

Detector para Raios X de baixa energia, usando diodo PIN fotovoltaico

Flávio Tadeu van der Laan¹

Volnei Borges²

Jorge Rudolfo Silva Zabadal³

Resumo

Uma nova geração de detectores semicondutores para radiação ionizante encontra-se disponível no mercado para aplicações tanto na indústria quanto na área da saúde. Entretanto, é necessário comparar esses sistemas de detecção quanto à relação custo-benefício. Os atuais detectores cintiladores e os de GeLi utilizados para radiação X, devido ao seu alto custo e dimensões, inviabilizam seu uso em equipamentos portáteis e em dosimetria pessoal de rotina. Por outro lado, os detectores a gás existentes são ineficientes para detectar radiação X. Dessa forma, neste trabalho, é proposto o desenvolvimento de um novo tipo de sensor para medir radiação X, baseado num diodo fotovoltaico PIN de pequena dimensão, que pode ser operado à temperatura ambiente com área aproximada de 100 mm². Um amplificador de alto desempenho é também desenvolvido, e medidas são apresentadas, para a resposta do sensor em função da alta-tensão e da corrente de tubo de Raios X.

Palavras-chave: Detectores de radiação. Sensor fotovoltaico. Monitoração individual.

Abstract

A new generation of semiconductor detectors for ionizing radiation is now available in the market for industrial and medical applications. However, it is necessary to compare these detection systems to the ratio of cost and performance. The current scintillator detectors and the GeLi used for X-radiation, due to its high cost and dimensions, become its use unfeasible in portable equipments and daily personal dosimeters. On the other hand, the existing gas-based detectors are not suitable to detect X-radiation. Thus, on this study, it is proposed the development of a new kind of sensor to measure X-radiation, based on a small photovoltaic PIN diode, which can be operated at room temperature, whose surface area is about 100 mm². A high-performance amplifier is also developed and measurements are presented to a sensor response because of the high voltage and the X-ray tube current.

Keywords: Radiation detector. Photovoltaic detector. Personal dosimetry.

¹ Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil e professor do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS. E-mail: ftvd@ufrgs.br

² Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS e professor do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS. E-mail: borges@ufrgs.br

³ Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS e professor do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS. E-mail: jorgers.zabadal@gmail.com

1 Introdução

Atualmente, os detectores de radiações ionizantes, de alta eficiência na detecção de Raios X, são cintiladores sólidos e semicondutores. Esses detectores são amplamente empregados em diversas áreas, onde se torna necessário o monitoramento da emissão de Raios X, isto é, na pesquisa com radiações ionizantes, na espectrometria de Raios X e no monitoramento *in situ* de doses individuais e de áreas sujeitas à radiação (FERNANDES; APPOLONI; ANDRELLO, 2005).

Materiais semicondutores monocristalinos, como o silício, o germânio e os compostos III-V e II-VI têm sido amplamente estudados, desde a década de 50, com o objetivo de serem utilizados como sensores de radiação. Esses materiais atuam como detectores devido ao seu tamanho reduzido, resistência mecânica e resposta para medidas tanto de dose como da taxa de radiação. A grande demanda por esses materiais vem ampliando as pesquisas para a obtenção, em larga escala, de semicondutores monocristalinos, para detectores de radiação, na expectativa de se obter materiais simples e de baixo custo (CORTESE; PEREIRA; HAMADA, 2005).

Estudos mostram que fototransistores bipolares também podem ser utilizados como detectores de radiação ionizante, tanto em feixes de Raios X de baixa energia, quanto em feixes de Raios X de alta energia. A aplicação desses detectores, em altas energias, apresenta a desvantagem de perda de sensibilidade à radiação. Porém, quando comparados aos dosímetros termoluminescentes, tanto os fotodiodos quanto os fototransistores apresentam leitura em tempo real, o que representa uma grande vantagem em dosimetria das radiações (SILVA *et al.*, 2007).

Nos detectores cintiladores, a conversão de luz, transformada em corrente elétrica, é feita pela utilização de fotomultiplicadoras, que são dispositivos acoplados opticamente ao elemento cintilador. Os detectores cinti-

ladores necessitam de temperaturas muito baixas, quando em operação, como, por exemplo, os de GeLi, fazem uso de nitrogênio líquido e de um sistema de amplificação de sinal, cuja complexidade define a sensibilidade da detecção. Além disso, existem no mercado os detectores que operam em temperaturas ambiente, não necessitando de baixas temperaturas, como os construídos de compostos semicondutores.

Os detectores semicondutores, também denominados de detectores de estado sólido, são constituídos de materiais semicondutores de alta pureza, com introdução controlada de determinadas impurezas, denominadas de dopantes. Nesses detectores, a radiação faz com que os elétrons que se situam na banda de valência passem para a banda de condução, fazendo, assim, surgir uma corrente elétrica ou uma diferença de potencial (ddp).

Nos sistemas de monitoração individual, são utilizados, principalmente, dosímetros termoluminescentes, que necessitam de filtros adequados, para cada valor de energia e tipo de radiação que será monitorada. Esses dosímetros são bastante práticos e amplamente utilizados para indivíduos ocupacionalmente expostos.

Fotodiodos, utilizados em dosimetria das radiações ionizantes, tanto individual como de área, têm a vantagem de apresentar a resposta linear com a dose de radiação e um erro de baixo percentual (menor do que 4 %) frente às variações no ângulo de incidência da radiação. Além disso, o fotodiodo produz uma corrente elétrica quase 18.000 vezes maior do que a produzida em uma câmara de ionização com um cintilador de mesmo volume. Portanto, esses dispositivos são uma alternativa bastante promissora para a fabricação de detectores de radiação ionizante, com peso e tamanho reduzidos, além de baixa potência elétrica, o que reduz o consumo de energia.

Nesse contexto, são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento

de um detector para Raios X de baixa energia que utiliza um diodo PIN encapsulado (VAN DER LAAN, 1996).

Os ensaios para verificar o funcionamento do detector foram feitos com um aparelho de Raios X, com energias no intervalo de 40 keV a 100 keV e correntes de tubo de 40 mA a 100 mA. Os resultados das medidas foram comparadas com as obtidas em um sistema padrão, utilizando detectores cintiladores de NaI.

2 Materiais e métodos

O sistema principal de detecção foi construído com um diodo fotovoltaico tipo PIN (junção PN com camada intrínseca) e um amplificador, conforme mostrado na figura 1. A camada intrínseca de Si, entre as camadas de silício dopado tipo p e tipo n, apresenta alta seção de choque para radiação X de baixa energia. Em termos operacionais, a radiação ionizante que incide no sensor, provoca condução do diodo, produzindo uma variação de tensão que é proporcional à intensidade de radiação incidente. A partir daí, com um amplificador de ganho da ordem de 10^8 , retira-se um sinal na ordem de mVolts, com ruído na ordem de μ Volts. Esse sinal, então, é repassado ao computador ou a um *data logger* para registro e/ou processamento.

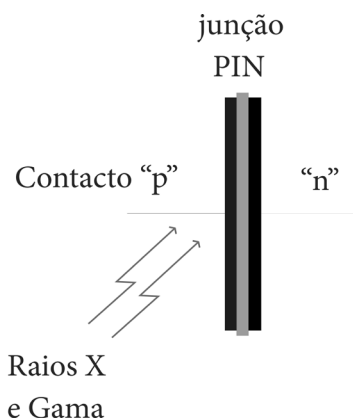


Figura 1 - Junção PIN, diodo fotovoltaico
Fonte: Os autores (2012).

Diodos PIN já são amplamente empregados nos tomógrafos computadorizados como sensores para a leitura pontual de Raios X. A imagem em duas dimensões de um tecido, fornecida pelos tomógrafos, é construída, a partir dos Raios X detectados por esses diodos.

Atualmente, existem disponíveis no mercado vários tipos de sensores como o denominado CZT (Cd, Zn, Te). Estes sensores semicondutores comerciais apresentam alta seção de choque para fótons ionizantes, mas preço muito elevado, chegando a ser 20 vezes superior ao sistema desenvolvido neste trabalho.

Para amplificar o sinal do diodo PIN, foi utilizado um amplificador operacional, para garantir que a resposta do fotodiodo não seja afetada pelo ruído. O amplificador para um diodo PIN, de $10 \times 10 \text{ mm}^2$ de janela, foi programado para um ganho na ordem de 10^8 .

Quadro 1- Parâmetros técnicos dos amplificadores OPA128 e LF357

Características	OPA 128	LF 357
Ruído	92 nV/f	12 nV/f
Bias (polarização)	75 fA	30 pA
Offset (saída 0 V)	140 μ V	1 mV
Drift (estabilidade)	5 μ V/ $^{\circ}$ C	3 mV/ $^{\circ}$ C
CMRR (ruído)	128 db	100 db

Fonte: Os autores (2012).

Inicialmente, foi testado o amplificador operacional LF 357, disponível no mercado. Apesar de todos os ajustes feitos com o circuito, com o cuidado de reduzir ao máximo as possibilidades de instabilidade, como o ajuste do *offset*, através de potenciômetro recomendado pelo fabricante, não foi obtido o padrão zero de saída do amplificador LF 357. Diante disso, foi necessário fazer a substituição do amplificador operacional, por outro que fosse menos sensível a ruídos e mais estável.

Dessa forma, optou-se pela utilização de um operacional de alta confiabilidade, o OPA 128, que apresenta características superiores ao LF 357, conforme pode ser verificado no quadro 1. Com o uso do amplificador operacional OPA 128, conseguiu-se zerar a saída do amplificador e mantê-la estável com um baixíssimo nível de ruído.

O circuito amplificador, integrante do sistema de detecção, cujo esquema é mostrado na figura 2, é alimentado por duas baterias tipo alcalina de 9,0 Volts. O potenciômetro, colocado entre os pinos 1 e 5, do circuito integrado, tem por objetivo realizar o ajuste de *offset*, ou seja, zerar a saída.

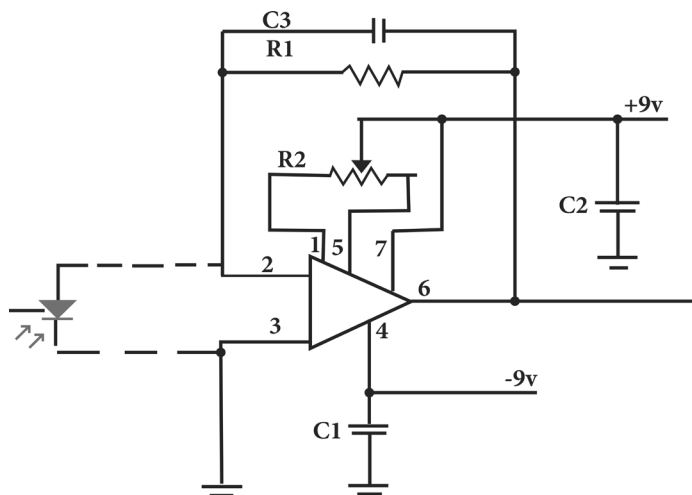


Figura 2 - Esquema representativo do circuito amplificador
Fonte: Os autores (2012).

O diodo fotovoltaico foi inserido em um pequeno recipiente, mantendo-o isolado, garantindo, dessa forma, total bloqueio da entrada de luz visível, conforme mostrado na figura 3.



Figura 3 - Diodo fotovoltaico inserido em uma cápsula para bloqueio de luz visível
Fonte: Os autores (2012).

3 Resultados

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Radiações do Grupo de Estudos Nucleares (GENUC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

As medidas foram obtidas irradiando o sistema sensor com Raios X, provenientes de um tubo fixo, feixe colimado, com tamanho de campo e filtração constantes. O tubo foi posicionado a uma distância de 0,1 m do elemento sensor. O tempo de exposição foi ajustado para 1,0 s, sendo mantido constante, durante todos os ensaios, assim como toda a geometria experimental que permaneceu inalterada durante as medidas.

As variações na intensidade de radiação incidente foram obtidas, a partir das variações

na energia do feixe (ajuste na alta-tensão do tubo) e na corrente de tubo, o que resultou em variações na tensão de saída do circuito amplificador, como se esperava. As tensões de saída do sensor foram medidas com um voltímetro digital.

O quadro 2 mostra os parâmetros operacionais utilizados nos ensaios e as tensões obtidas como respostas as intensidades do feixe de radiação incidente. Pode-se verificar que as tensões na saída do detector aumentam, à medida que aumentam as altas-tensões aplicadas no tubo, para cada conjunto de correntes de tubo constantes, indicando uma relação crescente do sinal de saída do sensor com o aumento de alta-tensão de tubo, sendo mantidos constantes os outros parâmetros operacionais do equipamento de Raios X.

Quadro 2 - Tensões de saída do sensor em função da intensidade do feixe de Raios X, obtida com variações na alta-tensão e corrente de tubo

Corrente de tubo (mA)	40			60			80			100		
Alta-tensão de tubo (kV)	100	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40
Tensão saída do sensor (V)	2,12	1,64	1,10	1,59	1,37	1,05	1,19	1,02	0,85	0,80	0,63	0,47

Fonte: Os autores (2012).

Os resultados obtidos para as medidas de tensões de saída do sensor apresentam linearidade para cada corrente de tubo aplicada, para alta-tensão de tubo de 40 kV a 100 kV e correntes de tubo de 40 mA a 100 mA, como mostrado nas figuras de 4 a 7.

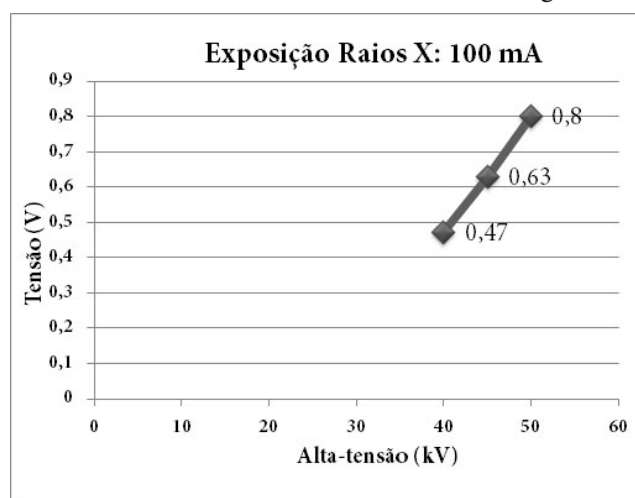


Figura 4 - Tensões de saída do sensor para corrente de tubo de 100 mA e altas-tensões de 40 kV, 45 kV e 50 kV
Fonte: Os autores (2012).

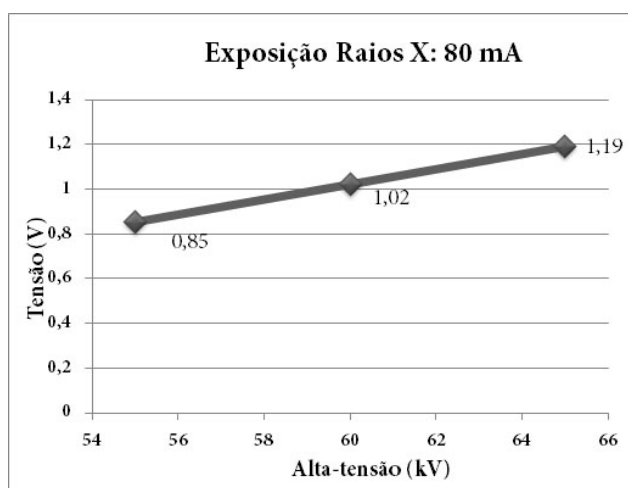


Figura 6 - Tensões de saída do sensor para corrente de tubo de 60 mA e altas-tensões de 70 kV, 75 kV e 80 kV
Fonte: Os autores (2012).

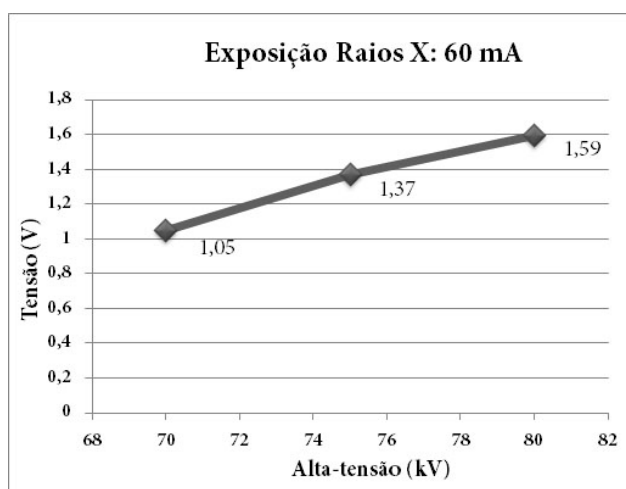


Figura 5 - Tensões de saída do sensor para corrente de tubo de 80 mA e altas-tensões de 55 kV, 60 kV e 65 kV
Fonte: Os autores (2012).

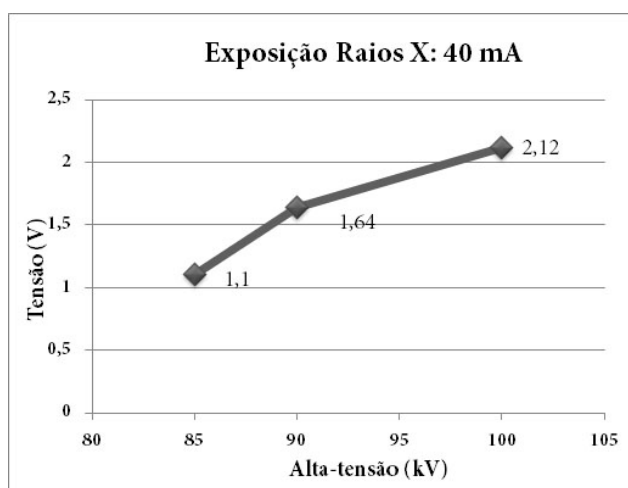


Figura 7 - Tensões de saída do sensor para corrente de tubo de 40 mA e altas-tensões de 85 kV, 90 kV e 100 kV
Fonte: Os autores (2012).

Para verificar, separadamente, a influência da alta-tensão e da corrente de tubo na intensidade relativa do feixe e verificar a dependência da resposta do sensor, foi utilizada a relação (1) (BUSHONG, 2008), onde a distância e o tempo foram mantidos constantes durante o ensaio.

$$I = \frac{V^2it}{d^2} \quad (1)$$

Onde,
- I= intensidade relativa do feixe de Raios X que atinge o sensor,

- V= alta-tensão do tubo, kV,
- i= corrente de tubo, mA,
- t= tempo, s e
- d= distância do tubo ao sensor, m.

A sensibilidade da resposta do sensor, em função somente da energia (alta-tensão) do feixe de Raios X, foi obtida através da relação (1). Para este estudo, a tensão de saída do sensor foi normalizada, fazendo o quociente da tensão de saída pela corrente de tubo, como mostrado no quadro 3.

Quadro 3 - Tensão de saída do sensor normalizada pela corrente de tubo, sendo função somente da alta-tensão aplicada

Alta-tensão (kV)	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	100
Tensão normalizada do sensor (10 ³ V/mA)	4,7	6,3	8,0	10,6	12,8	14,9	17,5	22,8	26,5	27,5	41,0	53,0

Fonte: Os autores (2012).

Observa-se que, à medida que aumenta a energia do feixe de Raios X, aumenta o sinal normalizado de saída do sensor, como era esperado, pois aumenta a intensidade do feixe de radiação.

O estudo da sensibilidade da resposta do sensor, em função somente da corrente de tubo, foi realizado, utilizando a equação (1). Para este estudo, o sinal de saída do sensor foi normalizado, fazendo o quociente

do sinal de saída pela alta-tensão elevada ao quadrado. Dessa forma, a dependência é devida somente à corrente aplicada no tubo de Raios X. O quadro 4 mostra os resultados da tensão de saída do sensor normalizada pela alta-tensão (energia do feixe de Raios X). Como foram realizadas três medidas de tensão de saída do sensor para cada corrente de tubo, o quadro 4 mostra, também, o valor da tensão média normalizada do sensor.

Quadro 4 - Tensão de saída do sensor normalizada pela alta-tensão aplicada ao tubo de Raios X, sendo função somente da corrente de tubo

Corrente de tubo (mA)	40			60			80			100		
Tensão normalizada do sensor (10 ⁴ V/ kV ²)	2,12	2,02	1,52	2,48	2,43	2,14	2,81	2,83	2,81	3,2	3,1	2,94
Tensão média normalizada do sensor (10 ⁴ V/ kV ²)	1,89			2,35			2,82			3,08		

Fonte: Os autores (2012).

Os resultados mostrados no quadro 4 apresentam que, à medida que aumenta a corrente de tubo de Raios X, aumenta o sinal normalizado de saída do sensor, como deveria ser esperado, pois aumenta a intensidade do feixe de radiação.

As respostas do sensor, em termos de dependência da energia e da corrente de tubo, mostram que o mesmo é adequado para ser utilizado como medidor de radiação.

Em resumo, os resultados obtidos para o sistema sensor e amplificador desenvolvido, indicam que esse sistema é adequado para ser utilizado como detector para medidas de radiação X de baixa energia. O sistema mostrou resposta compatível com a intensidade da radiação utilizada nos testes realizados. Além do baixo custo de produção, o sistema apresenta linearidade para correntes de tubo constantes com tensões variadas e possui dimensão compatível para ser utilizado como monitor individual.

4 Conclusão e perspectiva

O sistema desenvolvido mostrou-se adequado para a detecção e a monitoração da exposição de Raios X em áreas controladas ou para uso pessoal. Apresentou viabilidade para a construção de sensores eletrônicos portáteis, como dosímetros com leitura direta, em tempo real, podendo vir a ser um substituto adequado para as canetas dosimétricas, porém, mecanicamente, mais resistente e a um custo menor. Nos dosímetros comerciais e sistemas similares do tipo termoluminescentes (TLD) ou aqueles que utilizam filme fotográfico, as leituras da dose de exposição são realizadas, posteriormente, em equipamentos específicos para tal, não são realizadas em tempo real como permite o sistema desenvolvido neste trabalho.

Referências

BUSHONG, S. C. **Radiologic Science for Technologists: physics, biology and protection**. Canadá: Moaby Elsevier, 2008.

CORTESE, V. C.; PEREIRA, M. C. C.; HAMADA, M. M. Crescimento de cristais baseados em Iodeto de Césio (CsI) para aplicação como detectores de radiação. 2005. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, ago. 28 - set. 2, 2005, Santos, SP. **Anais...** São Paulo: ABEN, 2005.

FERNANDES, J. S.; APPOLONI, C. R.; ANDRELLO, A. C. Aplicabilidade de um sistema portátil de espectrometria de Raios X e raios gama in situ. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, ago. 28 - set. 2, 2005, Santos, SP. **Anais...** São Paulo: ABEN, 2005.

SILVA, J. O. *et al.* Avaliação da resposta de fototransistores bipolares SMT como detectores em feixes de fótons de megavoltagem gerados por um acelerador linear. **Scientia Plena**, v. 3, n. 7, p. 297-300, 2007. Disponível em: <<http://www.scientiaplenu.org.br/ojs/index.php/sp/article/viewFile/661/326>>. Acesso em: 25 nov. 2011.

VAN DER LAAN, F. **Medidor não invasivo de alta tensão, tempo e exposição em aparelhos de Raios X**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/18276/000199783.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2011.