

Artigo Original

recebido: 23/04/1999 e aceito em 20/08/1999

Determinação da tensão aplicada a tubos de raios X através do espectro de bremsstrahlung obtido com um fotodiodo PIN

Determination of the potential applied to X-rays tubes through the bremsstrahlung spectrum obtained with a PIN photodiode

M.C. Silva

Aluna de mestrado – Instituto de Física
USP - Universidade de São Paulo
e-mail: mcarval@iee.usp.br

P. Lammoglia

Tecnóloga em Saúde, Seção Técnica
de Aplicações em Diagnóstico por Imagens
Instituto de Eletrotécnica e Energia - (IEE/USP)
Av. Prof. Luciano Gualberto, 1289
05508-900 - São Paulo – SP.
e-mail: lamoglia@iee.usp.br

S.B. Herdade

Professor Associado (Consultor),
Instituto de Eletrotécnica e Energia - USP
e-mail: sherdade@iee.usp.br

P.R. Costa

Físico, Chefe da Seção Técnica de Desenvolvimento
Tecnológico em Saúde
Instituto de Eletrotécnica e Energia – USP
e-mail: pcosta@iee.usp.br

R.A. Terini

Prof. Associado, Departamento de Física
Pontifícia Universidade Católica de São Paulo
Rua Marquês de Paranaguá, 111
01303-050 - São Paulo – SP.
e-mail: rterini@exatas.pucsp.br

Resumo

O trabalho descreve uma metodologia para a obtenção do potencial de aceleração dos elétrons (kVp) aplicado a tubos de raios X, através da determinação do ponto extremo do espectro de energias da radiação emitida pelo tubo. As medições foram feitas utilizando dois fotodiodos PIN: um Hamamatsu S3071 e um Siemens SFH206K, irradiados diretamente pelo feixe, operando à temperatura ambiente, o que reduz muito os inconvenientes do uso de fotomultiplicadoras e detectores de germânio. A calibração em energia do sistema pode ser feita com fontes radioativas emissoras de raios X e gama, o que torna o método absoluto. O valor do kVp é determinado através da regressão linear na faixa final do espectro, de modo a proporcionar, simultaneamente, um bom ajuste da reta e um desvio padrão baixo do valor do kVp. São apresentados resultados de medições feitas com tubos conectados a um gerador trifásico, utilizando-se filtrações adicionais entre 1,5 e 5,0 mm de Cu, de modo a minimizar a contribuição dos fótons de menor energia e reduzir o empilhamento de pulsos. Os valores de kVp determinados apresentam erros entre 0,2 e 0,6 kV na faixa de tensão entre 50 e 110 kV. Como exemplo, a metodologia foi aplicada na verificação da calibração secundária de um divisor de tensão, utilizado, por sua vez, na calibração terciária de medidores não-invasivos de kVp. São discutidas e avaliadas as fontes de erros intrínsecos ao processo.

Palavras-chave: Calibração de medidores de kVp, Espectrometria de raios X, Fotodiodos PIN, Radiodiagnóstico, Tubos de raios X.

Abstract

This paper describes a methodology to obtain the electron acceleration potential (kVp) applied to X-rays tubes, through the determination of the end-point of the radiation energy spectrum. Measurements were made by using two silicon PIN photodiodes, namely, a Hamamatsu S3071 and a Siemens SFH206K, directly irradiated, at room temperature, so reducing the drawbacks existing in the utilization of photomultipliers and germanium detectors. The system energy calibration can be made with X- and gamma rays emitting radioactive sources, like ²⁴¹Am and ¹³³Ba, becoming the method absolute. The kVp is determined through linear regression in the spectrum final energy range, such as to provide both best fit and low standard deviation in the kVp values. Results are presented from measurements performed by using X-rays tubes connected to a three-phase generator, with additional filtration in the range 1.5 to 5.0 mm of copper, in order to minimize the contribution of low energy photons and to reduce pulse pile-up. Errors of determined kVp values are between 0.2 and 0.6 kV in the potential range of 50 to 110 kV. The above methodology was applied to check the secondary calibration of a voltage divider, which, in turn, is used in the tertiary calibration of non-invasive kVp meters. Intrinsic error sources are discussed and evaluated.

Keywords: Calibration of kVp meters, X-rays spectrometry, PIN photodiodes, Diagnostic X-rays tubes.

Introdução

Em radiologia diagnóstica são essenciais os testes de rotina de controle de qualidade, de modo a garantir uma boa qualidade nas imagens obtidas e baixa dose de radiação para pacientes, pessoal clínico e técnico. A partir desses testes, vários parâmetros são analisados, entre eles a acurácia das indicações do potencial de aceleração dos elétrons (kVp), da corrente de elétrons no tubo (mA), do tempo de acionamento (s) e do produto corrente-tempo (mAs), referentes ao equipamento de raios X utilizado. A intensidade no feixe é linearmente proporcional à corrente no tubo, e aproximadamente proporcional ao quadrado do kVp, portanto, uma pequena variação no kVp causará uma maior variação na dose absorvida comparada com uma correspondente variação em mAs. Assim, a acurácia da calibração do kVp torna-se crítica. Além disso, o aumento do kVp reduz o contraste nas imagens obtidas dificultando o diagnóstico clínico (Ranallo, 1993).

O valor do kVp medido depende da forma de onda produzida pelo gerador do equipamento. Há vários tipos de geradores que produzem a alta tensão necessária aos tubos de raios X. O princípio básico de quase todos eles é a conversão, com o auxílio de um transformador, de uma baixa tensão AC (p. ex. da rede elétrica) em uma alta tensão, que é em seguida retificada através de um circuito com diodos. A forma de onda produzida é definida pelo sistema de retificação usado, sendo os sinais mais convencionais aqueles de geradores monofásicos (de 1 ou 2 pulsos), trifásicos (de 6 e 12 pulsos), os de alta frequência, entre outros. As formas de onda das tensões e correntes de tubos não são simples sinusóides retificadas, mas variam de modo complexo com os valores de kV e mA. Isso é causado principalmente pelo efeito capacitivo dos cabos de alta tensão e as relações não-lineares entre tensão e corrente num tubo de raios X (Matsumoto *et al.*, 1991). Assim, o mesmo valor de pico da tensão pode causar diferentes efeitos radiográficos, bem como diferentes doses em pacientes, devido à ondulação percentual (ou *ripple*) da tensão do tubo, que está relacionada ao processo de retificação usado no gerador.

Diversos métodos têm sido utilizados para a medição da tensão de pico dos equipamentos de raios X. Tais métodos, em geral, são denominados **invasivos**, quando utilizam, por exemplo, divisores de tensão acoplados a osciloscópios ou monitores que fornecem leituras digitais dos valores de kVp, mA, mAs, etc.; ou **não-invasivos**, em que são empregados

espectrômetros de raios X (com detectores de NaI (TI), Si (Li), Ge (Li), ou fotodiodos), os penetrômetros (como os de Stanton e os de Ardran-Crooks, hoje pouco utilizados), as técnicas que utilizam a fluorescência de raios X, e os medidores que utilizam absorção diferencial dos raios X em um material absorvente (como o Cu) e sua detecção em dois ou mais detectores semicondutores. Há vantagens e desvantagens em cada técnica (Ranallo, 1993; Giarratano *et al.*, 1976). Na prática atual, os medidores não-invasivos têm preferência, devido a sua portabilidade, custo e praticidade. Mas, entre outras limitações, fornecem leituras que dependem da forma de onda da tensão, do *ripple*, da filtração usada e do quanto as condições de medida (mAs, posicionamento do medidor, etc.) estão em acordo com as especificações do fabricante, além de perderem a acurácia e reprodutibilidade com o tempo de uso (devido ao transporte, choques, variação de temperatura). Necessitam assim de verificação constante de sua calibração. Por outro lado, os divisores de tensão são calibrados, em geral, através de medições elétricas, que necessitam ser refeitas periodicamente. Na maior parte das vezes, isso requer o envio do equipamento ao fabricante (não raro, em outro país), procedimento este de alto custo e que demanda um tempo considerável. Para se obter medidas absolutas de kVp, empregam-se técnicas que utilizam os raios X característicos de alvos escolhidos, produzidos pela fluorescência que segue a absorção fotoelétrica dos raios X primários (Anderson *et al.*, 1986; Law *et al.*, 1989), bem como medidas espectrométricas diretas do feixe a ser analisado. Ambos os métodos consomem um tempo razoável de medição e análise de dados, mas podem apresentar maior acurácia e confiabilidade de resultados, de modo a servirem de padrão para a calibração nos demais métodos de medição, como já ocorre em alguns laboratórios no mundo.

O trabalho aqui descrito analisa a obtenção do kVp através da determinação do ponto final do espectro de energias da radiação emitida pelo tubo de raios X. Medições como esta podem ser realizadas com boa precisão com detectores que trabalham também à temperatura ambiente, como os fotodiodos de Si, que dispensam as altas tensões e os incômodos recipientes de nitrogênio líquido, além de reduzir significativamente o custo do equipamento (Aoki e Koyama, 1989). A calibração em energias do sistema pode ser feita com fontes radioativas emissoras de raios X característicos e radiação gama com energias bem conhecidas e/ou com a radiação fluorescente emitida

pelo anodo ou outros materiais, tornando o método absoluto. Em trabalho recente (Terini *et al.*, 1999), mostrou-se a excelente concordância entre os espectros de raios X obtidos com um fotodiodo PIN, após correção para a eficiência do detetor e materiais absorvedores, e aqueles calculados com base no modelo de TBC (Tucker *et al.*, 1991), baseado na teoria quântica para o bremsstrahlung.

Fica evidente, entretanto, a dependência do valor do kVp determinado com a forma de onda da tensão do tubo, a resolução em energia do espectrômetro e a acurácia de calibração. Um dos pontos críticos deste método está na determinação precisa da abscissa do ponto em que o espectro de emissão do tubo atinge o eixo das energias, calibrado em keV. O método mais usado para isso é o da regressão linear aplicada à faixa de alguns poucos keV do final do espectro (Ranallo, 1993; Giarratano *et al.*, 1976). Mas, quais os limites adequados para tal intervalo de energias? Se a faixa de energias for larga, obteremos um valor para a energia máxima com baixo erro estatístico, mas o ajuste da reta deverá ser ruim; se reduzirmos muito o intervalo final de energias, o ajuste será melhor, mas o valor da energia máxima terá grande desvio padrão, pela redução do número de pontos. No estudo aqui apresentado, discute-se a influência de cada um dos fatores mencionados e propõe-se uma maneira de encontrar valores ótimos para os limites da faixa de energia escolhida, que proporcionem, simultaneamente, um bom ajuste e um desvio padrão baixo para uma medida absoluta do kVp.

A proposta de trabalho é motivada pela necessidade de existirem procedimentos de calibração confiáveis para os instrumentos utilizados em alguns dos ensaios realizados no Laboratório de Física das Radiações do IEE-USP. Muitos destes ensaios prevêm a medição do kVp, seja como grandeza principal, seja como parâmetro de controle, para a adequação de equipamentos de raios X às exigências nacionais e internacionais. Além destes, o Laboratório realiza calibrações de dispositivos não-invasivos utilizados em rotinas de controle de qualidade e, deste modo, precisa garantir a confiabilidade de seus instrumentos utilizados como padrão.

Metodologia Experimental

Equipamentos Utilizados

Para a medição dos espectros de energia dos feixes analisados, utilizou-se um espectrômetro composto por um fotodiodo PIN de silício associado a um pré-

amplificador sensível à carga Ortec 142 IH, um amplificador linear Ortec 572, e a um analisador multicanal, que consistia num ADC Northern NS 623 conectado a um microcomputador com placa e software REGULUS (Malafronte *et al.*, 1994) para formação e análise dos espectros.

Dois fotodiodos PIN foram alternativamente utilizados como detetores: um Siemens SFH 206 K de 7,0 mm² de área ativa e um Hamamatsu S3071, de 19,6 mm². Em ambos os casos, a linearidade e a resolução em energias foram semelhantes. Foram analisados espectros de feixes de raios X produzidos por dois tubos Rörix com anodo rotativo de W/Re, em ângulos de 12°, com filtração inerente equivalente a 2,0 mm Al, conectado a um gerador trifásico (ripple ~13 %). A distância foco-detetor era de 1,20 m, com um colimador regulável de Pb a 25 cm do ponto focal.

A medição direta do kVp era feita, para comparação, com um divisor de tensão Varian modelo Dynalyzer III, com leitura através de um display digital e por meio de um osciloscópio Tektronix modelo TDS 320. As leituras do divisor foram comparadas, por sua vez, com as de medidores não-invasivos de kVp Victoreen (modelo 07-473) e RMI (modelo 230), que utilizam a absorção diferencial dos raios X em cobre e sua detecção, respectivamente, por dois e quatro fotodiodos.

Método para determinação do kVp através do espectro

As medições com o gerador trifásico foram feitas com filtração adicional entre 1,5 e 5,0 mm de Cu, visando minimizar a quantidade de fótons de menor energia e poder acumular um número maior de contagens somente no final do espectro, reduzindo a probabilidade de empilhamento de pulsos (Giarratano *et al.*, 1976). O valor da filtração adicional foi selecionado a partir da simulação computacional de espectros, feita para alguns valores de kVp, com base no modelo semi-empírico de TBC (Tucker *et al.*, 1991), visando reduzir a razão entre as contagens no final e no máximo do espectro. A Figura 1 mostra um exemplo desta simulação.

O valor numérico do potencial de pico de acionamento do equipamento de raios X é igual ao valor da abscissa no ponto em que o espectro de emissão do tubo atinge o eixo de energias (calibrado em keV). Na prática, há um fundo aproximadamente constante de contagens superposto ao espectro, e que se prolonga além dele, que deve ser levado em consideração. Assim, o método adotado compreendeu

o ajuste de duas retas, uma para o fundo e outra na região final do espectro. A abscissa do ponto correspondente à intersecção entre as duas retas fornece, depois de convertida em keV, o valor numérico do potencial de pico de acionamento do equipamento de raios X.

Neste procedimento, foram utilizados as contagens experimentais brutas (com seu desvio padrão) em função do canal. Procurou-se determinar qual o intervalo ótimo de canais a ser tomado para que a regressão linear no final do espectro fosse consistente, de modo a minimizar tanto o erro estatístico, $\sigma_{d'}$, do valor determinado do kVp quanto o parâmetro χ^2_{red} (qui-quadrado reduzido), usado para quantificar a qualidade do ajuste, desde que o valor do χ^2_{red} esteja sempre dentro do intervalo de confiança (Helene *et al.*, 1981).

Estabelece-se um limite inferior, C_{β} , próximo ao final do espectro, estima-se um valor C'_α para a abscissa do ponto final do espectro, e realiza-se a regressão linear nessa região pelo Método dos Mínimos Quadrados. Diversas iterações são feitas, variando-se C'_α até que o valor determinado pela regressão, C_α , seja aproximadamente igual a C'_α (isto é, que $|C_\alpha - C'_\alpha| < \sigma_d$). A regressão é feita considerando nunca menos do que 10 canais. Utiliza-se, então, outro valor de C_β e repete-se o processo para determinar outro C_α . Para cada valor de C_α , determina-se o respectivo desvio padrão, $\sigma_{d'}$, e o parâmetro χ^2_{red} bem como o produto

$$P_\alpha = \sigma_{d'} \cdot \chi^2_{red} \quad (1)$$

utilizado para verificar a condição ótima de ajuste pela regressão linear. As Figuras 2 (a) e (b) apresentam o comportamento da função proposta P_α , como exemplo, para os casos dos espectros mostrados nas Figuras 5 (a) e (b). De um modo geral, o valor de C_α que apresentava menor P_α correspondente era adotado, após sua conversão em keV, como o valor do kVp obtido através daquele espectro.

Calibração do Espectrômetro

Para que se possa utilizar a espectrometria dos raios X, com fotodiodos PIN, como método primário para a determinação do kVp, é fundamental o conhecimento das incertezas envolvidas. De modo geral, a acurácia da calibração irá influir fortemente sobre a precisão do valor de kVp a ser determinado. A calibração do espectrômetro foi feita a partir dos espectros medidos com fontes radioativas emissoras de raios X e gama de ^{241}Am , ^{133}Ba e ^{109}Cd , com

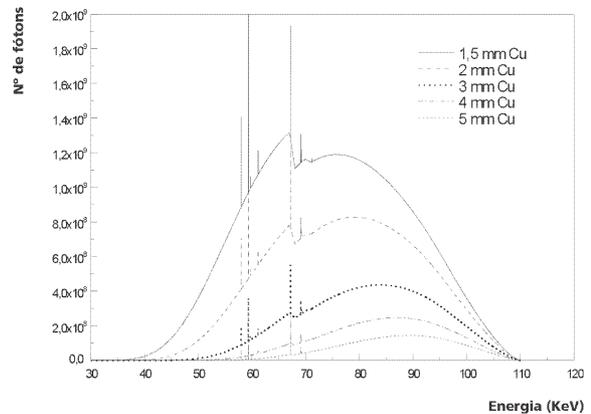


Figura 1. Espectro de raios X simulado a partir do modelo de TBC (Tucker *et al.*, 1991), para um tubo com ângulo do anodo de 12°, filtração inerente de 2 mm de Al, tensão de aceleração de 110 kV obtida com gerador trifásico com ripple de 13,4 %, utilizando-se filtrações adicionais de 1,5 a 5,0 mm de Cu.

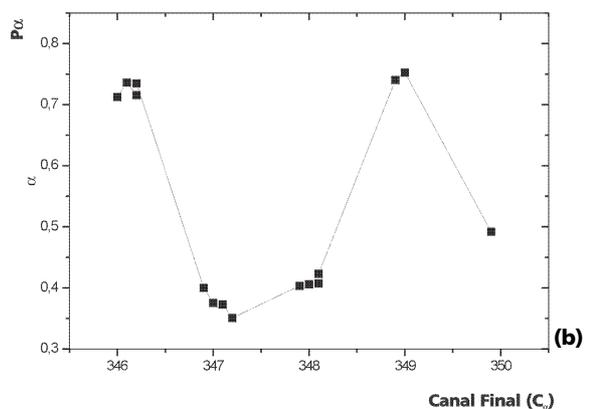
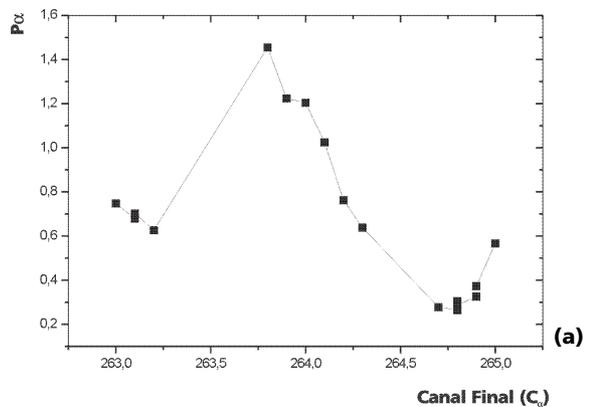


Figura 2. (a) Produto P_α (ver texto) em função do canal final (C_α) calculado pela regressão para o espectro da Figura 5 (a). O valor adotado como ponto final foi 264,77 (equivalente a 61,6 keV), correspondente ao valor mínimo do produto P_α . **(b)** Idem para o espectro da Figura 5 (b). O valor adotado neste caso como ponto final do espectro foi 347,22 (equivalente a 81,1 keV).

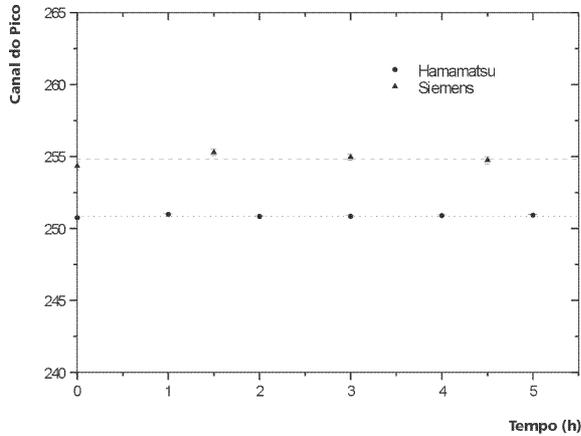


Figura 3. Posição do canal do pico referente à radiação gama de 59,54 keV, emitido pela fonte radioativa de ²⁴¹Am (IAEA), obtido em várias medidas sucessivas feitas ao longo de mais de 6 horas, com o sistema de detecção que utilizava um fotodiodo Hamamatsu S3071 ou um fotodiodo Siemens SFH206K. As linhas tracejadas e pontilhadas representam o valor médio das medidas, para cada fotodiodo.

atividades entre 10⁴ e 10⁵ Bq, produzidas pela IAEA (International Atomic Energy Agency, Genebra) e pelo IPEN/CNEN/SP (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Cidade Universitária, SP).

A energia dos fótons emitidos pelas fontes radioativas é um padrão natural, mas sua determinação envolve incertezas experimentais, em geral discriminadas nas tabelas encontradas na literatura (Firestone, 1996). No presente trabalho, tais incertezas foram desprezadas por serem muito menores do que

todas as demais (≤ 3 eV para as energias dos raios γ utilizados na calibração).

Após a aquisição dos dados referentes ao espectro medido dos raios X e gama emitido por uma dada fonte, faz-se o ajuste de uma gaussiana aos picos de interesse. A determinação do canal do ponto máximo do pico, assim, apresentará um erro que irá depender da estatística das medidas, da resolução em energia e da estabilidade do sistema de detecção. Por fim, a reta de calibração, obtida a partir dos dados por Mínimos Quadrados ponderados, apresentará erros nos coeficientes determinados, os quais irão propagar-se, somando-se ao erro embutido no processo de determinação do valor final do kVp.

No presente trabalho, tal calibração era constantemente verificada ao longo de cada sessão de medições feitas com o tubo de raios X, confirmando a linearidade (coeficiente de regressão ~0,999) e a resolução (3,5 a 4,0 keV FWHM) do sistema de detecção, na faixa de energia considerada (50 até ~120 keV), operando à temperatura ambiente.

A estabilidade do sistema detector foi verificada fazendo-se repetidas medições do espectro de raios X e γ de uma fonte de ²⁴¹Am e determinando-se o canal do máximo e a largura à meia altura do pico de 59,54 keV, ao longo de mais de 6 horas seguidas. A Figura 3 mostra tais resultados. As barras de erro foram obtidas a partir do ajuste de uma curva Gaussiana aos dados brutos experimentais, através do método dos mínimos quadrados. Por outro lado, a calibração do sistema mostrou-se, em geral, inalterada, dentro das incertezas, por vários meses.

A Tabela 1 mostra, como exemplo, a propagação

Tabela 1. Propagação dos erros na determinação do kVp, para o espectro de 110 kV nominais. Fotodiodo: S3071 da Hamamatsu

E (keV) energia do fóton emitido pela fonte radioativa	C (canal) canal do pico ^(*)	Reta de calibração por M.Q. ponderados (C = m E + b)		Abscissa do end-point do espectro C _α ^(**) (canal)	kVp (kV) tensão de acionamento do tubo
		m (canal / keV)	b (canal)		
13,946	67,75 ± 0,53				
17,751	80,31 ± 0,27				
20,784	95,61 ± 0,32				
22,163	101,27 ± 0,12	4,179	6,57	469,5	110,78
26,345	115,58 ± 0,28	±	±	±	±
30,973	135,59 ± 0,05	0,003	0,11	1,5	0,49
34,987	152,78 ± 0,24				
59,537	255,51 ± 0,11				
80,997	346,75 ± 0,27				

^(*) Determinado através do ajuste de Gaussianas aos picos dos espectros das fontes radioativas, com o auxílio do programa REGULUS. ^(**) Ver tópico anterior

dos erros parciais na determinação do kVp do espectro de 110 kV nominais, usando fotodiodo Hamamatsu. Todas as medições foram feitas na mesma sessão experimental.

Medição do kVp com os Medidores Não-Invasivos.

Para comparação de resultados, foram utilizados dois medidores de kVp não-invasivos: um medidor Victoreen (Victoreen, LLC. – 6000 Cochran Road – Cleveland, OH 44139-3395), modelo 07-473, com 2 fotodiodos, que mede o potencial de pico aplicado ao tubo de raios X na faixa de 60 a 120 kV, com acurácia nominal de 3 %; e um medidor RMI (Gammex RMI – 2500 West Beltline Hwy at University Avenue P.O. Box 620327 – Middleton, Wisconsin, 53562-0327, USA), modelo 230, que utiliza a atenuação diferencial em cobre e sua detecção em 4 fotodiodos (Ranallo, 1993), e mede tensões de aceleração de 50 a 165 kV, com acurácia nominal de 2 %.

Nas medições, foram utilizadas condições de referência prescritas pelo fabricante, sendo, assim, diferentes daquelas usadas com os fotodiodos. Para o medidor Victoreen, a filtração total (inerente e adicional) foi de 4 mm Al e a distância foco-detetor era variada entre 45 e 180 cm, em função do valor do kVp. Com o medidor RMI, a filtração total foi de 3 mm Al, a distância de medição era 60 cm e o valor do mAs foi variado para cada kVp selecionado. A leitura de ambos era obtida com tempos de exposição da ordem de 1 s.

Devido à impossibilidade de medições simultâneas com fotodiodo e medidores não-invasivos, foi feita uma comparação indireta, nas medidas com o tubo Rörrix, através dos valores medidos com o divisor de tensão acoplado a um display digital e a um osciloscópio.

cópio, em condições de ripple semelhante. As curvas de calibração de cada medidor, em relação às medidas feitas com divisor de tensão, aparecem nas Figuras 4 (a) e (b). Nesse procedimento, a calibração do divisor de tensão através dos valores do kVp obtidos pelos espectros, permite, por sua vez, uma calibração dos medidores não-invasivos.

Resultados Obtidos

A Tabela 2 apresenta a filtração adicional utilizada em cada medição, bem como os resultados obtidos através do espectrômetro com um fotodiodo PIN Hamamatsu S3071 (calibrado), o divisor de tensão e os medidores com 2 e 4 fotodiodos. Fica evidente que os resultados espectrométricos podem, então, ser usados para avaliar a qualidade da calibração dos demais medidores.

As Figuras 5 (a), (b) e (c) mostram os espectros brutos medidos de 60 kV, 80 kV e 110 kV. Nas mesmas figuras, aparecem também os respectivos espectros de energia originais, produzidos após a passagem do feixe do tubo pelos filtros adicionais, obtidos através de um processo de correção dos espectros medidos que leva em conta, entre outras coisas, a eficiência do espectrômetro para absorção total de energia, a atenuação dos raios X no ar e no invólucro do fotodiodo e o espalhamento Compton (Terini *et al.*, 1999). A comparação permite confirmar, dentro da margem de erros, os valores determinados para o potencial de aceleração dos elétrons.

As Figuras 6 (a), (b) e (c) mostram a região de maior energia dos espectros brutos anteriores, bem como a melhor reta de regressão ajustada para cada caso (com o menor valor de P_{α}).

A Tabela 3 mostra os valores obtidos, nas mesmas condições experimentais, com um fotodiodo da

Tabela 2. Valores de kVp obtidos experimentalmente

Filtração adicional do tubo (mm Cu)	kVp (kV)				
	Fotodiodo Hamamatsu*	Divisor de tensão		Medidor	
		Display digital	Osciloscópio	Victoreen **	Medidor RMI **
1,5	51,6 ± 0,2	50,1 ± 0,8	49,5 ± 1,0	-	49,8 ± 1,5
2,0	61,6 ± 0,2	60,0 ± 0,6	58,6 ± 1,2	-	59,6 ± 1,5
2,5	71,1 ± 0,2	69,7 ± 0,6	68,6 ± 1,4	62,9 ± 5,9	69,2 ± 1,6
3,0	81,1 ± 0,2	79,8 ± 0,7	79,5 ± 1,0	75,1 ± 6,2	79,1 ± 1,8
3,5	90,0 ± 0,3	90,0 ± 0,5	89,5 ± 0,7	87,5 ± 6,6	89,2 ± 1,8
5,0	98,0 ± 0,6	99,4 ± 1,3	99,1 ± 1,4	98,9 ± 7,1	98,4 ± 2,3
4,5	110,8 ± 0,5	110,2 ± 0,9	110,7 ± 0,8	112,0 ± 7,4	109,0 ± 2,2

(*) São apresentados valores do kVp com os erros finais, conforme o exemplo considerado na Tabela 1. Os valores de kVp foram obtidos a partir de regressão linear das contagens da região de maiores energias do espectro, conforme critério descrito acima. (**) Valores obtidos a partir das curvas de calibração dos medidores Victoreen e RMI (v. Figs. 4 (a) e (b))

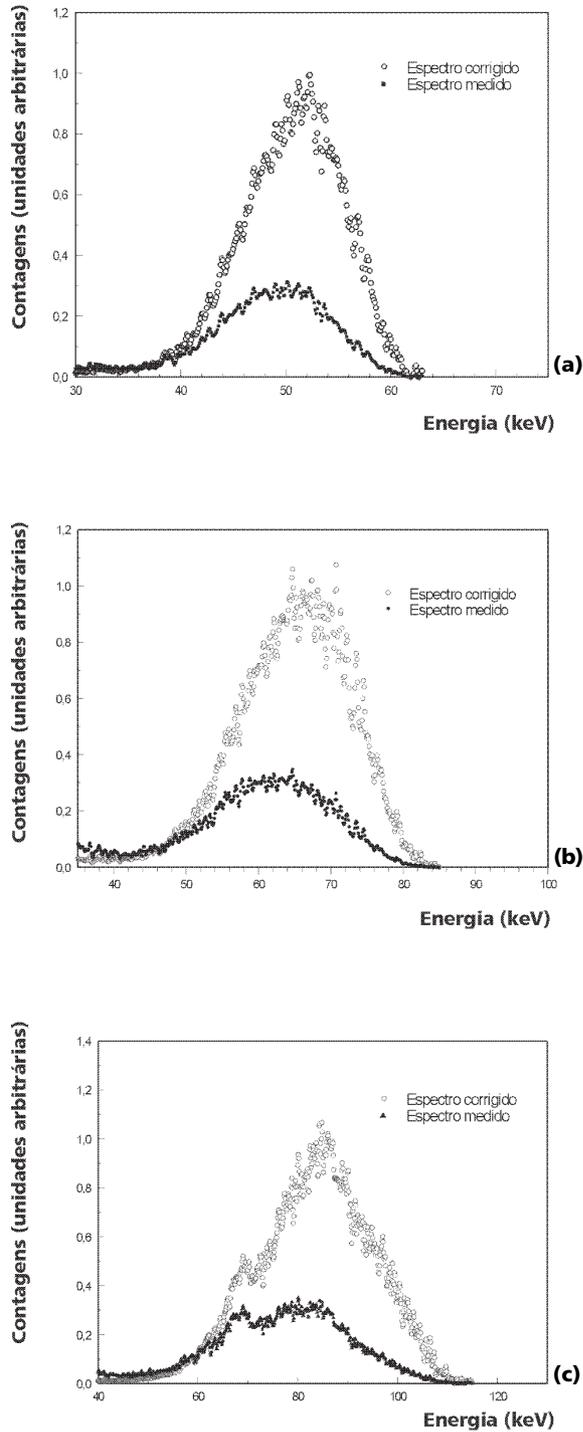


Figura 5. (a) Espectros bruto e corrigido (v. texto) obtido com o fotodiodo Hamamatsu a partir de feixe produzido por tubo acionado com equipamento trifásico, com tensão aplicada de 60 kV nominais e filtração adicional de 2,0 mm de Cu. (b) O mesmo para tensão aplicada de 80 kV nominais e filtração adicional de 3,0 mm de Cu. (c) O mesmo para tensão aplicada de 110 kV nominais e filtração adicional de 4,5 mm de Cu.

Hamamatsu S3071 e com um Siemens SFH206K. Os valores são comparados com um divisor de tensão através do display digital. Em ambos os casos a concordância é muito boa, porém, devido à maior área sensível (19,6 mm²) do modelo S3071 da Hamamatsu, em relação ao modelo SFH206K da Siemens (7,0 mm²), ele é mais rápido na aquisição de dados.

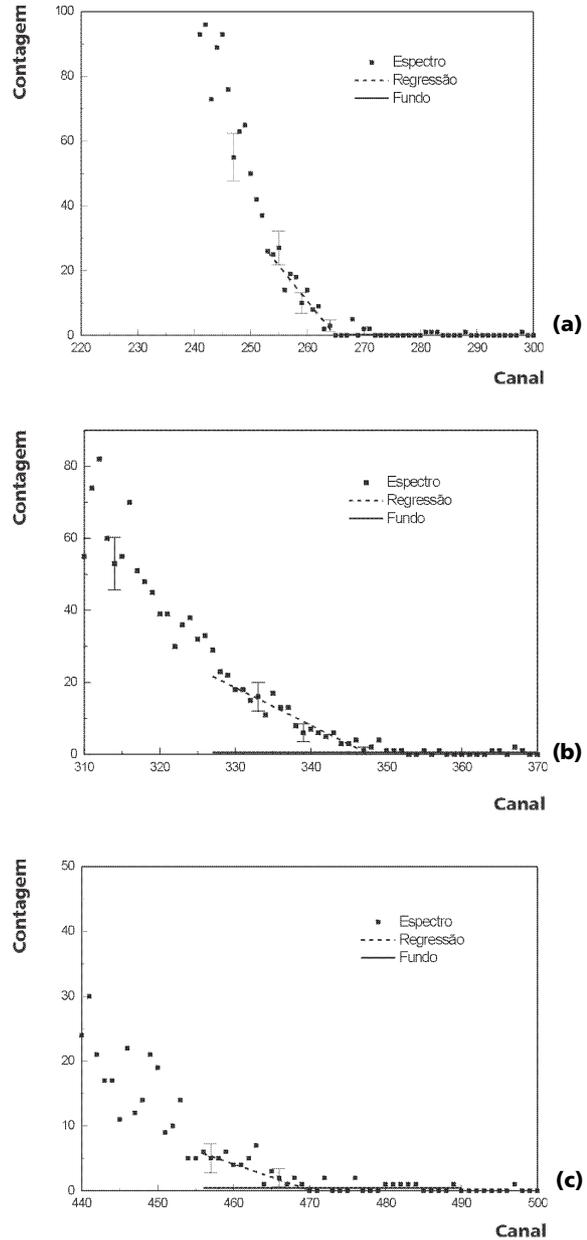


Figura 6. (a) Região final do espectro da Fig. 5(a), com as retas de regressão linear e do fundo obtidas pelo método dos mínimos quadrados, conforme descrito no texto. (b) O mesmo para o espectro da Fig. 5(b). (c) O mesmo para o espectro da Fig. 5(c).

Tabela 3. Valores de kVp obtidos com os fotodiodos Hamamatsu e Siemens

kVp (kV)			
Divisor de tensão	Fotodiodo Hamamatsu	Divisor de tensão	Fotodiodo Siemens
50,41 ± 0,50	50,94 ± 0,16	50,07 ± 0,46	51,49 ± 0,31
59,36 ± 0,42	60,08 ± 0,16	59,82 ± 0,36	61,09 ± 0,30
70,75 ± 0,57	71,43 ± 0,20	69,98 ± 0,56	70,98 ± 0,35
80,08 ± 0,53	80,64 ± 0,20	80,23 ± 0,56	80,73 ± 0,39
89,91 ± 0,70	90,45 ± 0,26	90,41 ± 0,64	90,64 ± 0,45
99,74 ± 0,53	100,42 ± 0,35	99,99 ± 0,54	100,41 ± 0,47
110,33 ± 0,63	109,95 ± 0,37	110,07 ± 0,59	110,09 ± 0,55

Conclusões

Os resultados demonstrados confirmam a possibilidade do uso da espectrometria dos raios X de tubos com a utilização de fotodiodos PIN, à temperatura ambiente ou, de preferência, resfriados, como método primário para determinação do kVp. A acurácia do valor determinado dependerá do cuidado com a calibração em energia, da estabilidade e da resolução do equipamento detector e do método estatístico utilizado para a determinação da energia final do espectro medido.

Cuidados devem ser tomados para manter baixa a perda de contagens devida ao tempo morto do sistema de detecção (no caso do presente trabalho, a perda foi sempre < 10 %), de modo a minimizar a chance de empilhamento de pulsos, que deformam a parte final dos espectros, prejudicando a determinação do kVp.

A espectrometria será melhor utilizada em laboratório, por exemplo, na verificação da calibração secundária de divisores de tensão, utilizados, por sua vez, na calibração terciária de medidores não-invasivos que serão aplicados em campo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. Otaviano A. M. Helene pelas sugestões e discussões relativas ao procedimento estatístico para determinação do kVp; a D. Soga pelo auxílio no desenvolvimento da rotina computacional de determinação do kVp; a Denise Yanikian Nersissian, Marco Aurélio Guedes Pereira e Edson Pereira Barbosa, do IEE-USP, pelo apoio geral ao desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- Anderson, D.W., Moore, G.J., Lester P.D. (1986), "Absolute kVp Calibration using Characteristic X-Ray Yields", *Medical Physics*, v. 13, n. 5, p. 663-666.
- Aoki, K., Koyama, M. (1989), "Measurement of Diagnostic X-Ray Spectra using a Silicon Photodiode", *Medical Physics*, v. 16, n. 4, p. 529-536.
- Firestone, R. B. (1996), *Table of Isotopes*, New York: John Wiley & Sons, 5th ed.
- Giarratano, J.C., Waggener, R. G., Hevezi, J.M., Shalek, R.J. (1976), "Comparison of Voltage - Divider, Modified Ardran - Crooks Cassete, and Ge (Li) Spectrometer Methods to determine the Peak kilovoltage (kVp) of Diagnostic X-Ray Units, *Medical Physics*, v. 3, n. 3, p. 142-147.
- Helene, O.A.M., Vanin, V.R. (1981), *Tratamento Estatístico de Dados em Física Experimental*, São Paulo: Edgard Blücher.
- Law, J., Faulkner, K., Smith, S. (1989), "Measurement of X-Ray Tube Potential in the Mammographic Region", *Physics in Medicine and Biology*, v. 34, p. 717-725.
- Malafronte, A.A., Passaro, A., Radovich, M.A. "Regulus: Software para aquisição e análise de espectros de radiação gama e X, versão 1.1", [material não publicado], IF-USP, São Paulo, 1994.
- Matsumoto, M., Kubota, H., Hayashi, H., Kanamori, H. (1991), "Effects of Voltage Ripple and Current Mode on Diagnostic X-Rays Spectra and Exposures", *Medical Physics*, v. 18, n. 5, p. 921-927.
- Ranallo, F.N. (1993), *The Noninvasive Measurement of X-Ray Tube Potencial*, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, Madison, Wisconsin, USA.
- Terini, R. A., Costa, P.R., Furquim, T. A. C., Herdade, S.B. (1999), "Measurements of Discrete and Continuous X - ray Spectra with a Photodiode at Room Temperature", *Applied Radiation and Isotopes*, v. 50, n. 2, p. 343-353.
- Tucker, D.M., Barnes, G.T., Chakraborty, D.P. (1991), "Semiempirical Model for Generating Tungsten Target X-Ray Speetra", *Medical Physics*, v. 18, n. 2, p. 211-218.