelo corpo humano. O objetivo deste trabalho foi adaptar um serviço de dosimetria fotográfica as recentes publicações da ICRU, para avaliação de monitores individuais em função do equivalente de dose pessoal ($H_p(d)$). Para tal, foi utilizada uma metodologia simples, baseada na Programação Linear. Na adaptação deste serviço foram determinadas curvas de calibração para as qualidades de radiação, espectros largos (W) e estreitos (N), descritos pela International Organization for Standardization (ISO 4037-1, 1995). Estas curvas de calibração oferecem uma melhor exatidão na determinação das doses e energias abaixo de 140 keV, melhorando a qualidade do serviço prestado à sociedade.

Palavras-chave: monitoração individual, dosimetria fotográfica, programação linear.

The good of individual monitoring for external radiation is the assessment of occupational exposure from X and γ radiations in order to assure that the radiological conditions of the workplace are acceptable, safe and satisfactory.

The evaluation of radiations doses for workers must not exceed dose limits specified for workers, according to national regulatory agencies. Nowadays, there are two external monitoring systems in use, both based on ICRU definitions. In the conventional system, the workers doses are evaluated in terms of H_x . The personal dosimeter is worn over chest surface and it is calibrated in function of air kerma. In the new system, the workers doses are evaluated in terms of $H_p(d)$ and the personal dosimeter is calibrated in function of phantom doses. The aim of this paper is to adapt an external dosimetry laboratory (based on photographic dosimetry) to evaluate the personal dosimeters in terms of $H_p(d)$. In this way, a simple methodology, based on linear programming, was utilized. In this adaptation, calibration curves were obtained for radiation qualities (W and N series) described by International Organization for Standardization (ISO 4037-1, 1995). These calibration curves offer a better accuracy on dose determinations and energy below 140 keV, improving the quality of service rendered the society.

Keywords: Individual monitoring, photographic dosimetry, linear programming.

1. INTRODUÇÃO

Crocker, um dos pioneiros da pesquisa dos efeitos da radiação X a saúde, relatava que: “Uma grande parte das descobertas científicas, que trazem benefício à raça humana, quando não aplicadas corretamente, produzem também certa quantidade de danos à saúde. Os raios X de Röntgen não são uma exceção a essa regra – considerando-se estruturas da pele ou tecido –

diversas lesões já haviam sido registradas”. Isto demonstrava a preocupação de parte dos cientistas do final do século XIX com as conseqüências do uso dos raios X [1]. Na verdade, semanas após a descoberta de Röntgen, jornais já publicavam artigos descrevendo os efeitos dos misteriosos raios em pacientes e trabalhadores [2].

Na Alemanha, em 1913, foram adotadas as primeiras regras para proteção à radiação ionizante e na Inglaterra, em 1915, a Sociedade Inglesa Röntgen propôs à adoção de uma recomendação universal para a segurança dos operadores de raios X [3].

Assim, sob o aspecto da proteção radiológica, são admissíveis os empenhos no sentido de monitorar as doses de radiações ionizantes a que são submetidos os trabalhadores ocupacionalmente expostos, de modo a impedir exposições dispensáveis e tornar mínimas as suas conseqüências que são lesivas à saúde.

Organismos internacionais como a ICRP - International Commission on Radiological Protection e a ICRU - International Commission on Radiation Units and Measurements, publicam recomendações sobre os princípios básicos e as diretrizes para a radioproteção, apresentando definições para grandezas e limites de doses oriundas das exposições às radiações ionizantes, tanto para profissionais como para o público. Tais conceitos são as principais bases da dosimetria, sendo altamente indicados as suas implementações em legislações, regulamentos e procedimentos de trabalho.

A grandeza operacional para uso em monitoração individual, o equivalente de dose pessoal $H_p(d)$, é definido como o “equivalente de dose profunda” em tecido mole, numa profundidade d (em milímetros), a partir de um ponto específico na superfície do corpo. Para estimar a dose efetiva devido à exposição externa deve ser utilizado um monitor individual posicionado no ponto mais exposto do tórax, calibrado em $H_p(10)$, para a profundidade 10mm e para radiações fortemente penetrantes [4].

Na calibração dos monitores individuais em função da grandeza equivalente de dose pessoal $H_p(d)$ temos o fato de que a interpretação dos dados de tais monitores (dosímetros fotográficos com múltiplos filtros) tem sido objeto de numerosos estudos, isto porque considerando a dependência energética do sistema, deve-se empregar um método matemático para calcular a dose e também a energia efetiva média do campo de radiação a fim de se obter a melhor resposta possível [5]. Uma das formas adotadas para resolver esta dependência energética é a utilização da Programação Linear (P.L.)

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os monitores individuais (dosímetros fotográficos) utilizados neste trabalho são constituídos por:

- porta dosímetro consistindo de uma pequena caixa de polietileno de dimensões 42 mm x 52 mm x 8 mm. Em seu interior, contém filtros metálicos colados nas faces internas anterior e posterior;
 - filme dosimétrico da marca Agfa-Gevaert, tipo Agfa personal monitoring, com dimensões 33 mm x 45 mm x 1 mm, contendo duas películas, uma de baixa e outra de alta sensibilidade.
- Para irradiação dos dosímetros foram utilizadas as seguintes fontes de radiação gama e X:
- fonte ^{60}Co com atividade de 17,17 GBq em 07/10/1998, fabricante IPEN/CNEN, modelo 616/CoS132;
 - fonte ^{137}Cs com atividade de 444 GBq em 13/05/2003, fabricante J.L. SHEPHERD & ASSOCIATES, modelo 28-8A;
 - aparelho de raios X, fabricante PANTAK, modelo HF-320, filtração inerente do tubo 3 mm Be, faixa de tensão 5 – 320 kV, faixa de corrente 0,5 – 30 mA, ânodo rotatório, potência 3,2 kW e tamanho do ponto focal 1,2 mm e 3 mm.

A calibração dos dosímetros foi realizado com o auxílio de um fantoma slab de água, que simula um tronco humano, feito de PoliMetil MetAcrilato com dimensões de 300 mm x 300 mm x 150 mm, conforme Figura 1.

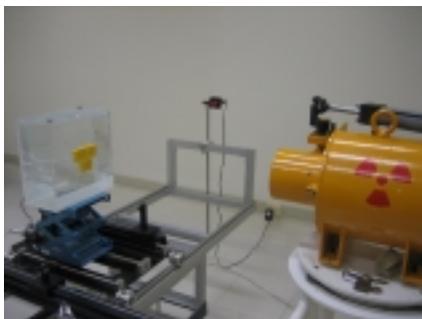


Figura 1: Arranjo experimental usado para calibração dos dosímetros em feixes de radiação gama.

Os dosímetros foram irradiados com doses variando de 0,2 a 500 mSv em feixes γ do ^{60}Co e ^{137}Cs e de 0,2 a 200 mSv em feixes de raios X, nas seguintes qualidades ISO com: N-60; N-100; N-150; N-200; W-60; W-80; W-150 e W-200 [6].

Os filmes foram processados e revelados em uma câmara escura com temperatura e umidade controlada ($20 \pm 2^\circ \text{C}$ e $36 \pm 3\%$), respectivamente e posteriormente colocados em estufa. A avaliação das densidades ópticas foi realizada no densitômetro óptico Macbeth, modelo TD931.

O método utilizado na avaliação da dose foi o da combinação linear em termos da dose aparente. Um modelo simples proposto por Borasi [7] para o comportamento da resposta do filme dosimétrico em função do kerma ar (K_a) foi adaptado para o equivalente de dose pessoal (H_p) e é descrito pela equação 1.

$$D_{ij} = \gamma_{ij} \left(1 - e^{-\gamma'_{ij} H_p} \right) \quad (1)$$

Onde: D_{ij} é a densidade óptica líquida produzida pela energia “i” no filtro “j”; γ_{ij} é a densidade óptica de saturação produzida pela energia “i” no filtro “j” e γ'_{ij} é a inclinação da curva produzida pela energia “i” no filtro “j”.

Como a resposta do filme em termos de densidade óptica não apresenta linearidade com respeito à dose, as curvas foram linearizadas por meio de normalização em relação a uma curva de referência convenientemente escolhida (filtro e energia: sob o filtro de chumbo e energia do ^{60}Co). Com isso, as densidades ópticas foram convertidas, no que geralmente é conhecido como, dose aparente “DA” [8].

A dose aparente é relacionada com o $H_p(d)$, conforme equação 2.

$$DA = K \times H_p \quad (2)$$

Sendo K o coeficiente angular para leituras sob cada filtro, obtido através de um ajuste linear para cada valor de energia de calibração, utilizando a resposta do dosímetro sob o filtro de chumbo para ^{60}Co .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dosímetros, num total de 369, foram utilizados nas irradiações com ^{60}Co , ^{137}Cs e raios-X com valores de doses entre 0,2 a 200 mSv e 0,2 a 500 mSv, cada conjunto de 3 dosímetros recebendo a mesma dose. Um conjunto de curvas foi construído e relacionando a densidade óptica líquida (D_{ij}) com o equivalente de dose pessoal $H_p(d)$ para cada energia E_i . Onde as constantes “ γ_{ij} e γ'_{ij} ”, tem o “i” associado à energia da radiação variando de 1 a 10 e o “j” associado à quantidade de filtros variando de 1 a 5; deste modo, para cada área de leitura j sob um dado filtro e para cada tipo de emulsão (mais sensível ou menos sensível). Como exemplo, a Figura 2 refere-se a curva do ^{60}Co , cuja energia é 1250 keV, para emulsão mais sensível, tais curvas foram obtidas de forma iterativa com o auxílio de um programa computacional para cada energia, por se tratar de uma equação transcendental.

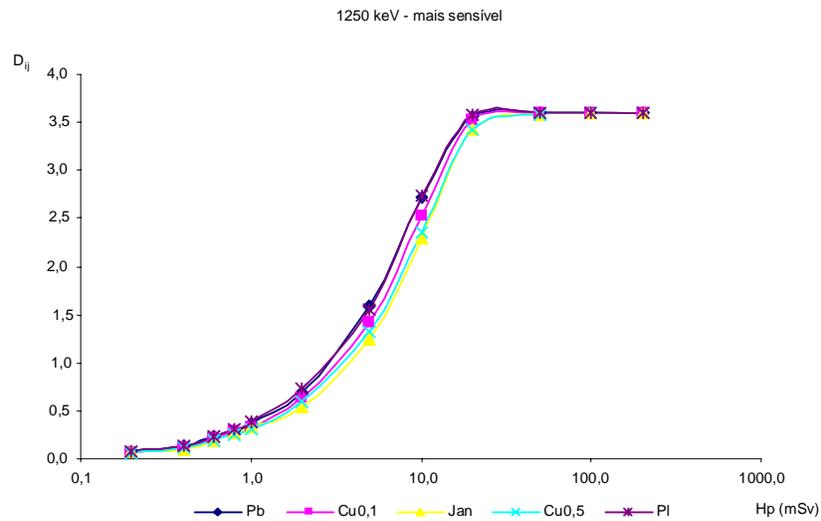


Figura 2: D_{ij} em função do H_p (nos filtros de: chumbo, cobre 0,1 mm, janela sem filtro, cobre 0,5 mm e plástico) para a energia do ^{60}Co – emulsão mais sensível

Um algoritmo, com base na D_{ij} em função de H_p sob cada filtro, calculou a Dose Aparente (DA), através de um ajuste linear e foi obtida a linearização do modelo proposto, conforme Figura 3 (emulsão mais sensível). Tal algoritmo (KCALC_UFPE) utiliza o método Simplex da Programação Linear para realizar o ajuste linear, tem sido utilizado no Laboratório de Monitoração Individual do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco [9].

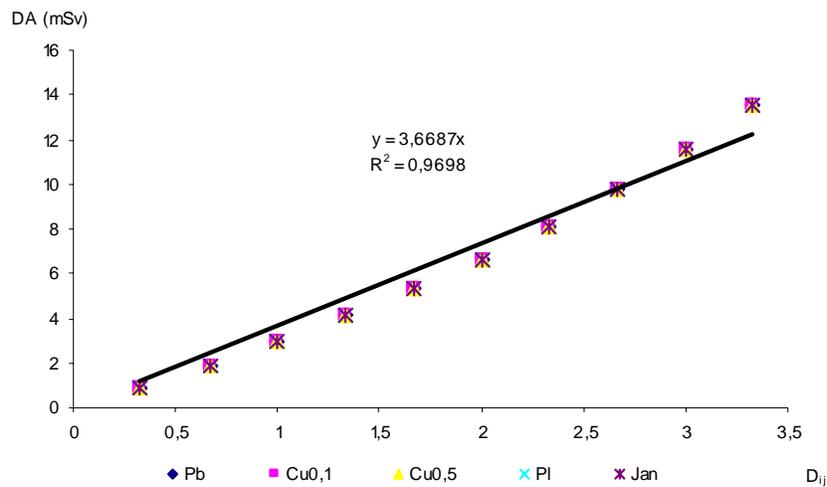


Figura 3: Dose aparente (DA) sob os filtros em função da D_{ij} para energia do ^{60}Co – emulsão mais sensível.

Um segundo conjunto de curvas, normalizadas e linearizadas em termos da Dose Aparente apresentado na Figura 4: a curva dos coeficientes angulares K_{ij} de cada filtro em função da energia - emulsão mais sensível. Os valores dos coeficientes angulares K_{ij} foram obtidos num intervalo de confiança de 95% e com os coeficientes de determinação das retas médio de $r^2 = 0,95 \pm 0,12$.

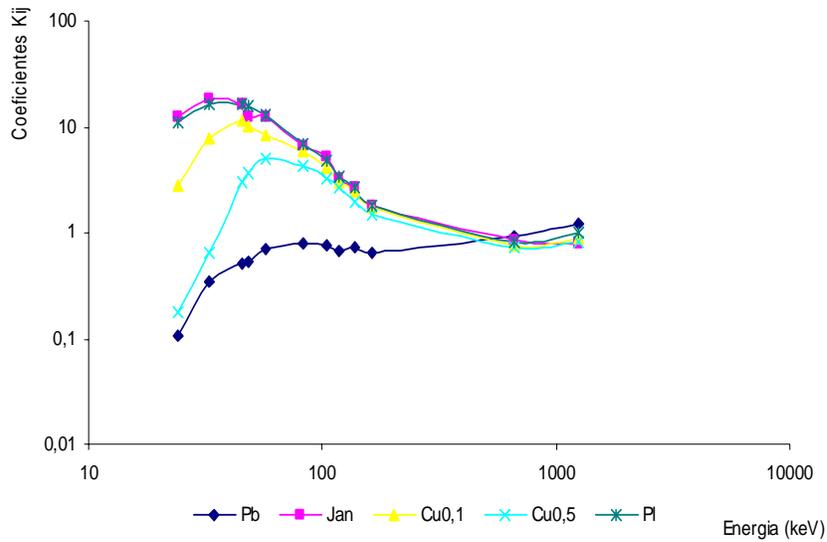


Figura 4: Curva dos coeficientes angulares de cada filtro em função da energia - emulsão mais sensível

Os coeficientes angulares α_1 à α_5 , foram obtidos utilizando um segundo algoritmo que através da combinação linear calculou esses coeficientes para avaliação da dose. A dose pode ser avaliada utilizando a equação 3:

$$H_p (mSv) = (\alpha_1 D_{ij_{Pb}} + \alpha_2 D_{ij_{Cu0.1}} + \alpha_3 D_{ij_{Cu0.5}} + \alpha_4 D_{ij_{Ja}} + \alpha_5 D_{ij_{Pb}}) \times K \quad (3)$$

Onde: α_1 à α_5 são coeficientes angulares de cada filtro, D_{ij} são as densidades ópticas líquidas sob cada filtro e K é o coeficiente angular da reta: $DA \times D_{ij}$, ver Tabela 1.

Tabela 1: Coeficientes linear e angular

| <i>Coeficientes angulares</i> | | | | | <i>Coeficiente</i> |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|--------------------|
| α_1 | α_2 | α_3 | α_4 | α_5 | <i>angular (K)</i> |
| 0,52 | -0,47 | -1,96 | 2,12 | 0,34 | 3,6687 |

Na Tabela 2 comparamos os resultados obtidos: o valor da dose avaliada com o valor real.

Tabela 2ª: Comparação da dose avaliada com a real.

| <i>Energia 1250keV – D_{ij}</i> | | | | | <i>Dose avaliada</i> | <i>Dose real</i> |
|--|-------|-------|------|------|----------------------|------------------|
| Pb | Cu0,1 | Cu0,5 | Pb | Jan | | |
| 0,08 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,07 | 0,2 | 0,2 |
| 0,14 | 0,12 | 0,12 | 0,14 | 0,10 | 0,4 | 0,4 |
| 0,24 | 0,21 | 0,19 | 0,23 | 0,18 | 0,7 | 0,6 |
| 0,30 | 0,28 | 0,25 | 0,29 | 0,27 | 0,9 | 0,8 |
| 0,38 | 0,32 | 0,31 | 0,36 | 0,33 | 1,1 | 1 |
| 0,72 | 0,64 | 0,59 | 0,69 | 0,54 | 2,1 | 2 |
| 1,55 | 1,42 | 1,32 | 1,58 | 1,25 | 4,9 | 5 |
| 2,73 | 2,52 | 2,36 | 2,72 | 2,30 | 7,9 | 10 |

Tabela 2b: Comparação da dose avaliada com a real.

| <i>Energia 662keV – D_{ij}</i> | | | | | <i>Dose avaliada H_p</i> | <i>Dose real</i> |
|--|-------|-------|------|------|------------------------------------|------------------|
| Pl | Cu0,1 | Cu0,5 | Pb | Jan | | |
| 0,06 | 0,04 | 0,06 | 0,05 | 0,06 | 0,1 | 0,2 |
| 0,12 | 0,09 | 0,11 | 0,12 | 0,12 | 0,4 | 0,4 |
| 0,18 | 0,15 | 0,15 | 0,17 | 0,19 | 0,6 | 0,6 |
| 0,24 | 0,21 | 0,21 | 0,25 | 0,25 | 0,8 | 0,8 |
| 0,30 | 0,24 | 0,25 | 0,31 | 0,30 | 1,1 | 1 |
| 0,58 | 0,52 | 0,51 | 0,62 | 0,59 | 2,1 | 2 |
| 1,35 | 1,26 | 1,21 | 1,47 | 1,38 | 4,9 | 5 |
| 2,39 | 2,27 | 2,16 | 2,61 | 2,39 | 8,4 | 10 |

4. CONCLUSÃO

As comparações entre as doses avaliadas com as doses reais indicam que os resultados obtidos apresentam uma boa aproximação, apesar de para dose de 10 mSv foi percebida uma discrepância maior entre os valores comparados. Este fato é devido ao valor da densidade óptica encontrar-se próximo a região de saturação indicando que valores de doses maiores devem ser avaliados através da densidade óptica da película com emulsão menos sensível.

Este estudo sugere que as avaliações das doses recebidas pelos trabalhadores devam ser adaptadas para os novos padrões sugeridos pelas comissões internacionais, devido à melhoria da forma de avaliação das doses.

1. CROCKER, H. R. A case of dermatitis from Röntgen rays. *British Medical Journal*, v.2, p 8-9, 1897.
2. ARCHER, B. R. History of the shielding of diagnostic X-ray facilities. *Health Physics*, v.69, n.5, p. 750-758, 1995.
3. BECKER, K. *Photographic film dosimetry*. London, 1966.
4. International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU REPORT 39: *Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources*. USA, 1985.
5. DALTRO, T. F. L. *Desenvolvimento de uma nova metodologia para o cálculo de dose em dosimetria fotográfica*. 126f. 1994. Dissertação (Mestrado em ciências na área de tecnologia nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo, São Paulo, 1994.
6. International Organization for Standardization. X and gamma reference radiation for calibrating dose meters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 1: *Characteristics of the radiations and their methods of production*. ISO 4037-1, Geneva, 1995.
7. BORASI, G., GIACOMELLI, M., TOSI, G. *Tecniche di ottimizzazione in dosimetria fotográfica*. In: *Atti del I Incontro Nazionale di Analisi e Confronto dei Metodi di Dosimetria Personale*, CNEN (ENEA), Milano, 7-9 november 1977, p. 172-188 (in Italian), 1977.
8. BERMANN, F., CHANOURDIE, J.C. Reconnaissance assistée des rayonnements à partir des données d'un dosimètre photographique. *Radioprotection*, 8: p. 189-205, 1973.
9. HUNT, J., CUNHA, P., RAMOS, E. *Dosimetria fotográfica e o Serviço de Dosimetria Fotográfica do IRD/CNEN*. Rio de Janeiro, 1993.