

# Desenvolvimento de Pré-Amplificador Sensível à Carga para Aplicação em Sistema de Detecção de Raios Gama

## Development of Charge Sensitive Preamplifier for Application in Gamma Rays Detection System

Jose Carlos da Cunha<sup>1</sup>, Arno Hereem de Oliveira<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)-Departamento de Engenharia Nuclear (DEN)

<sup>1</sup>zecarlosdacunha@yahoo.com.br, <sup>2</sup>arnohereem@ufmg.com.br

*Resumo – Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de pré-amplificação, discriminação e formatação de pulso, para adequar o pulso de carga proveniente do tubo fotomultiplicador (PMT), com um ganho de conversão de fotoelétrons em elétrons relativamente pequeno ( $10^5 - 10^6$ ) utilizados para detectar eletroluminescência em detectores cintiladores. Utilizando essa configuração, o pré-amplificador pode ser montado parte na base da válvula fotomultiplicadora, parte na unidade de contagem. Construído dessa maneira, a eletrônica incorporada ao detector apresenta poucos componentes, proporcionando a construção de detectores de reduzidas dimensões. Nesta tarefa física, foram medidos a quantidade e tempo de distribuição da carga que chega do tubo fotomultiplicador em uma ampla faixa dinâmica de um sistema de detecção de radiação gama. Também foi realizado o processamento para a forma de pulso digitalizado, limitando fatores como empilhamento de pulsos, déficit balístico e recombinação de carga. A capacidade de discriminação da forma de pulso encontrada permite implementar métodos de apuramento da resolução espectral e em energia nos parâmetros requeridos para aplicações na espectrometria e tomografia nuclear em ambientes não climatizados.*

*Palavras-chave:* Pré-amplificador. Nuclear. Tomografia.

*Abstract – This paper develops a system of pre-amplification, discrimination and pulse formatting, adjusting the pulse of charge from the photomultiplier tube (PMT) with a conversion gain photoemission electron relatively small ( $10^5-10^6$ ) used to detect electroluminescence in scintillator detectors. Using this configuration, the preamplifier can be mounted on the base portion of the valve photomultiplier, part of the unit count. Built this way, the electronics incorporated into the detector has fewer components, allowing the construction of detectors of small size. In this physical task, we measured the amount and time distribution of*

*electronic charge coming from the photomultiplier tube in a wide dynamic range of a system for detecting gamma radiation. Was also performed for processing the form of digitized pulse, limiting factors such as pull-up, ballistic deficit and charge recombination. The ability to pulse shape discrimination found allows you to implement methods to improved spectral resolution and the energy parameters for applications in nuclear spectroscopy and tomography in non-air conditioned.*

*Keywords:* Pre-amplification. Nuclear. Tomography.

### I INTRODUÇÃO

Imagens podem ser geradas de diversas maneiras. De forma similar o processamento de imagens é realizado por diferentes métodos: ópticos ou digitais. O desenvolvimento científico e o tecnológico, juntamente com o avanço da computação, proporcionaram o aumento do número de técnicas de diagnóstico por imagem. Uma delas é a tomografia, que é uma técnica de imagem ativa (KAK; SLANEY, 2001).

As técnicas de imagens ativas resultam das propriedades de várias formas de energia radiante provenientes de fontes exógenas, capazes de propagar através da matéria e de fornecerem informações anatômicas e/ou fisiológicas, sendo o tomógrafo um exemplo de aplicação. A técnica de tomografia requer sinais de impulso elétrico de formatação quase-ideal, rejeição e correção do empilhamento de impulsos, discriminação de tempo de subida, controle de largura do impulso e elevada relação sinal/ruído. Todos



esses fatores devem possibilitar a obtenção de melhor resolução espectral de medidas sensíveis por posição e de energia.

Na medição sensível por posição, a variável associada a essa propriedade é a posição espacial de um fóton ou partícula no detector. A caracterização da medição depende do ponto de interseção da radiação com o detector ao longo de um plano focal, definidos por um sistema de coordenadas cartesianas (x,y,z). A medição pode ser dimensional (coordenada **x**), bi-dimensional (coordenadas **x** e **y**), cujo processo é descrito como imagem, como é o caso da radiografia-X e tri-dimensional (coordenadas x,y,z), como a tomografia computadorizada (RUSS, 2007). Todas as aplicações têm em comum a tecnologia de detecção de radiação nuclear, que processadas pela eletrônica associada, possibilitam a obtenção de imagens e medições espectrométricas, diferenciando-se nos critérios de processamento de dados. Sistemas de detecção de radiação envolvendo detectores sensíveis à posição que utilizam eletrodos coletores de carga (fotomultiplicadora) são utilizados em diversas aplicações, desde simples contadores e sistemas de aquisição de imagens, até experimentos mais complexos, como a tomografia. Essas aplicações exigem, inicialmente, módulos de eletrônica analógica, que realizam um pré-processamento no sinal vindo do detector. Após a etapa de pré-processamento, o sinal é enviado a um sistema de aquisição de dados, constituído muitas vezes de um Analisador-Multicanal (AHMED, 2007).

Um pré-amplificador é o primeiro dispositivo eletrônico linear dessa cadeia de processamento de sinais de detecção da radiação nuclear. Apesar do seu nome, o pré-amplificador não atua como um amplificador linear propriamente dito, devido a seu baixo ganho; atua como uma interface entre o detector de radiação e o sistema eletrônico de processamento de pulso, suprimindo a necessidade de acoplamento de impedâncias entre os sistemas de detecção e de

processamento de sinal, bem como minimizando os níveis de ruídos gerados no sensor e transdutores de energia. Aplicável tanto em sistemas de processamento analógicos como em sistemas digitais, trata-se de uma das mais importantes aplicações da eletrônica na espectrometria e tomografia nuclear (KNOOL, 1989). Por outro lado, a natureza do tempo aleatório, associada à ocorrência de radiação, bem como as imperfeições físicas de seu processo de detecção, levam a uma série de efeitos conhecidos que contribuem para a degradação do espectro de energia medido. Há uma série de procedimentos que extinguem esses efeitos indesejáveis. No entanto, procedimentos como a rejeição e correção de empilhamento de pulsos, *déficit* balístico, correção de erros estatísticos, restauração de linha base, formatação e discriminação de pulsos, implicam na introdução de novas unidades eletrônicas analógicas e, por conseguinte, tornam-se fontes de degradação da relação sinal/ruído.

Este trabalho apresenta o projeto da construção de um pré-amplificador discriminador sensível à carga, adequado para aplicações de medições sensíveis por posição, envolvendo detecção de radiação gama, o que possibilita a obtenção de ótima resolução espectral e uma elevada relação sinal/ruído. Utilizando essa configuração, pode-se obter ordenamento de pulsos, independente da amplitude dos pulsos gerados no detector, possibilitando precisão no processo de calibração e redução do tempo morto; podendo ainda ser montado parte na base da válvula fotomultiplicadora e parte na unidade de contagem reduzindo a quantidade de eletrônica associada.

## II PRÉ-AMPLIFICADOR DISCRIMINADOR

Para a maioria das aplicações de espectroscopia, os parâmetros de interesse são a quantidade de carga e/ou o tempo de ocorrência do evento, que tem uma duração de  $10^{-9}$  a  $10^{-5}$ s (KNOOL, 1989). O pré-amplificador sensível à carga (FIG.1) pode



processar um ou ambos os parâmetros de interesse descritos.

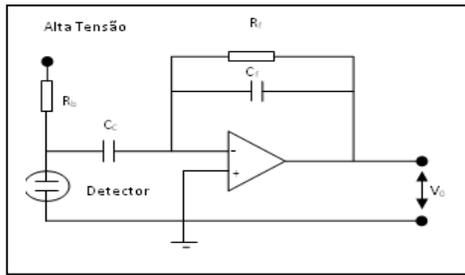


Figura 1. Um pré-amplificador sensível à carga de ultra baixo ruído para aplicação em detectores de radiação. Figura modificada de Knoll (1989).

Quando ligado a um sensor (foto-multiplicadora), o pré-amplificador, mostrado na FIG. 1, fornece um pulso de tensão de saída com uma amplitude máxima proporcional à carga elétrica do sinal de entrada (detector). Uma vez que a carga é integrada pelo capacitor de realimentação ( $C_f$ ), a medição de carga é independente da capacitância da fonte ( $C_s$ ), ou seja, o ganho do amplificador não é sensível a uma mudança na capacitância do detector e, no caso ideal, o tempo de subida do pulso de saída é igual à largura de pulso de corrente (carga) do detector. A utilização de técnicas de amplificação diferencial (amplificador operacional) reduz substancialmente o ruído (SKOOG, 2002). O ruído de maneira comum aparece em fase tanto na entrada inversora quanto na não-inversora do amplificador diferencial e é subtraído em grande parte pelo circuito pré-amplificador. Como medida complementar para amenizar o nível de ruído de saída são usados circuitos integradores e filtros analógicos ou digitais, adicionado ao pré-amplificador (KNOLL, 1989). A eficácia dos filtros depende da capacitância do detector, que é a capacitância de entrada do pré-amplificador. Se a capacitância de entrada aumenta, diminui a impedância e, em consequência, o ruído aumenta. A técnica empregada para aumentar a relação sinal-ruído neste projeto consiste em formatar o sinal de saída do pré-amplificador, utilizando circuitos especiais RC-CR. O objetivo da formatação é diminuir a duração do pulso de saída do pré-

amplificador, a fim de reduzir o efeito de empilhamento. A aplicação desta técnica é caracterizada por filtro de deconvolução (SMITH, 1997), que, como descrito, desempenha duas funções essenciais: otimiza a resolução em energia e minimiza o risco de sobreposição (empilhamento) entre sucessivos pulsos, caracterizando a discriminação de pulsos.

Também é função do pré-amplificador, apresentado neste trabalho, terminar a capacitância rapidamente e, portanto, maximizar a relação sinal/ruído (KNOLL, 1989). Isso fará com que ele atue como um acoplador (casamento) de impedâncias, representando uma alta impedância ao detector, para minimizar o seu carregamento, enquanto possui baixa impedância de saída para distribuir o sinal pelo sistema de processamento, com a finalidade de evitar a distorção e atenuação do pulso. Basicamente, pode-se estabelecer que, se o detector tem uma grande e estável capacitância, requer o uso de um pré-amplificador sensível à tensão com impedância de entrada resistiva para a integração do pulso de carga em pulso de tensão. Se o detector possui uma pequena capacitância variável em função das condições de operação, requer para a integração citada um amplificador sensível à carga com impedância de entrada capacitiva. Atualmente é generalizado o uso do amplificador sensível à carga em sistemas de espectroscopia, medições de posição em aplicações imagiológicas.

No pré-amplificador desenvolvido, impulsos são digitalizados imediatamente após o processo de pré-amplificação, e seguidamente transferidos para um *buffer*, para processamento em tempo real (SMITH, 1997). A abordagem do processamento digital dos impulsos permite reduzir significativamente a natureza aleatória do processo de decaimento radioativo mediante a inclusão dessas unidades de memória, nas quais os impulsos são cumulativamente guardados. Durante a ocorrência de um impulso no detector e sua transferência ao *buffer*, considerando como

intervalo de tempo ( $t_1$ ), o sistema está insensível a novos eventos. Contudo, durante o intervalo de tempo subsequente ( $t_2$ ), considerado como intervalo de tempo correspondente à aquisição e processamento do impulso, o pré-amplificador está apto a receber novos impulsos. Dessa maneira, a taxa de contagens medida ( $m$ ) pode ser dada em função da taxa real de eventos ( $n$ ) radioativos no detector.

Na sua forma mais simplificada, o pré-amplificador digital possui a estrutura descrita anteriormente e apresentada na FIG. 2. Esta abordagem permite o armazenamento de um impulso, enquanto o anterior inicia o processo no sistema de detecção, o que contribui para a redução do tempo morto (AHMED, 2007).

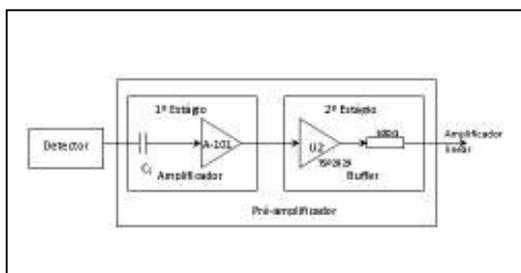


Figura 2. Diagrama em blocos de um pré-amplificador sensível à carga, discriminador e formatador de pulso.

### III PARTE EXPERIMENTAL

Procurou-se desenvolver um circuito pré-amplificador com realimentação negativa de ganho controlado e, como conseqüência, obter uma maior linearidade (redução da distorção) e alta relação sinal/ruído, eliminando comportamentos indesejados, como a oscilação. O sistema eletrônico usado neste trabalho tem como principal componente o pré-amplificador sensível à carga modelo A-101, fabricado pela Amptek. A escolha do amplificador operacional A-101- Amptek, que compõe a estrutura de pré-amplificação, se deu pela sua blindagem a radiações gama, a estabilidade de suas características eletrônicas em ambientes não climatizados e dimensões reduzidas. O circuito eletrônico construído é composto de dois estágios, como mostra a FIG. 3. O primeiro estágio é composto pelo

amplificador, com a função operacional de produzir na sua saída uma tensão proporcional à quantidade acumulada de carga elétrica na sua entrada, atuando também como discriminador e formatador de pulso.

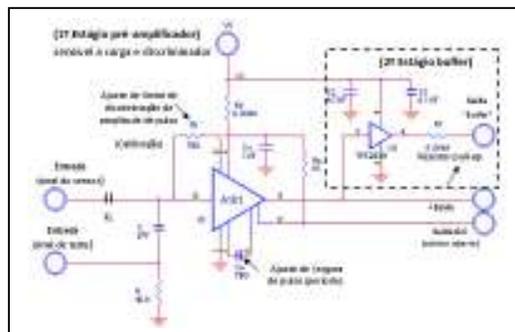


Figura 3. Diagrama do circuito eletrônico do pré-amplificador sensível a carga e discriminador de pulso, adaptado de Amptek Datasheet (2006).

Um limitador (grampeador) de nível de amplitude de pulsos e de transições de polaridade oposta é feito pelo amplificador na função discriminador. Essa função é importante, uma vez que o estágio subsequente em um sistema de medição de energia e/ou de reconstrução de imagem é composto por um circuito digitalizador (Conversor Analógico Digital-DAC), que necessita de um sinal estável em altura (nível constante) e de pulsos temporais de curta duração. Esse tempo é limitado pelas variações (dispersões) na posição espacial da interação local da radiação gama com o detector cintilador. No entanto, a possibilidade do detector resolver dois pulsos (empilhamento de pulsos) será comparável ao tempo de dispersão. O pulso de saída do pré-amplificador sofrerá um aumento de tempo de cerca de  $0,1 \mu s$ , em razão desse fenômeno na interação, tempo esse controlado pelo ajuste de largura do pulso.

O segundo estágio tem o amplificador operacional TPS2829, fabricado pela *Texas Inst.* como componente principal. Atua como circuito separador e com a função *buffer*. A função separadora é usada para evitar que um circuito ativado (contador e amplificador linear, por exemplo) influa no circuito ativador (pré-amplificador). A função *buffer* é um

comutador de pulsos de alta velocidade, que tem uma memória temporária para equalizar a diferença entre a velocidade em que os pulsos são recebidos na entrada do pré-amplificador, com a velocidade de processamento de sinais em circuitos subseqüentes, o que minimiza o tempo morto e empilhamento de impulsos. O sinal na saída deste conjunto tem valor e forma suficiente para ser enviado a um contador ou circuito multicanal.

Para as medidas do nível de ruído e resolução energética, o pré-amplificador foi conectado a um conjunto detector constituído por um cristal de NaL(Tl) cúbico de 5mm de aresta, acoplado com graxa de silicone a uma válvula fotomultiplicadora modelo 802-6- da Canberra, com 1000 V negativos de polarização. A resolução espacial foi medida utilizando duas fontes de  $^{137}\text{Cs}$ , separadas 25mm uma da outra, isoladas da sonda por uma placa de plástico de 10mm de espessura para simular um meio de dispersão. O desempenho do pré-amplificador foi avaliado conectando-o a um detector de NaL(Tl) acoplado a uma tubo fotomultiplicador, e a um sistema de aquisição de dados composto por um computador P4D-66(486), Gateway-2000 com 16 Mbits de memória operando com software Genie 2000, especial para construção de histograma e contagem de fótons em medidas de energia de radiação gama. Os experimentos realizados neste trabalho utilizam uma combinação de módulos padrões NIM (*Nuclear Instrumentation Module*), TTL e CMOS que são interconectados e ajustados de modo a fornecer a informação, tendo como objetivo a verificação do comportamento operacional e ajustes do circuito pré-amplificador discriminador, em função de suas respostas a sinais de excitação de entrada.

#### IV RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na FIG. 4, é mostrado o pré-amplificador desenvolvido, conectado a um conjunto detector pronto para ser inserido no tubo metálico de revestimento que constitui a

válvula fotomultiplicadora. A montagem e a posterior inserção dentro de um tubo metálico tornaram o conjunto mecanicamente mais robusto e propiciaram a desejada isolação elétrica com o meio ambiente. Os procedimentos usados para avaliação de desempenho do pré-amplificador sensitivo à carga e discriminados consistem em simular, através de um gerador de pulsos de características conhecida, sinais que seriam originados em um detector de radiação. A resposta do pré-amplificador, como essa excitação, permite avaliar parâmetros fundamentais como: tempo de subida, tempo de descida, duração do pulso, amplitude, linearidade, resposta em frequência, forma e estabilidade. Os resultados de desempenho possibilitam a definição da aplicação e do comportamento dinâmico do circuito, quando em regime de operação. As excitações padronizadas usadas para identificação e análise de desempenho do circuito pré-amplificador estão demonstradas na Tabela 1 e FIG. 5, que apresentam as curvas da altura e discriminação de pulso para cada um dos sinais de excitação de entrada testados. Essas curvas estão normalizadas e padronizadas de forma que se possa, com o controle de ganho do pré-amplificador e no número de contagens radioativas, inferir para que a curva obtida na saída do pré-amplificador apresente um padrão de calibração em função da resolução energética. Que tem por referência o limiar de sensibilidade do dispositivo A-101 (amplificador operacional) referenciado para uma entrada de  $1,6 \times 10^{-13}$  Coulomb (equivalente a  $10^6$  elétrons) e periodicidade de 4 MHz, de acordo com especificação do catálogo do fabricante AMPETK.



Figura 4. Montagem do pré-amplificador conectado ao conjunto detector para ser inserido no tubo de revestimento que constitui a fotomultiplicadora

**Tabela 1**

CARACTERÍSTICA DE RESPOSTA DA SAÍDA DISCRIMINADA (A- 101) A FUNÇÕES PADRÃO COMO SINAL DE ENTRADA

Referência Figura 5	Sinal de Entrada	
	Característica	Especificação
(a)	Senoidal	Frequência – 500 KHZ Amplitude – 200m Vp-p
(b)	Onda Quadrada	Frequência – 500 KHZ Amplitude – 200 mVp-p Tempo Subida < 13 ns Tempo descida <13 ns
(c)	Onda Dente de Serra	Frequência – 100 KHZ Amplitude – 200 mVp-p
(d)	Impulso	Frequência – 9 MHz Amplitude – 200 mVp-p Larg.Pulso – 130 ns
Referência Figura 5	Sinal de Saída	
	Característica	Especificação
(a)	Sem Definição	Não Responde
(b)	Pulso Lógico (Responde á transição de nível)	Frequência - 500 KHz Amplitude - 5 Vrms Larg.Pulso(1) ≅ 250 ns Larg.Pulso(2) ≅ 150 ns
(c)	Pulso Lógico (Responde á transição de nível)	Frequência - 100 KHz Amplitude - 5 Vrms Larg.Pulso ≅ 250 ns
(d)	Pulso Lógico (Responde ao pulso)	Frequência - 1 MHz Amplitude – 5 Vrms Larg.Pulso ≅ 250 ns Tempo Subida<14 ns Tempo Descida<20 ns

Os resultados (FIG.5) foram obtidos de duas formas diferentes. Na primeira, utilizou-se um gerador de pulsos para verificação de comportamento dinâmico eletrônico e ajustes, como já descrito.

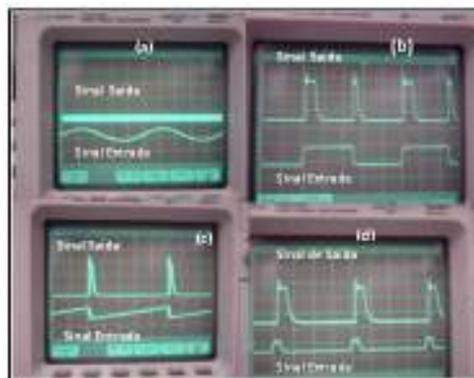


Figura 5. (a) Resposta a um sinal senoidal. (b) Resposta a uma forma de onda quadrada. (c) Resposta a uma forma de onda dente de serra. (d) Resposta a um impulso.

A segunda realiza aquisição real (FIG.6) de dados de uma amostra radioativa de <sup>137</sup>Cs, utilizando válvula fotomultiplicadora e cristal NaL(Tl), permitindo analisar o comportamento do pré-amplificador excitado por um sinal de natureza aleatória e obtenção de espectro gama para a amostra radioativa.

Como pode ser observado na FIG. 6(a), os pulsos obtidos caracterizam os sinais de entrada provenientes de uma válvula fotomultiplicadora em um sistema de medição de detecção radioativa de uma fonte de <sup>137</sup>Cs, compondo um esquema de medição para testar o projeto do pré-amplificador em uma situação real.

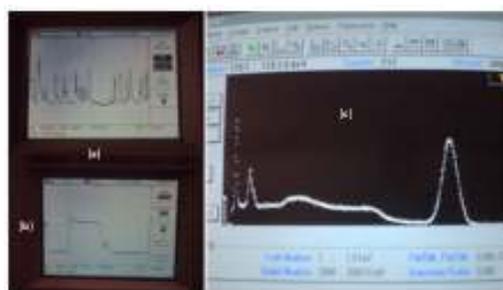


Figura 6. (a) Sinal de saída da fotomultiplicadora (entrada pré-amplificador). (b) Sinal de saída discriminado.(c) Espectro gama obtido de uma fonte radioativa <sup>137</sup>Cs

Os valores e forma de pulso, obtidos na saída do pré-amplificador, como mostrado na FIG. 6(b), formam a construção do histograma, resultando em um espectro de energia por altura de pulso discriminado. A FIG. 6(c) apresenta a resposta espectral obtida durante os testes periódicos, em que é possível determinar o fator de conversão no qual o conjunto detector (cristal cintilador NaL(Tl), válvula fotomultiplicadora e pré-amplificador) está operando, e proceder os ajustes de calibração através do resistor **Rt** e capacitor **Cw** representados no circuito da FIG. 3, anteriormente demonstrado. Tem-se como resultado a calibração de precisão feita no laboratório da UFMG, que propicia uso do pré-amplificador em espectrometria, como descrito pelos dados contido na Tabela 2.

**Tabela 2**  
PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DO PRÉ-AMPLIFICADOR

Descrição	Parâmetros Utilizados
Número de canais utilizados	2.048
Tensão de saída do pré-amplificador	Ajustada em 5,0 VDC
Tensão encontrada por canal	$(5.000,00 \text{ mV} \div 2.048 = 2,4414062 \text{ mV} / \text{canal})$
Pico de energia do $^{137}\text{Cs}$	662 KeV (observado no canal 772, FIG. 6 (c))
Tensão de calibração de entrada	Nº de canal (772) $\times$ tensão por canal (2,4414062 mV)
Resultado Tensão de calibração de entrada	1884,76558mV

Portanto, o circuito pré-amplificador discriminador foi ajustado, especificamente no sistema de teste do laboratório de Engenharia Nuclear UFMG, para um limiar de tensão de entrada de 1884,76558 mV. Ajusta-se esse feito através do resistor **Rt**, medindo-se com eficiência e alta resolução a energia de pico do  $^{137}\text{Cs}$ . O capacitor **Cw** ajusta a largura do pulso

de saída em função dos parâmetros requeridos pela aplicabilidade do sistema de medição. O circuito apresentado proporciona facilidade de calibração e pode ser facilmente adaptado a vários sistemas de medição.

## V CONCLUSÕES

O desempenho verificado, associado ao custo acessível, permite o início da modernização de equipamentos de laboratórios de instrumentação nuclear a um abaixo custo, possibilitando o desenvolvimento de sistema de aquisição de dados nucleares, com aplicação, por exemplo, em pesquisas de sistemas de tomografia nuclear, devido à boa precisão e adaptabilidade proporcionada pelos baixos valores de erro nos resultados obtidos. Conseguiu-se, assim, uma correta calibração, fundamental em sistemas de espectrometria.

Para os resultados encontrados, é importante destacar a largura de pulso de saída menor que 250 ns, o tempo de subida de pulso menor que 13 ns e a resolução entre dois pulsos menor que 150 ns. Esse curtíssimo tempo minimiza o tempo morto relativo às dispersões, que ocorrem na variação espacial da interação da energia com a matéria, uma vez que, a capacidade do detector de resolver dois pulsos é comparável ao tempo de dispersão. Isto minimiza o efeito de empilhamento de pulso e possibilita medidas sensíveis por posição, necessárias ao estudo de parâmetros físicos em processos de reconstrução de imagem.

É também importante destacar que a resolução temporal encontrada permitiu o ordenamento dos pulsos discriminados da saída do pré-amplificador sensível à aleatoriedade das cargas produzidas pelo processo fotoelétrico. Esse ordenamento é realizado pelo estágio do circuito *buffer* e possibilita a interface com amplificadores rápidos utilizados na digitalização dos sinais, bem como minimiza o erro estatístico na contagem de pulso.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à UFMG pelo auxílio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

AHMED, Syed Naeem. **Physics and engineering of radiation detection.** Amsterdam; Boston: Academic Press, 2007. 764 p.

KAK, A. C; SLANEY M., "**Principles of Computerized Tomographic Imaging.**" published by the SIAM (Society of Industrial and Applied Mathematics) Press, 2001.

KNOLL G.F.. **Radiation Detection and Measurement.** 2ª ed. USA: John Wiley & Sons Press, 1989. 754 p.

RUSS, John C. **The image processing handbook.** 5th. ed. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, c2007. 817 p.

SKOOG, Douglas A.; HOLLER, F. James; NIEMAN, Timothy A. **Princípios de análise instrumental.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002. xv, 836 p.

SMITH, Steven W **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing.** Hard Cover, 1999. 722 p.

