

Implementação de um Instrumento para Medição da Intensidade de Fótons na Faixa da Mamografia

Implementation of an Instrument for Measuring Photon Intensity in the Mammography Range

Mariana Andreazzi¹, Fabian Castro¹, Jorge Blanco¹, Aparecido A. de Carvalho¹, Marcelo A. A. Sanches¹

¹Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira/Departamento de Engenharia Elétrica, LIEB/Unesp, Ilha Solteira, Brasil

Resumo

Um instrumento para medir a intensidade (fluxo de energia) de fótons na faixa da mamografia (22 a 33 kVp) foi implementado. O instrumento consiste em uma câmara piroelétrica, acoplando um sensor piroelétrico de metaniobato de chumbo (PbNb_2O_6) e o circuito condicionador de sinal. O material utilizado para desenvolver a câmara foi o polímero láctico. O circuito condicionador de sinal é um conversor de corrente em tensão de alta sensibilidade. A intensidade da radiação foi determinada a partir da taxa de exposição utilizando uma câmara de ionização a gás. Uma simulação da emissão do espectro do molibdênio, o elemento comumente utilizado nos alvos de raios X dos mamógrafos, na faixa de 22 a 33 kVp, usando o sensor piroelétrico foi realizada utilizando o *software* DTSA-II e comparada a emissão do mesmo espectro utilizando o detector padrão do *software*, o sensor Si(Li). Os resultados mostram que a resposta do instrumento implementado é linear com a tensão do tubo de raios X e com a intensidade da radiação e, a emissão do espectro do molibdênio pode ser muito bem representada pelo instrumento piroelétrico.

Palavras-chave: sensor piroelétrico; fluência de energia; dosimetria; mamografia.

Abstract

An instrument to measure the intensity (energy flow rate) of photons in the mammography range (22 to 33 kVp) was implemented. The instrument consists of a pyroelectric chamber, housing a pyroelectric sensor of lead methaniobate (PbNb_2O_6) and its signal conditioning circuit. The material used to construct the pyroelectric chamber was lactic acid polyacid. The signal conditioning circuit is a high sensitivity current-voltage converter. The intensity of the radiation was determined from the rate of exposure measured with an ionization chamber. A simulation of the emission spectrum for molybdenum, the most used element in mammography X-ray tubes, in the range of 22 to 33 kVp, using the pyroelectric sensor, was performed with the DTSA-II software and compared with the emission of the same spectrum using the Si (Li) sensor, the software standard. The results show that the response of the implemented instrument is linear with the X-ray tube voltage and the intensity of the radiation, and that the emission spectrum of molybdenum can be determined with a pyroelectric instrument.

Keywords: pyroelectric sensor; energy fluence rate; dosimetry; mammography.

1. Introdução

Os detectores piroelétricos absorvem radiação incidente em uma superfície, geralmente escura, feita de material ferroelétrico capaz de gerar uma variação em sua polarização, produzindo, assim, uma tensão piroelétrica nos eletrodos presentes em suas faces. Para a confecção de um detector piroelétrico, devem ser consideradas características térmicas e elétricas de seus componentes¹.

Materiais piroelétricos possuem um único eixo de polarização e são capazes de produzir um momento dipolo elétrico devido a uma variação homogênea em sua temperatura. A variação do dipolo elétrico gera corrente elétrica, que é proporcional à variação de temperatura sofrida pelo cristal piroelétrico, e não à variação de temperatura da fonte emissora. Assim, detectores piroelétricos não são detectores termoeletrônicos, como os termopares².

Utilizando niobato de lítio como detector piroelétrico, foi possível determinar a intensidade de raios X na faixa da mamografia, com energias de 22 a 36 kV. O instrumento utilizado consiste de um detector piroelétrico, com um circuito conversor corrente-tensão de baixo ruído e alta sensibilidade

envolto em uma câmara de alumínio para reduzir fontes externas de ruídos³.

Sensores piroelétricos de niobato de lítio e tantalato de lítio, foram utilizados para detectar fótons de raios X com energias de 11 a 15 keV, correspondente à faixa de 22 a 36 kV. O dispositivo é capaz de mensurar intensidades de 0,025 mW/m² com uma precisão acima de 99%. O equipamento mostrou-se capaz de atuar no ambiente clínico, com interferências e vibrações eletromagnéticas de alto padrão e seu desempenho não foi alterado após submetido à uma exposição de 140 roentgens⁴.

Para controle de qualidade do equipamento de mamografia, o mamógrafo deve ser monitorado quanto a exatidão e reprodutibilidade do indicador de tensão do tubo (kVp) anualmente, segundo a portaria 453/98 do Ministério da Saúde, tendo o limite de exatidão ± 2 kVp e a reprodutibilidade deve estar dentro de uma faixa de erro de $\pm 10\%$ ⁵.

A proposta deste trabalho é a implementação de um detector piroelétrico capaz de mensurar a intensidade de fótons de raios X na faixa da mamografia, de 22 a 33 kVp, utilizando o metaniobato de chumbo e um

modelo de câmara piroelétrica feita em políacido láctico (PLA) na impressora 3-D.

Pretende-se, também, comparar a simulação do espectro de molibdênio produzido pelo sensor piroelétrico com o gerado pelo detector de Si(Li).

2. Materiais e Métodos

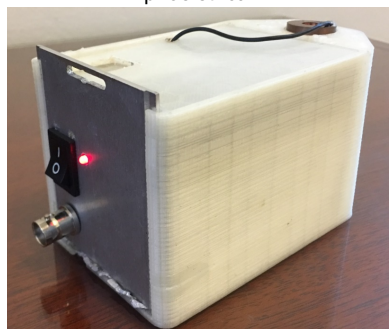
O instrumento piroelétrico implementado é constituído por um sensor piroelétrico, um circuito de condicionamento de sinais e uma câmara, que aloja o sensor e seu circuito de condicionamento de sinais.

A câmara desenvolvida foi confeccionada em políacido láctico (PLA) na impressora 3D do Departamento de Física e Química da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, possui com um circuito de condicionamento de sinais confeccionado no Departamento de Engenharia Elétrica da mesma Universidade.

A impressora 3D, modelo CL1, da empresa Cliever, possui área de impressão de 124 cm² e um bico de extrusão de 3,0 mm. O material PLA foi adquirido da empresa fornecedora da impressora.

A Figura 1 ilustra a visão lateral-posterior da câmara piroelétrica.

Figura 1 – Parte lateral-posterior da estrutura da câmara piroelétrica.



Fonte: O autor (2019).

O sensor piroelétrico fica acoplado entre os eletrodos da câmara, sendo o eletrodo inferior, localizado abaixo do sensor, feito de cobre, com 2,5 cm de diâmetro e maciço. O eletrodo que fica acima do sensor é um anel cujo diâmetro externo é de 2,5 cm e o diâmetro interno de 1,0 cm, também confeccionado em cobre.

Na Figura 2 mostra-se uma foto da parede posterior e o interior da câmara piroelétrica, onde foram colocados a placa do circuito de condicionamento de sinais, uma chapa de chumbo para blindar o circuito e as baterias para alimentação do circuito.

O sensor piroelétrico utilizado, de metaniobato de chumbo, com 12,6 mm de diâmetro e 1 mm de espessura, foi produzido pela empresa dinamarquesa Ferroperm Piezoceramics (modelo PZ35). O mesmo foi colocado a uma distância de 43 cm do tubo de radiação em todas as medições realizadas, sendo a distância do tubo à bandeja de 56 cm e a distância da pastilha à bandeja igual a 13 cm. A temperatura da sala bem como a disposição dos equipamentos, foram mantidas constantes em todas as medições.

O circuito eletrônico de condicionamento de sinais consiste em um conversor corrente-tensão de alta sensibilidade⁷.

Figura 2 – Disposição dos componentes dentro da câmara piroelétrica: barreira de chumbo (1), baterias (2) e suporte para placa eletrônica (3).



Fonte: Andreazzi (2018)⁶.

Foi implementado na plataforma Arduino um programa visando a aquisição dos sinais de saída do instrumento piroelétrico. O programa foi feito na plataforma LabView®. O osciloscópio utilizado durante as medições é um aparelho da Agilent Technologies, Modelo DSO-X 3024A, 4GSa/s de 200 MHz com 4 canais.

Para a realização das medições, foi utilizado o mamógrafo da empresa GE, modelo Senographe – DMR+, produzido em março de 2003. É um equipamento semi-automático que possui filtros de molibdênio, ródio e alumínio com faixa de operação de 24 a 32 kV e de 40 a 100 mA.

O equipamento de referência utilizado para analisar os dados coletados foi a câmara de ionização a gás da empresa Radcal Corporation.

Para medir a reprodutibilidade do kVp foram utilizados o eletrômetro Modelo 4083 N/S 43-0201 e o detector modelo Accu kV 40x5-MO, N/S 48-1976. Para medir a dose absorvida, foram utilizados o eletrômetro Modelo 9010 N/S 90-2561, rastreabilidade PTB: 60053-14, o detector Modelo 10x5-6M N/S 7850, rastreabilidade PTB: 60060-14 e o adaptador Modelo 9060 N/S 99-1925, todos da marca Radcal.

Uma simulação da resposta do instrumento piroelétrico para o espectro de produção dos raios X em um alvo de molibdênio foi realizada em um programa de microanálise quantitativa de raios X que utiliza o método de Monte Carlo. A faixa de análise do espectro foi a da mamografia, com energias de 22 a 33 kVp, sendo realizada as medições a cada valor de kVp.

O programa utilizado para a simulação é o DTSA-II, versão Jupiter, revisado em 06 de novembro de 2017 e desenvolvido pelo NIST – *National Institute of Standards and Technology*, dos Estados Unidos, disponível em sua página na internet.

As análises são baseadas em padrões, tornando os resultados mais confiáveis. O *software* é de fácil uso e possui uma orientação passo-a-passo dos parâmetros a serem determinados. Primeiramente foram definidos os parâmetros do sensor piroelétrico como: composição química (fração em massa e

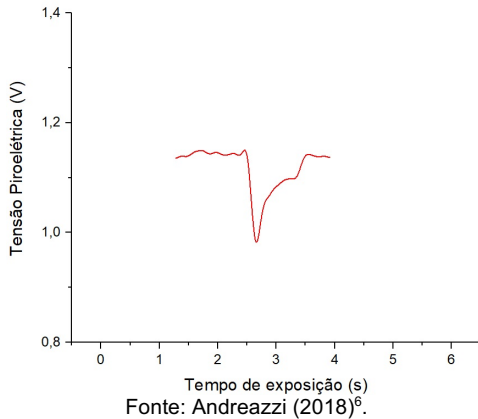
densidades), área de sensibilidade, faixa de energia, angulação em relação ao tubo e distância do sensor à ampola.

Posteriormente o sensor foi calibrado seguindo o modelo de referência do *software* e, então foram feitas as simulações dos espectros na faixa de 22 a 33 kVp utilizando 80 mAs. As mesmas simulações foram feitas utilizando o detector padrão de Si(Li) – silício dopado com lítio.

3. Resultados

Na Figura 3 é apresentada a forma do pico do sinal de saída do instrumento piroelétrico desenvolvido para a energia de 28 kVp e 80 mAs. O pico do sinal é o valor utilizado para as análises, pois, representa a máxima polarização sofrida pelo material piroelétrico. Para todos os valores de kVp medidos, a forma do sinal é a mesma, mudando, apenas, a amplitude registrada. Quanto maior o kVp, maior a amplitude do sinal.

Figura 3 – Região de interesse do sinal de saída do instrumento piroelétrico.



Com os valores de tensão do tubo e de tensão da saída do sensor piroelétrico mostrados na Tabela 1, foi elaborado o gráfico ilustrado na Figura 4.

Tabela 1 – Valores de tensão do tubo obtidos com a câmara de ionização e valores de tensão do tubo obtidos com a câmara piroelétrica.

Tensão nominal do tubo (kVp)	Leitura da Câmara de Ionização (kV)	Tensão piroelétrica (V)
22	22,310	0,095
23	23,177	0,103
24	24,160	0,131
25	24,467	0,166
26	25,267	0,212
27	26,307	0,230
28	27,343	0,271
29	28,347	0,308
30	29,463	0,346
31	30,740	0,376

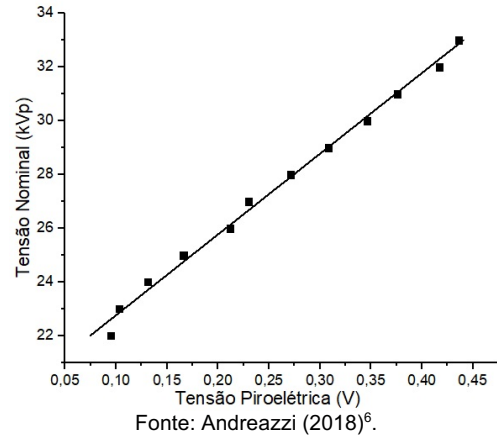
Fonte: Andreazzi (2018)⁶.

O gráfico apresentado na Figura 4 apresenta um coeficiente de correlação igual a 0,9658, mostrando que a resposta do sensor piroelétrico para a tensão nominal do tubo é linear, assim, pode ser possível

utilizar o instrumento piroelétrico para caracterizar a tensão do tubo de raios X para a mamografia.

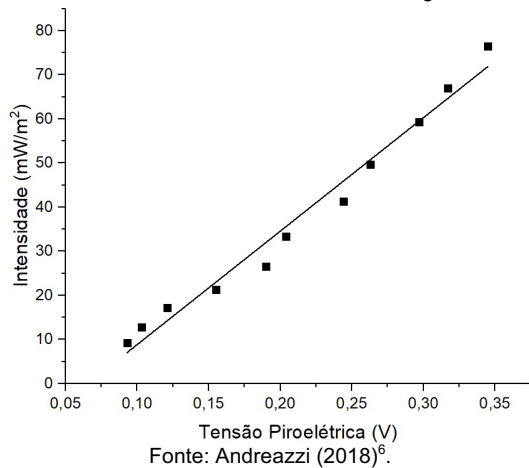
A equação da reta dos mínimos quadrados aplicada na Figura 4 é $v = 0,0265 V - 0,503$, sendo v a tensão no piroelétrico e V a tensão nominal do tubo.

Figura 4 – Variação do sinal piroelétrico com a tensão nominal do tubo.



Na Figura 5 está apresentado o gráfico relacionando a tensão de saída do instrumento piroelétrico com a intensidade do feixe de fótons.

Figura 5 – Resposta do instrumento piroelétrico com a intensidade do feixe de fótons do mamógrafo.



A equação da reta apresentada na Figura 5 é $I = 257,216 v - 16,864$, sendo I a intensidade do feixe de radiação e v a tensão de saída do instrumento piroelétrico. O gráfico apresentado na Figura 5 possui um coeficiente de correlação igual a 0,9856, comprovando a linearidade da resposta piroelétrica com a intensidade dos fótons de raios X.

Utilizando o *software* livre DTSA-II Júpiter desenvolvido pelo NIST, foi simulado a resposta do instrumento piroelétrico para a geração do espectro do molibdênio, com base em suas características físicas e composição química para ser comparado com o detector de silício padrão do programa.

Na Figura 6 está apresentada a região de interesse do espectro dos raios X produzidos pelo molibdênio com energia de 22 kVp e 80 mAs detectado pelo detector Si(Li). Os valores do eixo das ordenadas estão sem escala.

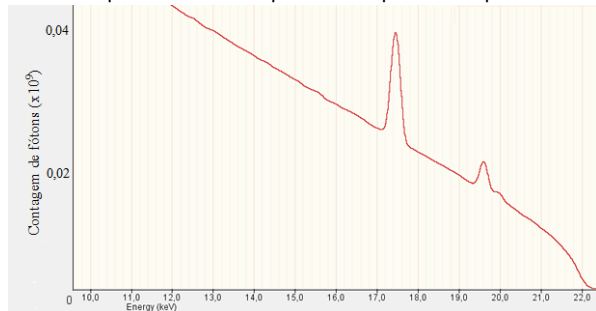
Figura 6 – Região de interesse do espectro de raios X detectado pelo sensor Si(Li) para 22 kVp e 80 mAs.



Fonte: Andreazzi (2018)⁶.

Com o detector de Si(Li) tem-se os dois picos de radiação característica do molibdênio que ocorre próximo aos 17,5 kVp e 19,5 kVp. Na Figura 7 está a região do espectro de raios X com 22 kVp e 80 mAs detectado pelo instrumento piroelétrico, com o eixo das ordenadas sem escala.

Figura 7 – Região de interesse do espectro de raios X detectado pelo instrumento piroelétrico para 22 kVp e 80 mAs.



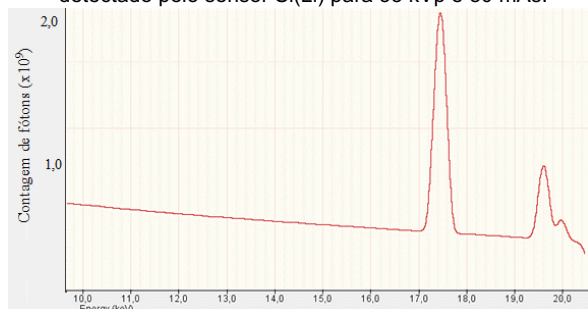
Fonte: Andreazzi (2018)⁶.

Na imagem da Figura 7 observam-se também os picos de radiação característica, porém, de modo mais suave, ou seja, contém menos fótons o espectro formado pelo instrumento piroelétrico.

As Figuras 8 e 9 apresentam os picos dos espectros gerados pelo detector de Si(Li) e pelo instrumento piroelétrico, respectivamente, ambos para 33 kVp e 80 mAs, sem escala para o eixo das ordenadas.

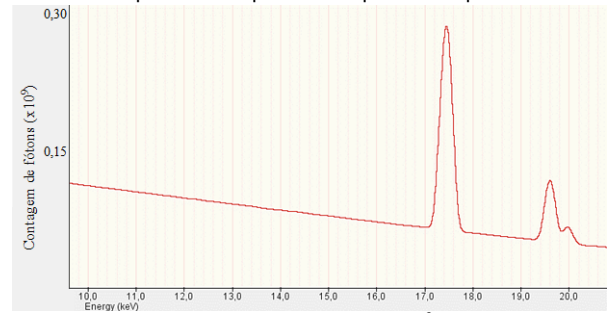
A diferença na contagem de fótons absorvido ocorre devido às diferenças físicas e químicas que os dois detectores apresentam, bem como o seu modo de detecção de fótons de raios X.

Figura 8 – Região de interesse do espectro de raios X detectado pelo sensor Si(Li) para 33 kVp e 80 mAs.



Fonte: Andreazzi (2018)⁶.

Figura 9 – Região de interesse do espectro de raios X detectado pelo sensor piroelétrico para 33 kVp e 80 mAs.



Fonte: Andreazzi (2018)⁶.

4. Discussão

A propriedade do instrumento piroelétrico, de medir linearmente a intensidade da radiação produzida pelo mamógrafo, é relevante, uma vez que o dano biológico é proporcional à intensidade da radiação. A precisão da câmara piroelétrica para a faixa de 22 a 33 kVp foi de 0,98.

O resultado das simulações mostra que o instrumento piroelétrico é capaz de detectar os picos de produção de radiação característica do material molibdênio de forma eficaz. A região de radiação *Bremsstrahlung* foi omitida para que se observasse com mais clareza as regiões de raios X característicos.

5. Conclusões

O trabalho apresenta relação entre a tensão nominal do tubo de raios X (kVp) e a resposta do detector piroelétrico. Assim, o instrumento piroelétrico apresentado desempenha a função de medir a intensidade de fótons e, pode, também, mensurar a tensão de saída do tubo.

Os resultados obtidos mostram que a resposta do instrumento implementado com o sensor piroelétrico metaniobato de chumbo é linear com a tensão do tubo de raios X de um equipamento de mamografia, podendo ser utilizado para medir este importante parâmetro do tubo. A linearidade pode ser comprovada com os valores de correlação próximo a 1,0.

Uma contribuição do trabalho foi a simulação com o *software* DTSA-II, versão Júpiter, que mostrou que um instrumento piroelétrico pode ser utilizado para obter o espectro de radiação X para o molibdênio.

As características mencionadas, bem como seu baixo custo de produção e facilidade de manuseio, quando comparado aos instrumentos frequentemente utilizados para controle de parâmetros radiológicos, fazem com que o instrumento piroelétrico tenha possibilidades razoáveis de, após maiores estudos com mais amostras de dados, ser recomendado para realização do controle de qualidade de equipamentos de mamografia.

Agradecimentos

Ao apoio financeiro oferecido pela CAPES.

Referências

1. Cooper J. A fast-response pyroelectric thermal detector. *Journal of Scientific Instruments*. 1962; 39(9): 467.
2. Hossain A, Rashid MH. Pyroelectric detectors and their applications. *IEEE Transactions on industry applications*. 1991; 27(5): 824-829.
3. De Carvalho AA, Brassalotti AL, De Paula MH, Alter AJ. Use of lithium niobate detector for measuring X-ray intensity in mammographic range. *Electronics Letters*. 2004; 40(18): 1097-1098.
4. Paula MH, De Carvalho AA, Brassalotti AL, Alter AJ, Sakamoto WK, Malmonge JA, et al. Microcontrolled pyro-electric instrument for measuring X-ray intensity in mammography. *Medical and Biological Engineering and Computing*. 2005; 43(6): 751-755.
5. Brasil. Ministério da Saúde. Portaria nº 453, de 1 de junho de 1998. Diretrizes de Proteção Radiológica. Médico e Odontológico. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*. 1998 jun. 1; p. 98.
6. Andreazzi A. Implementação de um Instrumento para Medição da Intensidade de Fótons na Faixa da Mamografia [dissertação]. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista – UNESP; 2018.
7. Franco S. Design with operational amplifiers and analog integrated circuits. 4.ed. San Francisco, EUA: McGraw-Hill series in electrical and computer engineering; 2015.

Contato:

Autor Correspondente:

Mariana Andreazzi

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP,
Ilha Solteira – SP.

Av. Brasil, 56 – Centro – Ilha Solteira/SP – CEP:
15385-000 – A/C Depto de Eng. Elétrica.

E-mail: mariana.andreazzi@gmail.com

Fabian Rodrigo Castro Forero

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP,
Ilha Solteira – SP.

Av. Brasil, 56 – Centro – Ilha Solteira/SP – CEP:
15385-000 – A/C Depto de Eng. Elétrica.

E-mail: fcastro12@gmail.com

Jorge Esteban Blanco Rodriguez

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP,
Ilha Solteira – SP.

Av. Brasil, 56 – Centro – Ilha Solteira/SP – CEP:
15385-000 – A/C Depto de Eng. Elétrica.

E-mail: jebianco88@gmail.com

Aparecido Augusto de Carvalho

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP,
Ilha Solteira – SP.

Av. Brasil, 56 – Centro – Ilha Solteira/SP – CEP:
15385-000 – A/C Depto de Eng. Elétrica.

E-mail: carvalho.aparecido@gmail.com

Marcelo Augusto Assunção Sanches

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP,
Ilha Solteira – SP.

Av. Brasil, 56 – Centro – Ilha Solteira/SP – CEP:
15385-000 – A/C Depto de Eng. Elétrica.

E-mail: sanches840@yahoo.com.br