

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DETECTOR
PIROELÉTRICO PARA MEDIÇÃO DE INTENSIDADE DE
RADIAÇÃO X NA FAIXA DE ORTOVOLTAGEM**

Wesley Pontes

Dissertação de mestrado submetida à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da
Universidade Estadual Paulista - UNESP.
Como parte dos requisitos necessários para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica.

Orientador Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho

Ilha Solteira, agosto de 2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira.

Pontes, Wesley

**P814i Implementação de um sistema detector piroelétrico para medição de intensidade de radiação X na faixa de ortovoltagem / Wesley Pontes. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2006
x, 66 p. : il.**

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Instrumentação Eletrônica, 2006.

Orientador: Aparecido Augusto de Carvalho

Bibliografia: p. 56-58

**1. Sensor Piroelétrico. 2. Ortovoltagem. 3. Raios X. 4. Taxa de fluência de energia.
5. Radiação - Dosagem**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Implementação de um Sistema Detector Piroelétrico para Medição de Intensidade de Radiação X na Faixa de Ortovoltagem

AUTOR: WESLEY PONTES

ORIENTADOR: Prof. Dr. APARECIDO AUGUSTO DE CARVALHO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. APARECIDO AUGUSTO DE CARVALHO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. WALTER KATSUMI SAKAMOTO
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Profa. Dra. ADELAIDE DE ALMEIDA
Departamento de Física e Matemática - Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Ribeirão Preto - USP/Ribeirão Preto-SP

Data da realização: 31 de agosto de 2006.

Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. APARECIDO AUGUSTO DE CARVALHO

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	II
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE TABELAS	VI
AGRADECIMENTOS	VIII
RESUMO.....	X
ABSTRACT	XI
Capítulo 1 INTRODUÇÃO	1
Capítulo 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	4
2.1 <i>O Efeito Piroelétrico</i>	<i>4</i>
2.2 <i>Materiais Piroelétricos.....</i>	<i>5</i>
2.3 <i>O Detector Piroelétrico.....</i>	<i>7</i>
2.4 <i>Resposta de um Detector Piroelétrico a um Pulso de Radiação.....</i>	<i>11</i>
2.4.1 <i>O Circuito Térmico.....</i>	<i>11</i>
2.4.2 <i>O Circuito Elétrico</i>	<i>13</i>
2.5 <i>A Radiação X.....</i>	<i>16</i>
2.6 <i>Interações da radiação X com a matéria</i>	<i>17</i>
2.7 <i>Coeficiente de Atenuação Linear</i>	<i>18</i>
2.8 <i>Medida da Radiação Ionizante.....</i>	<i>20</i>
2.8.1 <i>Fluência (φ)</i>	<i>20</i>
2.8.2 <i>Fluência de Energia (ψ).....</i>	<i>20</i>
2.8.3 <i>Taxa de Fluência de Energia ou Intensidade (Φ)</i>	<i>21</i>
2.8.4 <i>Exposição (X).....</i>	<i>21</i>
2.8.5 <i>Relação entre Exposição e Taxa de Fluência de Energia</i>	<i>21</i>
2.9 <i>O Microcontrolador</i>	<i>22</i>
2.9.1 <i>A Família PIC 16Fxxx.....</i>	<i>23</i>
2.9.2 <i>Organização da Memória.....</i>	<i>27</i>
2.10 <i>Módulo LCD.....</i>	<i>27</i>
Capítulo 3 Materiais e Métodos	29
3.1 <i>Introdução</i>	<i>29</i>
3.2 <i>O Equipamento de Ortovoltagem.....</i>	<i>29</i>
3.3 <i>O Equipamento de Referência.....</i>	<i>30</i>
3.4 <i>A Energia Absorvida pelo Sensor.....</i>	<i>31</i>
3.5 <i>Obtenção da Taxa de Fluência de Energia.....</i>	<i>31</i>
3.6 <i>Sensores Piroelétricos.....</i>	<i>32</i>
3.7 <i>O Circuito de Condicionamento de Sinais</i>	<i>32</i>
3.8 <i>A Câmara Piroelétrica</i>	<i>34</i>
3.9 <i>O Microcontrolador e o Display de Cristal Líquido.....</i>	<i>38</i>
Capítulo 4 Resultados e Discussão	42

4.1	<i>Energia Absorvida pelos Sensores Piroelétricos</i>	42
4.2	<i>Energia efetiva dos fótons e exposição.....</i>	45
4.3	<i>Medições realizadas com o sistema detector piroelétrico</i>	45
4.4	<i>Precisão do sistema.....</i>	46
4.5	<i>Resposta do sistema detector piroelétrico.....</i>	47
4.6	<i>Resolução do sistema detector piroelétrico.....</i>	52
4.7	<i>Degradação dos detectores piroelétricos.....</i>	52
Capítulo 5 Conclusões		54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		56
APÊNDICE A		59
APÊNDICE B		62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Dependência da polarização espontânea com a temperatura.	6
Figura 2.2 – Dependência do coeficiente piroelétrico com a temperatura.	6
Figuras 2.3 e 2.4 – Variação da corrente produzida por um detector piroelétrico quando nele incide um pulso de radiação eletromagnética.	7
Figura 2.5a - Configuração eletrodo face.	9
Figura 2.5b - Configuração eletrodo extremidade.	9
Figura 2.6 - Circuito equivalente de um detector piroelétrico.	11
Figura 2.7a.- Circuito elétrico equivalente do detector piroelétrico e seu amplificador. ...	14
Figura 2.7b - Circuito equivalente do sistema detector-amplificador.	14
Figura 2.8a - PIC 16F777 – Características do dispositivo.	25
Figura 2.8b - PIC 16F777 – Características do dispositivo.	26
Figura 2.9 - 16F777 - Pinagem.	26
Figura 3.1 - Equipamento de Ortovoltagem Siemens Stabilipan II.	30
Figura 3.2 - Câmara de Ionização Farmer 2570A.	30
Figura 3.3 - Conversor corrente-tensão de alta sensibilidade.	33
Figura 3.4 - Vista superior da câmara piroelétrica.	35
Figura 3.5 - Vista frontal da câmara piroelétrica.	35
Figura 3.6 - Interior da câmara piroelétrica.	36
Figura 3.7 - Câmara piroelétrica blindada com <i>alloy</i> , vista externa.	37
Figura 3.8 - Câmara Piroelétrica blindada com <i>alloy</i> , vista interna.	37
Figura 3.9 - Circuito Inversor.	38
Figura 3.10 - Seqüência lógica das operações realizadas pelo microcontrolador.	39
Figura 3.11 - Foto da caixa metálica, (vista frontal).	39
Figura 3.12 - Foto do interior da caixa metálica.	40
Figura 3.13 - Foto da caixa metálica (vista posterior).	41
Figura 4.1 - Resposta do sistema com metaniobato de chumbo PZ35.	46
Figura 4.2 - Resposta do sistema detector piroelétrico, com os sensores PZ34 e PZ35, com a taxa de fluência de energia.	49
Figura 4.3 - Resposta do sistema detector piroelétrico, com o sensor de niobato de lítio, com a taxa de fluência de energia.	49
Figura 4.4 - Resposta do sistema detector piroelétrico, com os sensores PZT Nb e PZT Fe, com a taxa de fluência de energia.	50
Figura 4.5 - Resposta do Sistema Detector Piroelétrico, com o sensor PZ34 PEEK, com a taxa de fluência de energia.	50
Figura 4.6 - Resposta do Sistema Detector Piroelétrico, com o sensor PZT Fe, na faixa de 120 a 300 kVp.	51
Figura 4.7 - Valor médio de d_{33} antes e após a irradiação dos sensores.	53
Figura 2.10a - 16F777 – Mapa de memória de programa.	62
Figura 2.10b - Mapa da memória de dados do 16F777.	63
Figura 2.11a - Bits responsáveis pela conversão A/D do 16F777.	64

Figura 2.11b - Bits responsáveis pela conversão A/D do 16F777.	65
Figura 2.11c - Bits responsáveis pela conversão A/D do 16F777.....	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Faixas de Energia do Raio X.	17
Tabela 2.2 - Pinagem dos Módulos LCD.	28
Tabela 4.1 - Percentual de absorção dos sensores para tensão no tubo de 80 kVp.	42
Tabela 4.2 - Percentual de absorção dos sensores para tensão no tubo de 120 kVp...	43
Tabela 4.3 - Percentual de absorção dos sensores para tensão no tubo de 180 kVp...	43
Tabela 4.4 - Percentual de absorção dos sensores para tensão no tubo de 200 kVp...	43
Tabela 4.5 - Percentual de absorção dos sensores para tensão no tubo de 250 kVp...	44
Tabela 4.6 - Percentual de absorção dos sensores para tensão no tubo de 300 kVp...	44
Tabela 4.7 - Energia dos fótons, exposição e fluência de energia.....	45
Tabela 4.8 - Precisão do sistema detector com medição da amplitude do sinal com o osciloscópio.	47
Tabela 4.9 – Precisão do sistema detector com medição da amplitude do sinal com o <i>display digital</i>	47
Tabela 4.10 - Resposta do sistema detector piroelétrico.	48
Tabela 4.11 - Valor médio de d_{33} antes e após a irradiação dos sensores.....	52

*À Marcela Codognatto Canassa
Dedico*

*Aos meus pais, por sempre me
apoiarem e darem condições
para a realização desse trabalho,
à minha irmã Vanila e ao
meu orientador
Aparecido Augusto de Carvalho
Ofereço*

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a Deus.

Aos meus pais Waldeildo e Valeni e a minha irmã Vanila que muito me apoiaram durante todo o tempo, amparando-me durante os momentos de dificuldade, especialmente minha mãe. À minha namorada Marcela, pela paciência, carinho e tranquilidade que sempre me fez continuar. À minha avó Angelina por hoje e sempre.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho, pela orientação dedicada a mim, por tudo que me ensinou durante o período em que passamos trabalhando. Dificilmente conseguirei quantificar o meu crescimento acadêmico, além da lição de vida adquirida com esta convivência.

A todos de minha família que me incentivaram.

Ao Prof. Dr. Walter Katsumi Sakamoto pela colaboração no desenvolvimento do trabalho, pelos equipamentos cedidos do Laboratório de Física da Unesp de Ilha Solteira e pelas amostras de compósito para utilizá-las na pesquisa.

Ao Prof. Dr. José Antonio Malmonge pelos equipamentos cedidos do Laboratório de Física da Unesp de Ilha Solteira e pelas contribuições.

À Professora Dra. Adelaide de Almeida pelo auxílio sempre sugestivo e pela paciência e dedicação de seu tempo nas correções do trabalho.

Ao Prof. Mauro Henrique de Paula e ao Prof. Thomaz Ghilardi Netto que não mediram esforços em ceder equipamentos e inclusive apoio para que fossem realizados os ensaios.

Ao Prof. Dr. José Antônio Eiras da UFSCar (Universidade Federal de São Carlos) que cedeu os PZTs utilizados na pesquisa.

Aos técnicos Aderson, Hidemassa, José Augusto, Tião, Diego, e José Luis Aziane que sempre me auxiliaram em problemas práticos e sugestões criativas e pela disposição quando necessitei utilizar os laboratórios de ensino.

À física responsável pelo setor de radiologia do Hospital Universitário da Federal do Mato Grosso do Sul, Dra. Regina Borges Prestes César.

Aos meus amigos Giuliano Pierre Estevam, Wander Wagner Mendes Martins, Marcelo Augusto Assunção Sanches, Sérgio Nazário, Leonardo Mangiapelo, Ricardo Freitas (Baiano), Carlos Roberto Antunes, Renato Mendes, Josivaldo Godoi, João Willie, Evandro Canassa, Rodrigo Koji, Marcelo Luiz Grigoletto, Victor Marcuz de Moraes, Thiago Manaia, Ana Flávia da Silva e em especial o meu grande amigo Tony Inácio da Silva, companheiro de laboratório que sempre esteve presente em todos os momentos, ajudando nas dificuldades e compartilhando os momentos de alegria.

À todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho.

À FAPESP pela grande ajuda financeira, concedida através de uma bolsa de mestrado, pois sem ela seria muito difícil a conclusão do trabalho no prazo planejado e aquisição dos recursos necessários.

RESUMO

Neste trabalho descreve-se um sistema detector piroelétrico de intensidade (taxa de fluência de energia) de raios X, para a faixa de ortovoltagem (80 a 300 kVp), constituído essencialmente por uma câmara piroelétrica, um circuito microcontrolado e um *display* de cristal líquido.

A radiação foi produzida por um equipamento de ortovoltagem Siemens Stabilipan II.

A câmara possui no seu interior um sensor piroelétrico e um conversor corrente-tensão de alta sensibilidade, que tem como principal componente um amplificador operacional OPA111 (Burr-Brown).

Utilizou-se um osciloscópio digital e um circuito microcontrolado associado ao *display* para a medição da amplitude dos pulsos de sinal elétrico decorrentes dos pulsos de raios X incidentes no sensor.

A resposta do sistema detector piroelétrico foi linear com a intensidade da radiação, em uma faixa de sua resposta, com alguns dos materiais utilizados.

O sensor PZT Fe (zirconato titanato de chumbo com ferro) apresentou a melhor sensibilidade para uma grande faixa de tensão sendo assim o mais adequado para utilização em medições de intensidade de radiação X.

Dos resultados obtidos, a precisão, resolução e sensibilidade do sistema detector, com os diferentes sensores piroelétricos, associados ao seu baixo custo, construção relativamente simples e facilidade de realização das medições, podem torná-lo muito útil no monitoramento de radiação produzida por equipamentos de ortovoltagem.

Palavras-chave: Sensor piroelétrico, Ortovoltagem, Raio-X, Taxa de fluência de energia, Intensidade da radiação.

ABSTRACT

In this work a pyroelectric detector system is described for measuring the energy fluence rate (intensity) of x-ray pulses in the ortovoltage range (from 80 to 300 kVp), consisting of a pyroelectric chamber, a microcontrolled circuit, and a liquid crystal display (LCD).

The radiation was produced by an ortovoltage equipment Siemens Stabilipan II.

The pyroelectric chamber consists essentially of a pyroelectric detector and a current-to-voltage converter that has an operational amplifier OPA 111 (Burr-Brown) as the main component.

The electrical pulses produced by the radiation was measured with an oscilloscope and a microcontrolled circuit associated to a LCD.

The pyroelectric detector response to a radiation pulse showed linear relationship between the peak electric signal produced by the detector and the intensity of the x-ray pulses in some materials used.

The PZT fe showed the most sensibility for a bigger voltage range being thus the most adjusted for measuring the intensity of radiation X.

The precision, resolution, and sensibilities of the pyroelectric detector system, with the different pyroelectric sensors, associated with his low cost, relatively simple construction, and easiness for using the device, can turn it very useful for measuring the intensity of radiation produced by ortovoltage equipments.

Key-words: *Pyroelectric sensor, Ortovoltage, X-Ray, Energy fluence rate, Radiation intensity.*

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A idéia de utilizar-se do efeito piroelétrico para detectar radiação foi formulada pela primeira vez por Ta [1]. Posteriormente os materiais ferroelétricos encontraram larga aplicação em termometria remota e na detecção e medida de radiação não ionizante como, por exemplo, o infravermelho [2] e [3].

Os detectores piroelétricos diferem de outros detectores térmicos tais como termopares e termistores nas seguintes características:

- 1) Respondem à derivada da temperatura;
- 2) Apresentam tempos de resposta menores, uma vez que não necessitam atingir o equilíbrio térmico para efetuar as medidas.

Hester et al. [4] foram os primeiros a utilizar um material piroelétrico para detectar radiação ionizante. Eles mediram grandes pulsos de radiação γ (~ 10 a 1000 Gy). Kremenchugskii e Strakovskaya [5] e [6] constataram que detectores construídos com BaTiO_3 podem medir radiação γ com taxas de dose de até 13 Gy/s e que eles possuem alta durabilidade, mesmo quando submetidos à radiação intensa. A saída do detector não mudou as características do material, permanecendo praticamente inalterada para uma dose acumulada de exposição de 3×10^7 Gy.

Os detectores piroelétricos diferem de detectores típicos de radiação ionizante como câmaras de ionização, TLDs, dosímetros semicondutores, nas seguintes características:

- 1) São sensíveis a um grande espectro da radiação, do infravermelho até o ultravioleta;
- 2) Respondem quase instantaneamente (10^{-7} s) a qualquer variação na intensidade da radiação;
- 3) Respondem linearmente com a intensidade da radiação.

Em 1984, M. H. de Paula et al. [7] descreveram o dosímetro de radiação piroelétrico (PERD) utilizado para medir taxa de fluência de energia de um feixe contínuo de radiação X, na faixa de diagnóstico. A instrumentação básica consistia de um detector construído com PZT, um *chopper* para comutar a radiação e um amplificador *lock-in*.

Beddar e Higgins [8] utilizaram detectores ferroelétricos na dosimetria de elétrons. Cruvinel et al. [9] empregaram piroelétricos para medir correntes produzidas por feixes de prótons. Crestana et al. [10] descreveram uma nova técnica para detecção de nêutrons térmicos utilizando cerâmicas piroelétricas.

De Carvalho et al. [11] propuseram dois métodos térmicos para medir a fluência de energia de um pulso de raios-X, utilizando detectores piroelétricos e fotoacústicos. O transdutor piroelétrico empregado foi o PZT. A fonte de radiação era uma unidade industrial que não podia produzir pulsos de radiação. Estes foram produzidos por um comutador, acionado por um motor de corrente contínua. O tempo de exposição foi de 0,26 s, a distância da fonte ao detector foi de 7 cm. A faixa de tensão do equipamento foi de 50 a 90 kVp, com correntes entre zero e 20 mA.

A. A. Carvalho e A. J. Alter [12] efetuaram medições de raios X na faixa de diagnóstico de 50 a 140 kVp, utilizando como fonte de radiação um instrumento que podia variar o tempo de exposição de 0,8 a 6,0 s. A resposta de um detector piroelétrico a um pulso de radiação foi explicada através de um modelo teórico no qual entravam como parâmetros a constante de tempo térmica do detector e a constante de tempo elétrica do detector e seu circuito pré-amplificador.

J. B. Romero [13] efetuou medições de radiação X na faixa de mamografia com um PZT, em seu trabalho de dissertação de mestrado. Utilizou um osciloscópio digital para medir a amplitude dos pulsos elétricos produzidos pelo detector e seu circuito pré-amplificador. A resposta do detector mostrou-se linear com a intensidade da radiação.

A. L. Brassalotti e A. A. de Carvalho utilizaram um detector de metaniobato de chumbo [14] e M. H. de Paula et al. detector de niobato de lítio para medir a intensidade de raios X também na faixa de mamografia [15]. A resposta dos detectores mostrou-se linear com a intensidade da radiação.

Na pesquisa bibliográfica efetuada não foi encontrado nenhum artigo que aborde a utilização de detectores piroelétricos para medir a intensidade de radiação X na faixa de ortovoltagem.

Neste trabalho será estudada a resposta do detector a um pulso de radiação, uma vez que será utilizado um equipamento de ortovoltagem pertencente ao Hospital Universitário da UFMS de Campo Grande (*Siemens, Stabilipan II*) capaz de produzir pulsos de radiação. São equipamentos de raios X que operam com quilovoltagem entre 120 e 300 kVp (ortovoltagem). Trata lesões de pele ou com infiltração até cerca de 3cm de profundidade, como, por exemplo, a irradiação preventiva dos quelóides operados, dos hemangiomas e dos carcinomas basocelulares. O equipamento proposto terá, portanto, a função de aferir as doses produzidas por equipamentos de ortovoltagem, relacionando sua intensidade (W/m^2) com a tensão (Volts) de resposta produzida pela dose fornecida ao equipamento de aferição desenvolvido.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 O Efeito Piroelétrico

Quando um elemento piroelétrico sofre uma variação de temperatura, cargas superficiais são produzidas em uma direção particular, em consequência da reorganização de sua polarização espontânea, ou seja, do seu vetor polarização. Este fenômeno foi denominado piroeletricidade pela primeira vez por Brewster [16].

Se a variação de temperatura do elemento piroelétrico for uniforme, então o efeito piroelétrico pode ser descrito pela equação:

$$\Delta P_s = p\Delta T \quad (2.1)$$

na qual P_s é o módulo do vetor polarização espontânea, p o coeficiente piroelétrico e T a temperatura [17].

Basicamente, um detector piroelétrico consiste de uma pastilha fina de um elemento piroelétrico polarizado, com a superfície do eletrodo normal ao vetor polarização. Desta forma é um transdutor térmico bem como um elemento capacitivo.

Quando radiação eletromagnética é absorvida pelo detector, a temperatura do elemento piroelétrico muda. A variação da temperatura altera sua polarização e produz alteração nas cargas superficiais que aparecem no capacitor formado pelo elemento piroelétrico e seus eletrodos.

O desempenho e a sensibilidade dos detectores piroelétricos são limitados por ruídos. O ruído de flutuação da temperatura ajusta o mínimo que se pode medir com os detectores piroelétricos. Frequentemente, porém, o desempenho dos detectores piroelétricos

é determinado por limitações tecnológicas: ruído do material ou ruídos do amplificador [17].

2.2 Materiais Piroelétricos

Há dois tipos de materiais piroelétricos: lineares e ferroelétricos.

Nos lineares a direção de polarização não pode ser invertida, como ocorre, por exemplo, na turmalina, sulfato de lítio e no sulfeto de cádmio.

Nos ferroelétricos a direção de polarização pode ser invertida pela aplicação de um campo elétrico apropriado, e o valor da polarização pode ser reduzido a zero em uma determinada temperatura, denominada temperatura Curie. Exemplos de materiais ferroelétricos são o tantalato de lítio, o niobato de bário estrôncio (SBN), o sulfato de triglicina (TGS), o zirconato titanato de chumbo (PZT), o fluoreto de polivinilideno (PVDF), entre outros.

O comportamento dos materiais piroelétricos é fundamentalmente diferente dos detectores térmicos normais, porque eles exibem polarização espontânea. Quando um elemento piroelétrico sofre uma mudança homogênea de temperatura, os dipolos elétricos rearranjados pela reorganização na polarização orientam-se em uma direção e mantêm uma variação na quantidade de carga do material, reorganizando a direção da polarização espontânea. Estas cargas aparecem na superfície do eletrodo do elemento piroelétrico.

Quando um elemento piroelétrico fica em equilíbrio (isto é, o elemento não sofre variação de temperatura) cargas livres na superfície do elemento são neutralizadas pelo campo interno de polarização; mas, quando ocorrem grandes mudanças na temperatura do elemento, são geradas grandes quantidades de carga devido à reorganização da polarização, e isto significa uma grande quantia de carga retida no eletrodo que pode ser coletada através de um resistor de descarga.

As Figuras 2.1 e 2.2 ilustram como a polarização elétrica espontânea e o coeficiente piroelétrico do NaNO_3 variam com a temperatura [18].

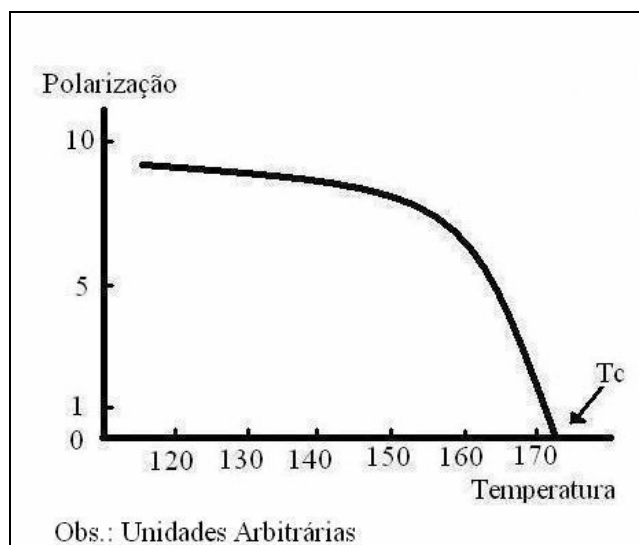


Figura 2.1 – Dependência da polarização espontânea com a temperatura.

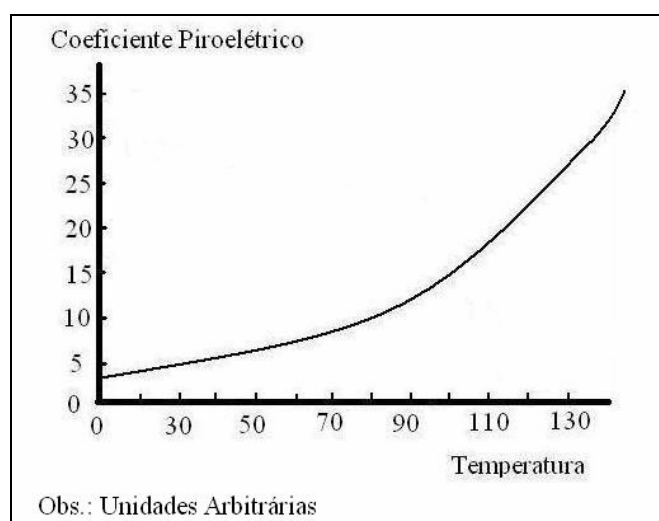
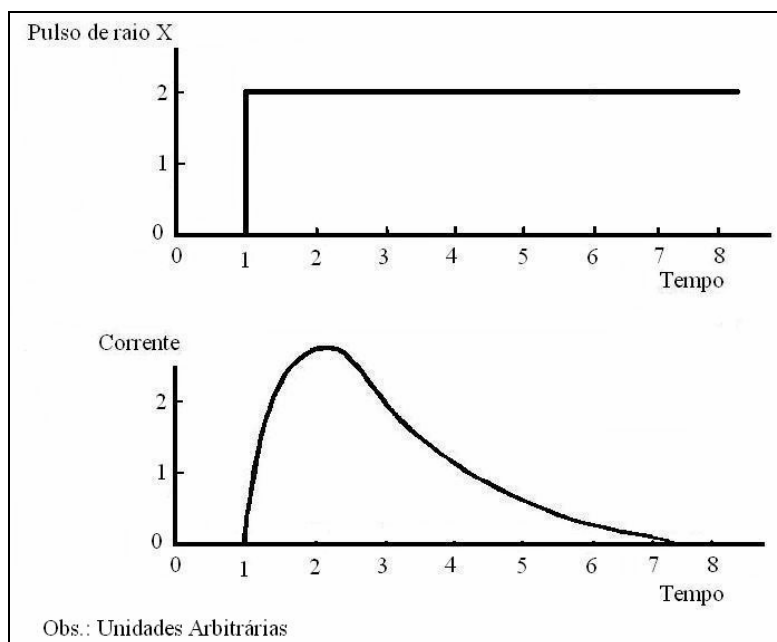


Figura 2.2 – Dependência do coeficiente piroelétrico com a temperatura.

As Figuras 2.3 e 2.4 mostram como varia a corrente produzida por um detector piroelétrico quando nele incide um pulso de radiação eletromagnética [18].



Figuras 2.3 e 2.4 – Variação da corrente produzida por um detector piroelétrico quando nele incide um pulso de radiação eletromagnética.

Uma grande vantagem de utilizar-se materiais cerâmicos ao invés de cristais é que pode-se produzir grandes blocos cerâmicos através de técnicas de prensagem a quente. Estes blocos podem ser cortados, lapidados e polidos sem terem sua polarização orientada durante o processo de fabricação [13]. A polarização do elemento piroelétrico é realizada aquecendo-o acima da temperatura Curie, aplicando um campo elétrico com direção perpendicular à superfície dos eletrodos e deixando o material resfriar até a temperatura ambiente, mantendo-se o campo elétrico aplicado. Como a polarização interna é compensada com cargas superficiais em ambas as faces, só haverá detecção de carga quando houver uma variação na temperatura dada pela variação na intensidade de radiação, ou seja, quando a radiação for modulada periodicamente ou pulsada.

2.3 O Detector Piroelétrico

Um detector piroelétrico é constituído por uma fina pastilha de elemento dielétrico e é, na sua essência, um capacitor no qual o dielétrico é um material piroelétrico,

devidamente polarizado, tal que uma variação na temperatura do elemento piroelétrico produzirá uma carga no capacitor, gerando uma diferença de potencial entre “as placas do capacitor”, quando em circuito aberto.

Eletrodos são depositados em ambas as faces do elemento piroelétrico, normais ao eixo polar, as quais são paralelas ou perpendiculares às radiações incidentes a serem detectadas. Para uma melhor absorção da radiação pode-se escurecer a face do eletrodo onde há radiação incidente. Quase sempre a face do elemento piroelétrico é escurecida se o eletrodo é transparente.

Sob mudança homogênea na temperatura, os elementos piroelétricos são como um capacitor gerando carga. Se um circuito externo for conectado ao capacitor, estas cargas fluirão. Este fluxo de carga será proporcional à taxa de variação de temperatura. Nenhuma corrente fluirá quando a temperatura do elemento piroelétrico estiver estabilizada. Ele é sensível a um grande espectro de comprimentos de onda de radiação, do infravermelho à radiação γ .

Consideram-se como ideais os detectores piroelétricos que são suficientemente finos, de forma que se podem desprezar gradientes de temperatura, devido à difusão térmica.

Nos detectores piroelétricos reais deve-se levar em conta se o elemento piroelétrico está apoiado em um suporte isolante ou condutor e se encontra em um ambiente com gás inerte, vácuo ou simplesmente ar, pois, a radiação absorvida pode ser perdida não somente por irradiação, mas também por condução e convecção.

A equação que descreve a transferência de calor no detector é descrita por uma equação do seguinte tipo [17]:

$$\frac{\partial^2}{\partial t} \Delta T_i(z_i, t) = \frac{k_i}{C_i^E} \frac{\partial^2}{\partial z_i^2} \Delta T_i(z_i, t) \quad (2.2)$$

na qual ΔT é a variação na temperatura, k_i é a condutividade térmica e C_i^E é o calor específico.

Existem duas configurações de circuitos do detector piroelétrico:

Configuração eletrodo face: a face do eletrodo é usada como superfície receptora e como placa do capacitor.

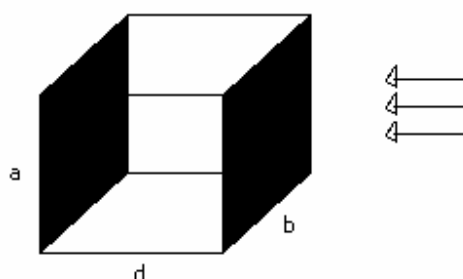


Figura 2.5a - Configuração eletrodo face.

Configuração eletrodo extremidade: o eixo de orientação situa-se no plano da superfície receptora, de forma que as placas do capacitor (as quais devem ser normais ao eixo) são colocadas ao longo das extremidades do elemento.

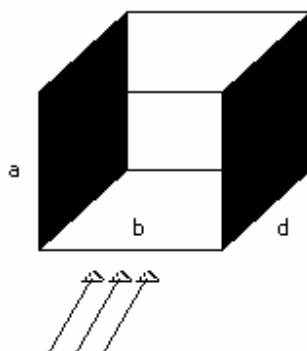


Figura 2.5b - Configuração eletrodo extremidade.

A diferença principal entre as configurações está na impedância elétrica. A configuração do eletrodo face é a mais usada [18].

A resposta térmica do elemento detector depende de dois fatores:

- a) Capacidade de absorção de radiação do elemento detector;
- b) Mudança de temperatura devido à radiação absorvida.

A resposta piroelétrica devido à mudança na temperatura do elemento piroelétrico é proporcional ao coeficiente piroelétrico.

Para propósitos práticos a sensibilidade do material detector é medida de duas formas quando sobre o detector incide radiação eletromagnética modulada periodicamente com frequência angular ω :

- a) Responsividade de Corrente, R_i ;
- b) Responsividade de Tensão, R_v .

A responsividade de corrente é definida como

$$R_i = I_{EF}/P\omega_{EF} \quad (2.3)$$

na qual I_{EF} é a corrente gerada pelo detector e $P\omega_{EF}$ é a potência da radiação incidente.

Da mesma forma pode-se definir a responsividade de tensão como

$$R_v = V_{EF}/P\omega_{EF} \quad (2.4)$$

na qual V_{EF} é a tensão gerada pelo detector e $P\omega_{EF}$ é a potência da radiação incidente.

O sinal de tensão produzida pela carga q do detector é observado quando o detector é conectado a um amplificador de alta impedância.

O detector pode ser representado como uma fonte de corrente, em paralelo com um capacitor C e com uma resistência em paralelo $1/G_e$, conforme ilustra a Figura 2.6.

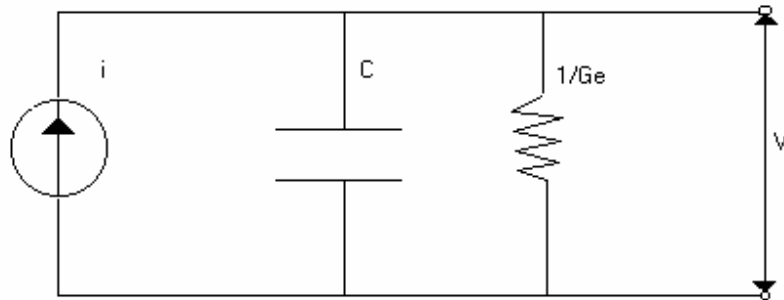


Figura 2.6 - Circuito equivalente de um detector piroelétrico.

Geralmente a saída do detector é caracterizada pela função transferência da resposta para uma radiação modulada senoidalmente. A modulação pode ser senoidal, degrau (pulso), ou retangular.

A análise teórica será baseada no método descrito na referência [12], no qual estudou-se um detector piroelétrico constituído por PZT que foi utilizado para medir radiação X na faixa de diagnóstico.

2.4 Resposta de um Detector Piroelétrico a um Pulso de Radiação

2.4.1 O Circuito Térmico

Considere um detector constituído por uma camada fina de material piroelétrico, apoiado em suportes de baixa condutância térmica. Se o detector for exposto a um pulso estreito de raios-X, com fluência de energia ψ [J/cm²], a energia fornecida ao detector pode ser expressa por:

$$E = \eta A_r \psi \quad (2.5)$$

na qual A_r é a área irradiada da superfície detectora e η é a fração da energia de radiação incidente depositada dentro do detector. Considerando que parte da energia não é absorvida pelo detector, η será menor que um. Diferenciando (2.5) em relação ao tempo, tem-se:

$$\frac{dE}{dt} = \eta A_r \frac{d\psi}{dt} = \eta A_r \dot{\psi} \quad (2.6)$$

Essencialmente toda esta energia incidente será quase instantaneamente convertida em calor, resultando no aumento da temperatura do detector. Se esta quantidade de calor, ΔH , for pequena, então o aumento resultante da temperatura, ΔT , será dado por:

$$\Delta H = C_T \Delta T \quad (2.7)$$

na qual C_T , a capacitância térmica do elemento piroelétrico, é dada por:

$$C_T = \rho V c \quad (2.8)$$

sendo ρ a densidade, V o volume e c o calor específico do elemento piroelétrico.

Diferenciando (2.7) com relação ao tempo, tem-se:

$$\frac{d\Delta H}{dt} = C_T \frac{d\Delta T}{dt} \quad (2.9)$$

O uso mais comum dos materiais ferroelétricos envolve detecção de luz visível e infravermelho, nas quais a quase totalidade da energia da radiação é absorvida na superfície ou em uma região próxima à superfície do detector.

Raios-X são mais penetrantes e, dependendo de sua energia, depositam energia por todo o volume do elemento piroelétrico. Conseqüentemente, o processo de condução de calor através do elemento piroelétrico não será considerado e o aumento de temperatura ΔT é o mesmo em todo o elemento piroelétrico. Para raios-X de diagnóstico este aumento na temperatura é diminuído. Uma exposição de um *roentgen* (aproximadamente equivalente a 0.00873 J/kg, no ar), que é uma exposição razoavelmente grande em radiologia de diagnóstico, resultaria em um aumento de 2×10^{-5} *kelvin* na temperatura dos ferroelétricos (zirconato titanato de chumbo) [12].

Sendo ΔT o aumento da temperatura do detector, em relação à temperatura T do ambiente, que têm idealmente capacitância térmica infinita, a perda de energia para o ambiente é dada por:

$$\Delta W = G_T \Delta T \quad (2.10)$$

na qual G_T é a condutância térmica de acoplamento entre o detector e seu ambiente. A potência térmica absorvida pelo detector é igual à somatória da potência térmica que o aquece, dada por (2.9), e da potência térmica irradiada para o ambiente, dada por (2.10). Supondo não haver perdas de energia devido às reações químicas ou mudança de estado físico, combinando as equações (2.6), (2.9), e (2.10) obtém-se:

$$C_T \frac{d\Delta T}{dt} + G_T \Delta T = \eta A_r \dot{\psi} \quad (2.11)$$

da qual ΔT pode ser determinado.

Considerando um pulso de radiação degrau $\dot{\psi}(t) = 0$ se $t < 0$ e $\dot{\psi}(t) = \dot{\psi}_0$ se $t > 0$, com a condição de contorno $\Delta T = 0$ para $t = 0$ a solução de (2.11) é facilmente obtida:

$$\Delta T = \frac{\eta \dot{\psi}_0 A_r}{G_T} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right] \quad (2.12)$$

na qual $\tau_T = C_T/G_T$ é a constante de tempo térmica do detector.

2.4.2 O Circuito Elétrico

Representando-se o detector piroelétrico como uma capacitância C_d em paralelo com a resistência de descarga R_d , a variação das cargas dos eletrodos é equivalente a uma fonte de corrente em paralelo com o capacitor. Se o detector for conectado através da entrada de um amplificador, pode-se representar o detector piroelétrico e seu amplificador pelo circuito mostrado na Figura 2.7a, na qual R_A é a resistência de entrada e C_A é a capacitância de entrada do amplificador. Pode-se representar o sistema detector amplificador completo pelo circuito equivalente mostrado na Figura 2.7b, na qual $R = R_d // R_A$ e $C = C_d // C_A$.

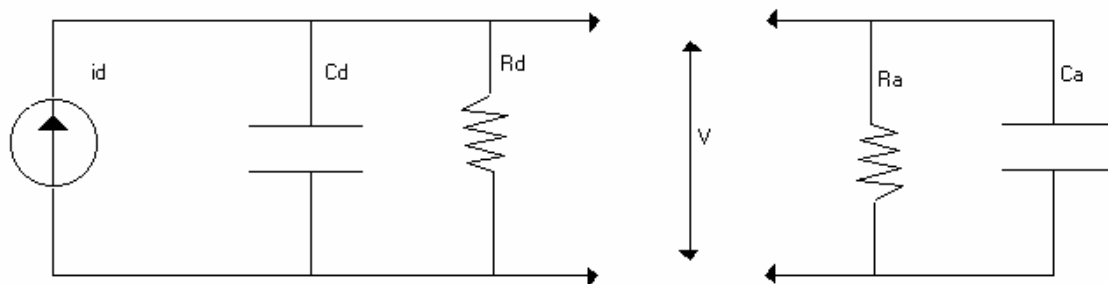


Figura 2.7a.- Circuito elétrico equivalente do detector piroelétrico e seu amplificador.

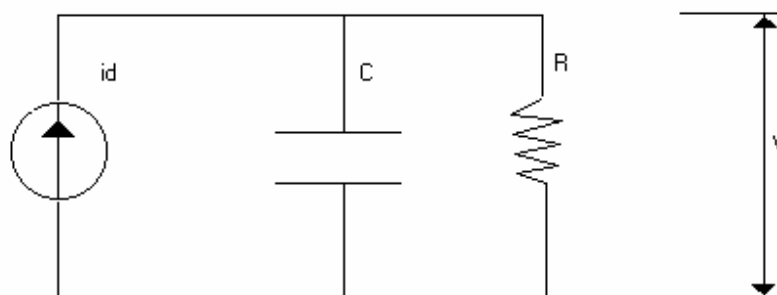


Figura 2.7b - Circuito equivalente do sistema detector-amplificador.

A corrente piroelétrica gerada é descrita por:

$$C \frac{dV}{dt} + \frac{V}{R} = i_d \quad (2.13)$$

Como mencionado anteriormente, a polarização (P_s) em um detector piroelétrico, muda com a temperatura. Uma variação ΔT na temperatura produz uma variação na polarização ΔP , que pode ser representada pela equação: $\Delta P = \Delta Q/A_d$, na qual ΔQ é a variação de carga elétrica e A_d é a área da superfície do sensor que recebe radiação. A relação $\Delta P_s/\Delta T$ é o coeficiente piroelétrico, p , do material do elemento piroelétrico. Assim tem-se:

$$\Delta Q/A_d = p\Delta T \quad (2.14)$$

Conseqüentemente,

$$i_d = pA_d \frac{d\Delta T}{dt} \quad (2.15)$$

Substituindo (2.15) em (2.13) e depois em (2.15) tem-se:

$$C \frac{dV}{dt} + \frac{V}{R} = \frac{pA_d A_r \eta \psi_0 e^{-t/\tau_T}}{C_T} \quad (2.16)$$

Considerando a condição de contorno $V = 0$ para $t = 0$, a tensão de saída do sistema detector-amplificador é dada pela equação:

$$V(t) = k \psi_0 \frac{e^{-t/\tau_T} - e^{-t/\tau_E}}{\frac{1}{\tau_E} - \frac{1}{\tau_T}} \quad (2.17)$$

na qual $k = \eta p A_d A_r / C C_T$ e $\tau_E = RC$ é a constante de tempo elétrica do circuito equivalente. Se a capacitância de entrada do amplificador for desprezível em relação à capacitância do detector, $C \approx C_T$. Levando em conta que $C = \epsilon A_d / \underline{a}$, na qual ϵ é a constante dielétrica, $\underline{a}$ é a espessura do elemento piroelétrico, ρ é a densidade e c_p o calor específico do ferroelétrico, obtém-se $k = \eta p A_r / \epsilon \rho c_p A_d$.

Quanto maior o k , maior a amplitude do sinal para uma dada exposição. O fator A_r/A_d , pode ser maximizado, mas, evidentemente, não é maior que a unidade. A fração de energia absorvida pelo detector e convertida em calor, η , dependerá da espessura e da densidade do detector, assim como da seção de choque do material ferroelétrico, que é a maneira pela qual os elétrons enxergam a superfície que irá recebê-los, que é a seção transversal fotoelétrica do material piroelétrico, portanto, quanto maior a energia maior a seção de choque observada e mais fácil a interação [19].

Finalmente, o fator $p/\epsilon \rho c_p$ envolve características físicas dos próprios ferroelétricos e representa a figura de mérito do material particular, no qual, quanto maior

for o valor do k , maior será o valor da amplitude do sinal para uma dada intensidade da radiação (taxa de fluência de energia).

2.5 A Radiação X

A radiação X é capaz de excitar e ionizar átomos da matéria com a qual interage, sendo assim, ionizante.

Os principais tipos de radiação ionizante, para a física Médica, são a radiação X, a radiação γ e elétrons de alta energia.

A radiação X é produzida quando uma substância é bombardeada por elétrons com altas velocidades. Os raios X foram descobertos em 1895, por W. C. Roentgen, quando fazia experiências com raios catódicos, que eram produzidos em um tubo de vidro, evacuado, com dois eletrodos. Entre os dois eletrodos havia uma diferença de potencial de milhares de volts e os raios catódicos (elétrons) iam do eletrodo negativo (cátodo) ao eletrodo positivo (ânodo) ou à parede do tubo. Certa vez Roentgen observou um brilho em uma peça de vidro (pote de vidro) que se encontrava à pequena distância do tubo. Mesmo quando se colocava um papel negro entre a peça e o tubo o brilho continuava persistindo. Ao surgimento deste brilho, Roentgen atribuiu a uma radiação desconhecida que era penetrante, o suficiente para atravessar o papel negro. A esta radiação Roentgen denominou de raios X [19].

Roentgen observou algumas propriedades dos raios X:

1. Constituem radiação eletromagnética. Não sofrem deflexão em campos elétricos ou magnéticos;
2. Sensibilizam chapas fotográficas;
3. Produzem fluorescência em certas substâncias;
4. São penetrantes, podendo atravessar objetos opacos à radiação visível com facilidade.

Trabalhos anteriores referem-se aos fótons de baixa energia, como raios X, e aos fótons de alta energia como raios γ . Atualmente as faixas de energia dos raios X são definidas de acordo com a tensão do tubo, da seguinte maneira:

Tabela 2.1 - Faixas de Energia do Raio X.

0,1 – 20 kV	Raios de Baixa Energia, Moles ou Raios Grenz
20 – 120 kV	Raios X na faixa de Diagnóstico
120 – 300 kV	Raios X de Ortovoltagem
300 – 1 MV	Raios X de Energia Intermediária
Acima de 1 MV	Raios X de Megavoltagem

2.6 Interações da radiação X com a matéria

Interações referem-se aos processos pelos quais a energia e / ou a direção da radiação são alteradas. Estes processos são randômicos, sendo, portanto, possível descrever-se apenas a probabilidade das interações ocorrerem. Esta probabilidade pode ser expressa em termos de vários coeficientes de interação ou de seções de choque.

Quando a radiação X penetra em um corpo absorvedor, a interação primária ocorre com um elétron do absorvedor, produzindo-se radiação espalhada e a colocação em movimento do elétron, que normalmente sai com velocidade elevada dessa interação. Este elétron com alta velocidade interage com o material do absorvedor produzindo ionização, excitação de átomos, quebra de ligação e calor. Ele pode também passar próximo ao núcleo de um átomo e produzir radiação eletromagnética, “*bremstrahlung*”[19], que por sua vez, quanto maior o arrasto do núcleo atraindo o elétron maior a liberação de energia.

2.7 Coeficiente de Atenuação Linear

Considere um feixe de raios-X paralelo, constituído de um grande número de fótons N_0 , incidindo perpendicularmente à face plana de um material. Sendo μ a probabilidade de um fóton interagir na unidade de espessura do material, a probabilidade dele interagir na espessura infinitesimal dx é dada por μdx . Incidindo N partículas na espessura dx , a variação dN , em N , devido às interações, será dada por:

$$dN = -\mu N dx \rightarrow \frac{dN}{N} = -\mu dx \quad (2.18)$$

Resolvendo a equação acima se obtém N_t , o número de partículas transmitidas, após o feixe atravessar a espessura x , $N_t = N_0 e^{-\mu x}$, onde μ é denominado coeficiente de atenuação linear e tem dimensão m^{-1} .

A espessura do material que absorve 50% da radiação incidente é denominada camada semi-redutora (HVL). Substituindo $N_t = 0,5N_0$ na equação anterior, tem-se:

$$HVL = 0,693/\mu \quad (2.19)$$

Denomina-se radiação secundária, aquela que sofreu uma interação de qualquer espécie.

Na prática, os feixes de fótons interagem com a matéria através de processos que podem gerar radiação secundária com ou sem carga, bem como radiação primária espalhada. O número total de partículas que saem do material é maior que aquele constituído apenas por radiação primária, não espalhada, sendo este número igual ao obtido pela equação $N_t = N_0 e^{-\mu x}$ multiplicado por um fator que varia de 1 a 100 e depende da espessura do atenuador, energia, área e distância do atenuador ao detector.

Este fator é denominado de “*build up*” e geralmente é obtido de forma experimental, também chamado de espessura de equilíbrio eletrônico, onde se dá o máximo de ionizações, ou seja, onde a dose é máxima.

O coeficiente de atenuação linear de um material é função da densidade deste material. Um coeficiente de atenuação mais fundamental é o coeficiente de atenuação de

massa (μ/ρ), que é a relação entre o coeficiente de atenuação linear e a densidade do material. Este coeficiente tem dimensões de m^2/kg . Uma vez que o coeficiente de atenuação de massa tem unidade de área por kg, é freqüentemente denominado de seção de choque [19].

Quando um fóton com energia, $E = h\nu$, sendo h a constante de Planck e ν a freqüência da radiação no vácuo, interage com um absorvedor, parte de sua energia é transferida para um elétron e o restante constituirá a radiação espalhada. Por outro lado o elétron em movimento poderá perder sua energia ao se chocar com o material ou produzindo “*bremsstrahlung*”.

Após muitas interações, pode-se calcular a energia média transferida do fóton para um elétron, em cada interação, E_{tr} , sendo que E_{ab} será a energia média absorvida por um elétron em cada interação. Denominando de E_{sl} a energia média perdida por “*bremsstrahlung*”, tem-se:

$$E_{tr} = E_{ab} + E_{sl} \quad (2.20)$$

Se um feixe de fótons atinge a espessura dx de um material, o número de interações que ocorre nesta espessura vem da equação $dN = -\mu N dx$, assim:

$$N_{int} = \mu N dx \quad (2.21)$$

Se a energia média transferida em cada interação for E_{tr} , a energia transferida para o material, na espessura dx será:

$$E_{transf} = N_{int} E_{tr} \quad (2.22),$$

assim tem-se:

$$E_{transf} = \mu E_{tr} N dx \quad (2.23),$$

portanto:

$$E_{transf} = (\mu E_{tr}/h\nu) N h\nu dx \quad (2.24)$$

Denomina-se ($\mu E_{tr}/h\nu$) de coeficiente linear de transferência de energia. Portanto, analogamente, pode-se definir um coeficiente linear de absorção de energia como:

$$\mu_{ab} = \mu E_{ab}/h\nu \quad (2.25)$$

O coeficiente μ_{ab} representa a fração da energia do fóton que é efetivamente absorvida pelo material. O coeficiente de absorção de energia de massa será:

$$\mu_{ab}/\rho \quad (2.26)$$

2.8 Medida da Radiação Ionizante

A comissão Internacional de Unidades e Medidas Radiológicas (ICRU) definiu diversas grandezas para quantificar a radiação ionizante, descritas a seguir:

2.8.1 Fluência (φ)

Seja N o número de fótons que incide em uma esfera finita, centrada em um ponto P , durante um determinado intervalo de tempo.

Se esta esfera for reduzida a um infinitésimo em P , sendo d_a uma área infinitesimal, perpendicular ao feixe, define-se fluência de fótons, φ , a relação entre dN e d_a .

$$\varphi = dN/d_a \text{ [m}^{-2}\text{]} \quad (2.27)$$

2.8.2 Fluência de Energia (ψ)

Seja $Nh\nu$ o valor esperado da energia total (excluindo a da massa de repouso) de um feixe de fótons que incide em uma esfera finita, centrada em um ponto P , durante um determinado intervalo de tempo.

Se a esfera for reduzida a um infinitésimo em P, sendo d_a uma área infinitesimal perpendicular ao feixe, define-se fluência de energia, ψ , a relação entre dN_{hv} e d_a .

$$\psi = dN_{hv}/d_a \text{ [Jm}^{-2}\text{]} \quad (2.28)$$

2.8.3 Taxa de Fluência de Energia ou Intensidade (Φ)

A taxa de fluência de energia, Φ , está relacionada à energia de um feixe de radiação que atravessa uma área unitária na unidade de tempo. É definida por:

$$\phi = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{dN_{hv}}{d_a} \text{ [Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{]} \text{ ou [Wm}^{-2}\text{]} \text{ ou [W/m}^2\text{]} \quad (2.29)$$

2.8.4 Exposição (X)

É definida somente para raios X e para raios γ . Foi definida pela ICRU como:

$$X = dQ/dm \text{ [Ckg}^{-1}\text{]} \quad (2.30)$$

na qual dQ é o valor absoluto de todas as cargas de mesmo sinal, produzidas no ar, quando todos os elétrons (négratrons e pósitrons) liberados por fótons numa massa de ar dm , são completamente freados no ar. A unidade de exposição é o Roentgen (R), sendo que:

$$1R = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg} \quad (2.31)$$

2.8.5 Relação entre Exposição e Taxa de Fluência de Energia

Conforme se pode constatar a resposta de um instrumento piroelétrico é diretamente proporcional à taxa de fluência de energia da radiação, assim como descrito na equação (2.17), na qual $k = pA_d A_r \eta / CC_T$ e $\tau = RC$ e $\sigma = C_T / G_T$.

O instrumento de referência que será utilizado é uma câmara de ionização, a qual mede exposição. Existe a necessidade de, a partir da exposição (ou taxa de exposição) medida com a câmara, calcular-se a intensidade da radiação.

Para estabelecer a relação entre a taxa de exposição e a taxa de fluência de energia é necessário, primeiramente, saber o valor de W , que é a energia média necessária à formação de um par de íons em um gás.

O valor de W para o ar, para raios X e para raios γ é de $33,85 \text{ eV/par íons} = 33,85 \text{ joules / coulomb}$. Portanto, a exposição de 1 (um) roentgen corresponde à absorção de energia pelo ar de $2,58 \cdot 10^{-4} [\text{C.kg}^{-1}] \cdot 33,85 [\text{J.C}^{-1}] = 8,73 \cdot 10^{-3} [\text{J kg}^{-1}]$ de ar.

Se a exposição for X em um ponto P , a energia absorvida será:

$$E = X \cdot 8,73 \cdot 10^{-3} [\text{J/kg}] \quad (2.32)$$

A energia absorvida, E , pela pequena massa de ar, dm , em P , é dada por:

$$E = \dot{\psi} (\mu_{ab}/\rho)_{ar} \quad (2.33)$$

Portanto tem-se:

$$\dot{\psi} = X \cdot 8,73 \cdot 10^{-3} / (\mu_{ab}/\rho)_{ar} [\text{W/m}^2] \quad (2.34)$$

O valor de $(\mu_{ab}/\rho)_{ar}$, que é o coeficiente de absorção de energia de massa, é tabelado em função da energia efetiva do feixe em keV e da camada semi-redutora HVL.

Esta equação é capaz de converter a taxa de exposição, medida com a câmara de ionização, em taxa fluência de energia.

2.9 O Microcontrolador

O microcontrolador 16F84, da Microchip, serviu como base para se estudar os fundamentos dos microcontroladores [20 a 26].

A *Microchip* possui várias famílias de microcontroladores. Todas oferecem diversas opções de memória de programa: *OTP (One Time Programmable)* e *EPROM (Erasable and Programmable Read Only Memory)*.

Nesta pesquisa optou-se em utilizar microcontroladores da família 16Fxxx, devido a sua disponibilidade no mercado eletrônico e pela facilidade de se encontrar material bibliográfico a respeito da mesma.

Como o sinal produzido pela câmara piroelétrica é analógico, escolheu-se a família PIC 16F777 por esta já possuir conversor AD interno e dispor de recursos através dos quais se podem detectar o pico do sinal e mostrar o seu valor em um *display* digital [27 e 28].

2.9.1 A Família PIC 16Fxxx

O dispositivo PIC 16F777 possui as seguintes características que contribuíram para sua escolha [3]:

1. Baixo consumo de Energia;
2. Modelos de controle de energia;
3. Funcionamento principal: (XT, RC osciladores, 76 μ A, 1 MHz, 2 V);
4. RC funcionamento: (7 μ A, 31,25 KHz, 2 V);
5. Funcionamento secundário: (9 μ A, 32 KHz, 2 V);
6. *Sleep*: (0,1 μ A, 2 V);
7. *Timer 1* oscilador: (1,8 μ A, 32 KHz, 2 V);
8. *Timer Watchdog*: (0,7 μ A, 2 V);
9. Duas velocidades de oscilador de *Start-Up*;
10. Três modos de cristal: (LP, XT, e HS até 20 MHz);
11. Dois modos externos de RC;
12. Um modo de *clock* externo: ECIO (até 20 MHz);

13. Bloco interno de osciladores com 8 (oito) frequências selecionáveis (31, 125, 250, 500 KHZ, 1, 2, 4, e 8 MHz);
14. Até 14 canais de conversores analógicos / digitais de 10 bits;
15. Tempo de aquisição programável;
16. Conversão disponível durante modo *Sleep*;
17. Dois comparadores analógicos;
18. Circuito programável de baixas correntes, *reset* e *brown-out* (BOR), e programáveis detectores de baixa tensão (LVD);
19. Dois *timers* de 8 bits com *Prescaler*;
20. Módulo *timer1*/RTC;
21. Contador/*timer* de 16 bits com *prescaler*;
22. Pode ser incrementado durante *Sleep* por um relógio cristal externo de 32 KHz;
23. Porta síncrona serial mestre (MSSP) com 3 (três) fios com modos SPITM e I2CTM (mestre e escravo);
24. Endereçamento Universal Síncrono;
25. Transmissor, receptor assíncrono (AUSART);
26. Três capturadores, comparadores, e módulos PWM;
27. Captura é de 16 bits, com máxima resolução de 12,5 ns;
28. Comparador é de 16 bits, com máxima resolução de 200 ns;
29. PWM máximo com resolução de 10 bits;
30. Porta paralela escrava (PSP) – 40/44 pinos somente dispositivos;
31. Monitoramento de *clock Fail-Safe* para proteção de aplicações críticas contra o descaimento do cristal;
32. Dois modos de velocidades *start-up* para execução imediata de código;

33. *Power-on reset* (POR), *Power-up timer* (PWRT), e oscilador *Start-up timer* (OST);
34. Proteção de código programável;
35. Acesso de leitura do processador à memória de programa;
36. Modo *Sleep* de salvar energia;
37. *In-circuit* serial programável por dois pinos (ICSPTM);
38. MPLAB[®] *In-circuit* eliminador de erros (ICD) via dois pinos;
39. $\overline{MCRL}$ (*master clear*) pino com função substituível com entrada somente em um pino.

As figuras 2.8a e 2.8b referem-se às características do dispositivo PIC 16F777 escolhido para a implementação do sistema.

Device	Program Memory (# Single-Word Instructions)	Data SRAM (Bytes)	I/O	Interrupts	10-bit A/D (ch)	Comparators	CCP (PWM)	MSSP		AUSART	Timers 8/16-bit
								SPI TM	I ² C TM (Master)		
PIC16F777	8192	368	36	17	14	2	3	Yes	Yes	Yes	2/1

Figura 2.8a - PIC 16F777 – Características do dispositivo.

Key Features	PIC16F777
Operating Frequency	DC – 20 MHz
Resets (and Delays)	POR, BOR (PWRT, OST)
Flash Program Memory (14-bit words)	8K
Data Memory (bytes)	368
Interrupts	17
I/O Ports	Ports A, B, C, D, E
Timers	3
Capture/Compare/PWM Modules	3
Master Serial Communications	MSSP, AUSART
Parallel Communications	PSP
10-bit Analog-to-Digital Module	14 Input Channels
Instruction Set	35 Instructions
Packaging	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP

Figura 2.8b - PIC 16F777 – Características do dispositivo.

A pinagem do dispositivo 16F777 segue as características da sua família, apresentada a seguir na figura 2.9 [27 e 28]:

PDIP (40-pin)

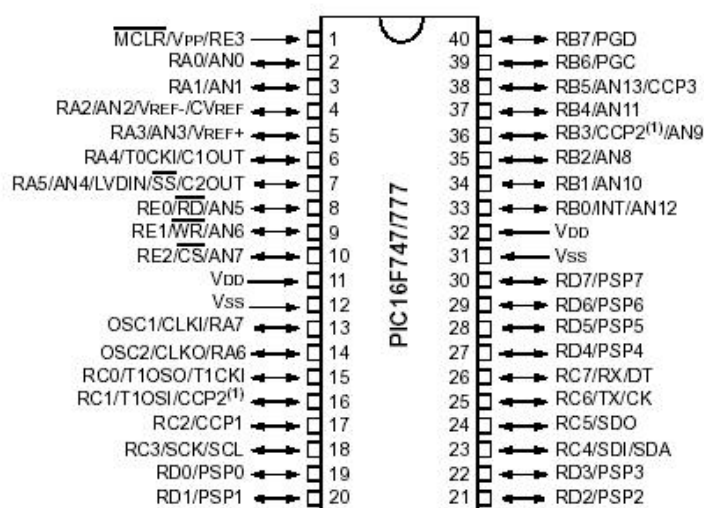


Figura 2.9 - 16F777 - Pinagem.

2.9.2 Organização da Memória

O vetor de *reset* está no endereço 0000h e o vetor de interrupção em 0004h.

A memória de dados possui múltiplos bancos que contém registradores com funções gerais e especiais. Sobre os registradores de funções especiais, são registradores de propósito gerais, que são implementados por RAM estática. As funções especiais dos bancos podem ser espelhadas em outros bancos para redução de códigos e rápido acesso.

O arquivo dos registradores pode ser acessado diretamente ou indiretamente pelo (SFR) *File Select Register* [27 e 28]. As figuras 2.10a até 2.11c, no apêndice B, ilustram a disposição da memória de programa e de dados do PIC 16F777 e seus bits responsáveis pela conversão analógico / digital.

2.10 Módulo LCD

Os módulos LCD são interfaces de saída muito úteis em sistemas microprocessados. Estes módulos podem ser gráficos e a caractere. Os módulos LCD gráficos são encontrados com resoluções de 122x32, 128x64, 240x64 e 240x128 *dots pixel*, e geralmente estão disponíveis com 20 pinos para conexão. Os LCD comuns (tipo caractere) são especificados em número de linhas por colunas e são encontrados nas configurações mais variadas como 8 colunas e 2 linhas com 14 pinos, 16 colunas e 2 linhas com 14 ou 16 pinos, entre outros. Estes módulos utilizam um controlador próprio, permitindo sua interligação com outras placas através de seus pinos. O módulo deve ser alimentado e interligado; o barramento de dados e controle do módulo interliga-se com a placa do usuário. Naturalmente que além de alimentar e conectar os pinos do módulo com a placa do usuário deverá haver um protocolo de comunicação entre as partes, que envolve o envio de *bytes* de instruções e *bytes* de dados pelo sistema do usuário, apresentados na Tabela 2.2 [27 e 28].

Tabela 2.2 - Pinagem dos Módulos LCD.

Pino	Função	Descrição
1	Alimentação	Terra ou GND
2	Alimentação	VCC ou +5V
3	V0	Tensão para ajuste de contraste
4	RS Seleção:	1 - Dado, 0 – Instrução
5	R/W Seleção:	1 - Leitura, 0 – Escrita
6	E Chip select	1 ou (1 → 0) - Habilita, 0 – Desabilitado
7	B0 LSB	
8	B1	
9	B2	Barramento
10	B3	De
11	B4	Dados
12	B5	
13	B6	
14	B7 MSB	
15	A (qdo existir)	Anodo p/ <i>LED backlight</i>
16	K (qdo existir)	Catodo p/ <i>LED backlight</i>

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Introdução

O sistema detector é constituído por uma câmara piroelétrica, um microcontrolador e um *display* digital. A câmara piroelétrica, por sua vez, é constituída por um sensor piroelétrico e por um circuito de condicionamento de sinais, alojados em um gabinete metálico.

A câmara, desenvolvida por J. B. Romero [13] e utilizada por este e por A. L. Brassalotti [14 e 15] na faixa de mamografia foi modificada, visando melhor adequá-la para utilização na faixa de ortovoltagem.

3.2 O Equipamento de Ortovoltagem

O equipamento de ortovoltagem utilizado foi o Siemens Stabilipan II, pertencente ao Hospital Universitário da UFMS (Universidade Federal do Mato Grosso do Sul), em Campo Grande. Opera com corrente de 20 mA, nas tensões do tubo de 80, 120, 180 e 200 kVp, corrente de 15 mA na tensão de 250 kVp, e de 12 mA na tensão de 300 kVp, com energia efetiva dos fótons entre 29,9 e 178,2 keV. Uma foto do equipamento é mostrada na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Equipamento de Ortovoltagem Siemens Stabilipan II.

3.3 O Equipamento de Referência

O equipamento de referência utilizado para a medição da radiação foi uma câmara de ionização FARMER DOSEMETER 2570 ($0,6 \text{ cm}^3$) da Nuclear Enterprises LTD. Sua foto é mostrada na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Câmara de Ionização Farmer 2570A.

3.4 A Energia Absorvida pelo Sensor

Para realizar a análise da quantidade efetiva de energia absorvida pelos sensores piroelétricos foram efetuadas medições utilizando-se a câmara de ionização mencionada e uma chapa de chumbo de 10 x 5 mm, espessura de 7 mm e com um orifício de diâmetro de 7 mm.

Para determinação da energia absorvida pelos sensores, inicialmente com a chapa de chumbo posicionada a 50 cm do tubo (especificação para tratamento de câncer de pele), mediu-se a exposição, com o orifício completamente aberto. O tempo de exposição foi de 1 (um) minuto. Foram realizadas cinco medições para cada tensão do tubo (80, 120, 180, 200, 250 e 300 kVp) e obtidas as médias aritméticas da exposição, para cada valor da tensão do tubo. A seguir foram realizadas medições, utilizando o mesmo procedimento experimental descrito, mas com o orifício da chapa totalmente obstruído pelo sensor piroelétrico.

3.5 Obtenção da Taxa de Fluência de Energia

Para se determinar a taxa de fluência de energia a partir da taxa de exposição, utilizou-se a equação (2.34) que está repetida nesta seção:

$$\dot{\psi} = \Phi = \frac{X.8,73.10^{-3}}{\left(\frac{\mu_{ab}}{\rho}\right)_{ar}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.34)$$

A taxa de exposição X foi medida com a câmara de ionização descrita. Esta foi colocada a 50 cm de distância do tubo de raios X e a taxa de exposição obtida em R/min.

O coeficiente de absorção de energia de massa $(\mu_{ab}/\rho)_{ar}$, para cada tensão do tubo utilizada, foi obtido após a determinação da energia efetiva dos fótons, com o auxílio das tabelas A-4e (página 732) e A-4g (página 734), da referência [19] e das camadas semi-redutoras, medidas pela física Dra. Regina Borges Prestes César, responsável pelo equipamento de ortovoltagem.

3.6 Sensores Piroelétricos

Os seguintes sensores piroelétricos foram utilizados nas medições:

- 1) Metaniobato de Chumbo, da Ferroperm Piezoceramics A/S (Dinamarca), modelo PZ35, com 12,6 mm de diâmetro e 1,0 mm de espessura;
- 2) Titanato de Chumbo Modificado, da Ferroperm Piezoceramics A/S (Dinamarca), modelo PZ34, com dimensões de 10,0 mm x 10,0 mm e 1,0 mm de espessura;
- 3) Zirconato Titanato de Chumbo com 1% de Nióbio (PZT Nb), confeccionado pelo Grupo de Cerâmicas Ferroelétricas do Departamento de Física da Universidade Federal de São Carlos, com 10,0 mm de diâmetro e 1,5 mm de espessura;
- 4) Zirconato Titanato de Chumbo com ferro (PZT Fe), confeccionado pelo Grupo de Cerâmicas Ferroelétricas, do Departamento de Física da Universidade Federal de São Carlos, com 10,0 mm de diâmetro e 1,5 mm de espessura;
- 5) Niobato de Lítio, da Inrad Internacional, com 10,0 mm de diâmetro e 1,0 mm de espessura.
- 6) Pastilha de material compósito, com 60% de PZ34 e 40% PEEK (poli éter éter cetona) confeccionado pelo Grupo de Polímeros, do Departamento de Física e Química, da Unesp, Campus de Ilha Solteira, com formato elíptico com as seguintes dimensões: eixo maior: 20 mm, eixo menor: 10 mm e espessura de 0,5 mm.

A distância do tubo de raios X aos sensores foi mantida constante em todas as medições (50 cm). A mesma geometria, utilizada para a medição da exposição com a câmara de ionização, foi empregada para se efetuar as medições com os sensores.

3.7 O Circuito de Condicionamento de Sinais

O circuito de condicionamento de sinais é constituído por um conversor corrente-tensão de alta sensibilidade [29]. O esquema do conversor é mostrado na Figura 3.3.

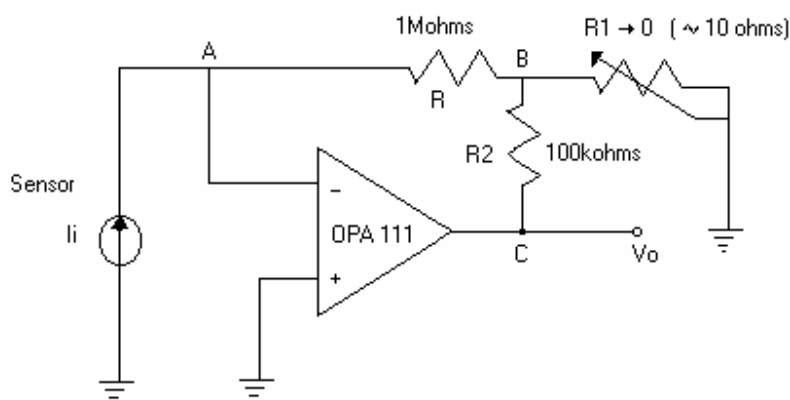


Figura 3.3 - Conversor corrente-tensão de alta sensibilidade.

O principal componente do conversor é um amplificador operacional da Burr-Brown, (OPA111), cujas características mais importantes são: elevada impedância de entrada ($10^{14}\Omega$), baixo nível de ruído, baixíssimas correntes de polarização e offset e excelente desempenho em aplicações críticas de instrumentação [30].

A relação entre o sinal de saída do conversor V_o e a corrente de entrada i_i pode ser obtida efetuando-se a soma das correntes no nó B: $(-V_B/R) - (V_B/R_1) + (V_o - V_B)/R_2 = 0$.

Considerando que $V_B = -R i_i$, tem-se $V_o = -K R i_i$, na qual $K = 1 + (R_2/R_1) + (R_2/R)$. No circuito implementado tem-se $K = 10^4$ e $K R = 10^{10}$.

O circuito foi montado em uma placa de fibra de vidro, de forma a estar o mais próximo possível do sensor.

O sinal elétrico na saída do detector de pico foi aplicado a um cabo coaxial com conector BNC, para a conexão direta com um osciloscópio, para medição da amplitude do pulso produzido pela radiação. Um circuito com microcontrolador e um *display* digital foi implementado e também pode efetuar a medição da amplitude do pico do sinal piroelétrico.

Na placa de circuito impresso foi construído um anel de guarda envolvendo as entradas do amplificador operacional e conectado eletricamente ao substrato, visando minimizar os ruídos elétricos.

3.8 A Câmara Piroelétrica

Durante quatro meses realizou-se medições no equipamento de ortovoltagem do Hospital das Clínicas da USP (Universidade de São Paulo) em Ribeirão Preto, com a câmara piroelétrica utilizada por Romero e Brassalotti [13, 14 e 15]. Observou-se que a radiação interferia no circuito de condicionamento de sinais, consequentemente, afetando a leitura do nosso sinal, tornando-o instável. Surgiu, então, a idéia de se confeccionar uma nova câmara piroelétrica, uma vez que a anterior possuía algumas partes que poderiam ser modificadas para melhor adequação ao sistema proposto.

A nova câmara piroelétrica foi construída utilizando-se uma base cilíndrica de alumínio, que foi fixada, através de uma rosca a uma parte superior também de alumínio, e à parte inferior, onde se aloca as baterias, isolando assim as baterias do circuito de condicionamento de sinais. Possui uma tampa em formato de cone, cujo diâmetro do furo interior é de 8 mm. Através deste furo a radiação-X incide no sensor. O sensor piroelétrico é conectado mecânica e eletricamente entre a parte superior de alumínio e a base de alumínio. As figuras 3.4, 3.5 e 3.6 apresentam fotos da nova câmara piroelétrica e do circuito de condicionamento de sinais feito em uma placa de fibra de vidro, utilizando-se de componentes novos.

A câmara piroelétrica nova foi testada em Ribeirão Preto no Hospital das Clínicas da USP, durante aproximadamente um mês. Contudo; como o tempo disponível para utilização do equipamento de ortovoltagem do Hospital das Clínicas da USP de Ribeirão Preto era pequeno, devido ao elevado número de pacientes que eram submetidos a tratamento com este aparelho, optou-se por utilizar um equipamento similar pertencente ao Hospital Universitário da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS), onde a disponibilidade era muito maior.



Figura 3.4 - Vista superior da câmara piroelétrica.



Figura 3.5 - Vista frontal da câmara piroelétrica.



Figura 3.6 - Interior da câmara piroelétrica.

Ainda na USP de Ribeirão Preto, constatou-se que a radiação estava interferindo no sinal gerado pela câmara piroelétrica, já que este sinal nunca apresentava medidas repetitivas. Portanto, quando fomos para Campo Grande na UFMS realizamos uma blindagem da câmara piroelétrica para impedir que a radiação de ortovoltagem atingisse os componentes do circuito de condicionamento de sinais. Utilizando-se filmes radiológicos, constatou-se, experimentalmente, que era necessário uma placa de *alloy* de 7 mm de espessura para absorver totalmente a radiação, quando a tensão do tubo de raios X era de 300 kVp. Esta liga, também conhecida como *lipowitz* ou *cerobend 70*, é constituída por 50% de bismuto, 26,9% de chumbo, 13,3% de estanho e 10% de cádmio. Possui ponto de fusão de 70°C sendo de fácil manipulação. Implementou-se uma placa de 10 mm de espessura de *alloy* para blindar a câmara piroelétrica. As Figuras 3.7 e 3.8 apresentam fotos da câmara piroelétrica com a blindagem.



Figura 3.7 - Câmara piroelétrica blindada com *alloy*, vista externa.



Figura 3.8 - Câmara Piroelétrica blindada com *alloy*, vista interna.

3.9 O Microcontrolador e o *Display* de Cristal Líquido

Houve a necessidade de se implementar um dispositivo microcontrolado porque os disparos do equipamento devem ser feitos externamente à sala de onde se encontra o aparelho de ortovoltagem. Tal medida de precaução é necessária nesta faixa de exposição.

Desenvolveu-se um programa que faz a aquisição de um sinal analógico com o microcontrolador e mostra seu valor máximo em um *display*.

Como não se conhecia, *a priori*, a amplitude do sinal piroelétrico, foi preciso desenvolver um circuito inversor (Figura 3.9), utilizando um amplificador operacional TL081, uma vez que o pico do sinal piroelétrico é negativo e o sinal de entrada do microcontrolador deve estar na faixa de 0 a 5 V. Escolhendo-se adequadamente os valores de R_1 e R_2 foi possível ajustar-se o valor da amplitude do pico do sinal piroelétrico, produzido pela radiação de ortovoltagem, para esta faixa.

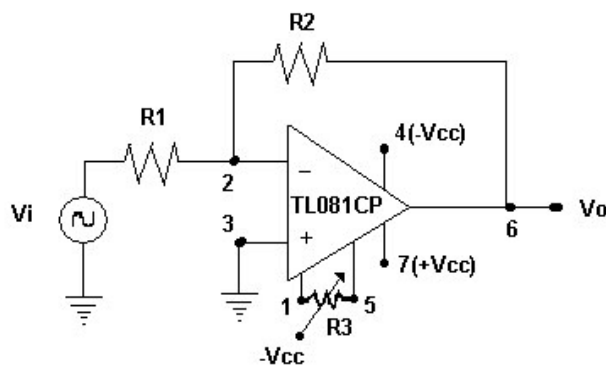


Figura 3.9 - Circuito Inversor.

Utilizou-se um *display* digital com 16 colunas e 2 linhas, disponível no Laboratório de Sensores. Este programa utiliza o *software* Mikrobasic e a linguagem Basic para realizar a programação, e para a gravação utiliza-se o *software* MPLab IDE e o gravador de PIC PICStart Plus, cuja sequência de programação é apresentada na Figura 3.10:



Figura 3.10 - Seqüência lógica das operações realizadas pelo microcontrolador.

O microcontrolador e o *display* foram montados em uma placa de circuito impresso de 10 x 10 cm, e colocados em uma caixa metálica, visando minimização de ruídos. Nas figuras 3.11 a 3.13 são apresentadas fotos desta caixa metálica.



Figura 3.11 - Foto da caixa metálica, (vista frontal).

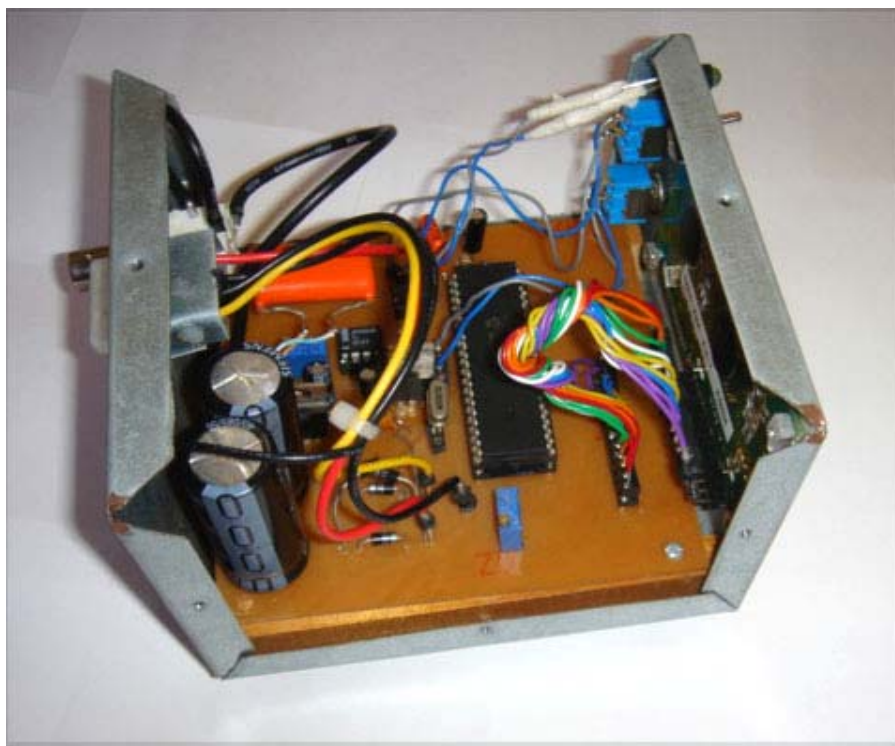


Figura 3.12 - Foto do interior da caixa metálica.

A caixa possui um conector BNC, para que no momento da leitura, o cabo coaxial que a transmite para o osciloscópio pudesse transmiti-la para a caixa com o microcontrolador. Assim existe a possibilidade de se fazer uma comparação entre as leituras obtidas.



Figura 3.13 - Foto da caixa metálica (vista posterior).

Inicialmente, realizou-se a programação do PIC com o auxílio do *software* MPLab IDE. Este utiliza programação em linguagem *assembly*. Através dele realizou-se os testes necessários para a implementação do sistema detector microcontrolado. O MPLab IDE e o gravador de PIC, denominado PICStart Plus, são as ferramentas necessárias para a simulação e gravação da programação necessária ao sistema.

A etapa seguinte foi encontrar um *software* que proporcionasse flexibilidade e rapidez na programação. Optou-se pelo Mikrobasic, que utiliza a linguagem Basic para realizar a programação dos componentes, inclusive do PIC 16F777. Exigiu certo esforço compatibilizar o MPLab IDE com o Mikrobasic e com o gravador de PIC PICStat Plus disponível no Laboratório de Sensores. A programação aplicada ao microcontrolador é apresentada no Apêndice A.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões relacionadas às medições de radiação X, na faixa de 80 a 300 kVp, produzida pelo equipamento de ortovoltagem Siemens Stabilipan II, pertencente ao Hospital Universitário da UFMS, efetuadas com o sistema detector piroelétrico implementado e com a câmara de ionização, FARMER DOSEMETER 2570, que foi o instrumento de referência de medição de radiação.

4.1 Energia Absorvida pelos Sensores Piroelétricos

Utilizando a metodologia descrita na seção 3.4, foram efetuadas medições visando determinar o percentual de radiação absorvida pelos sensores, para cada energia da radiação produzida pelo equipamento de ortovoltagem.

As Tabelas 4.1 a 4.6 mostram os resultados. A coluna “Exposição 1” indica a média de 5 leituras efetuadas com o orifício da chapa livre e a coluna “Exposição 2” indica a média de 5 leituras efetuadas com o orifício da chapa de chumbo obstruído pelos sensores piroelétricos.

Tabela 4.1 - Percentual de absorção dos sensores para tensão no tubo de 80 kVp.

	Exposição 1 (C/kg/min)	Exposição 2 (C/kg/min)	Absorção (%)
Titanato de Chumbo Modificado, PZ34.	13×10^{-4}	0,00	100,00
Metaniobato de Chumbo, PZ35.	13×10^{-4}	$2,58 \times 10^{-5}$	98,02
Niobato de Lítio.	13×10^{-4}	$4,13 \times 10^{-5}$	96,83
PZT com 1% de Nb	13×10^{-4}	0,00	100,00
PZT Fe	13×10^{-4}	0,00	100,00

PZ34 PEEK	13×10^{-4}	$8,26 \times 10^{-5}$	93,65
-----------	---------------------	-----------------------	-------

Tabela 4.2 - Percentual de absorção dos sensores para tensão no tubo de 120 kVp.

	Exposição 1 (C/kg/min)	Exposição 2 (C/kg/min)	Absorção (%)
Titanato de Chumbo Modificado, PZ34.	$19,56 \times 10^{-4}$	$8,26 \times 10^{-5}$	95,78
Metaniobato de Chumbo, PZ35.	$19,56 \times 10^{-4}$	$1,75 \times 10^{-4}$	91,03
Niobato de Lítio.	$19,56 \times 10^{-4}$	$4,13 \times 10^{-5}$	96,83
PZT com 1% de Nb	$19,56 \times 10^{-4}$	$2,58 \times 10^{-5}$	98,68
PZT Fe	$19,56 \times 10^{-4}$	$2,58 \times 10^{-5}$	98,68
PZ34 PEEK	$19,56 \times 10^{-4}$	$4,02 \times 10^{-4}$	79,42

Tabela 4.3 - Percentual de absorção dos sensores para tensão no tubo de 180 kVp.

	Exposição 1 (C/kg/min)	Exposição 2 (C/kg/min)	Absorção (%)
Titanato de Chumbo Modificado, PZ34.	$34,68 \times 10^{-4}$	$2,89 \times 10^{-4}$	91,67
Metaniobato de Chumbo, PZ35.	$34,68 \times 10^{-4}$	$6,91 \times 10^{-4}$	80,06
Niobato de Lítio.	$34,68 \times 10^{-4}$	$11,92 \times 10^{-4}$	65,63
PZT com 1% de Nb	$34,68 \times 10^{-4}$	$1,08 \times 10^{-4}$	96,88
PZT Fe	$34,68 \times 10^{-4}$	$1,24 \times 10^{-4}$	96,43
PZ34 PEEK	$34,68 \times 10^{-4}$	$11,92 \times 10^{-4}$	65,63

Tabela 4.4 - Percentual de absorção dos sensores para tensão no tubo de 200 kVp.

	Exposição 1 (C/kg/min)	Exposição 2 (C/kg/min)	Absorção (%)
Titanato de Chumbo Modificado, PZ34.	$25,95 \times 10^{-4}$	$3,46 \times 10^{-4}$	86,68
Metaniobato de Chumbo, PZ35.	$25,95 \times 10^{-4}$	$7,89 \times 10^{-4}$	69,58
Niobato de Lítio.	$25,95 \times 10^{-4}$	$12,90 \times 10^{-4}$	50,30

PZT com 1% de Nb	$25,95 \times 10^{-4}$	$1,50 \times 10^{-4}$	94,23
PZT Fe	$25,95 \times 10^{-4}$	$1,65 \times 10^{-4}$	93,64
PZ34 PEEK	$25,95 \times 10^{-4}$	$11,61 \times 10^{-4}$	55,27

Tabela 4.5 - Percentual de absorção dos sensores para tensão no tubo de 250 kVp.

	Exposição 1 (C/kg/min)	Exposição 2 (C/kg/min)	Absorção (%)
Titanato de Chumbo Modificado, PZ34.	$27,45 \times 10^{-4}$	$6,66 \times 10^{-4}$	75,75
Metaniobato de Chumbo, PZ35.	$27,45 \times 10^{-4}$	$12,33 \times 10^{-4}$	55,08
Niobato de Lítio.	$27,45 \times 10^{-4}$	$18,42 \times 10^{-4}$	32,89
PZT com 1% de Nb	$27,45 \times 10^{-4}$	$3,87 \times 10^{-4}$	85,90
PZT Fe	$27,45 \times 10^{-4}$	$4,13 \times 10^{-4}$	84,96
PZ34 PEEK	$27,45 \times 10^{-4}$	$15,79 \times 10^{-4}$	42,48

Tabela 4.6 - Percentual de absorção dos sensores para tensão no tubo de 300 kVp.

	Exposição 1 (C/kg/min)	Exposição 2 (C/kg/min)	Absorção (%)
Titanato de Chumbo Modificado, PZ34.	$12,49 \times 10^{-4}$	$4,95 \times 10^{-4}$	60,33
Metaniobato de Chumbo, PZ35.	$12,49 \times 10^{-4}$	$7,89 \times 10^{-4}$	36,78
Niobato de Lítio.	$12,49 \times 10^{-4}$	$10,37 \times 10^{-4}$	16,94
PZT com 1% de Nb	$12,49 \times 10^{-4}$	$3,46 \times 10^{-4}$	72,31
PZT Fe	$12,49 \times 10^{-4}$	$3,56 \times 10^{-4}$	71,49
PZ34 PEEK	$12,49 \times 10^{-4}$	$8,98 \times 10^{-4}$	28,10

Conforme se constata pelos resultados, apresentados nas Tabelas 4.1 a 4.6, os sensores não absorvem completamente a radiação produzida pelo equipamento de ortovoltagem. Como se pode constar os sensores PZT Nb e Fe foram os que mais absorveram, chegando a aproximadamente 71% de absorção na faixa de 300 kVp, seguido

pelo PZ 34 com absorção de 60% na mesma faixa. O sensor que menos absorveu foi o Niobato de Lítio, variando a sua absorção de 96%, em 80 kVp, para 16% em 300 kVp.

4.2 Energia efetiva dos fótons e exposição

A Tabela 4.7 mostra os valores da camada semi-redutora, energia efetiva dos fótons, o coeficiente de absorção de energia de massa e a taxa de exposição, medida conforme metodologia descrita na seção 2.8.

Tabela 4.7 - Energia dos fótons, exposição e fluência de energia.

Tensão do Tubo (kVp)	HVL	Energia dos Fótons (keV)	$(\mu_{ab}/\rho)_{ar}$ (m ² /kg)	Taxa de Exposição (C/kg/min)	Φ (W/m ²)
80	2,20 mmAl	29,92	0,0882	$76,63 \times 10^{-4}$	2,94
120	3,00 mmAl	34,69	0,0626	$116,62 \times 10^{-4}$	6,30
180	0,60 mmCu	67,13	0,10297	$212,85 \times 10^{-4}$	6,99
200	1,10 mmCu	83,67	0,0511	$165,38 \times 10^{-4}$	10,95
250	2,10 mmCu	118,68	0,02234	$172,34 \times 10^{-4}$	26,10
300	4,20 mmCu	178,19	0,00777	$85,40 \times 10^{-4}$	37,19

4.3 Medições realizadas com o sistema detector piroelétrico

A primeira análise feita foi verificar se a resposta obtida pelo sistema piroelétrico era realmente devida à radiação ou apenas interferência externa. O procedimento para este tipo de teste foi simples. Colocou-se um sensor de metaniobato de chumbo na câmara piroelétrica e uma placa de chumbo, com espessura de 7 mm sobre a janela da câmara, e efetuou-se o disparo do equipamento de raios X. Com o auxílio do osciloscópio verificou-se que não havia sinal na saída do sistema detector piroelétrico. A seguir, retirou-se a placa

de chumbo e efetuou-se novo disparo, observando-se a resposta do sistema piroelétrico, através do osciloscópio Tektronix, modelo TDS3012, conforme mostra a Figura 4.1.

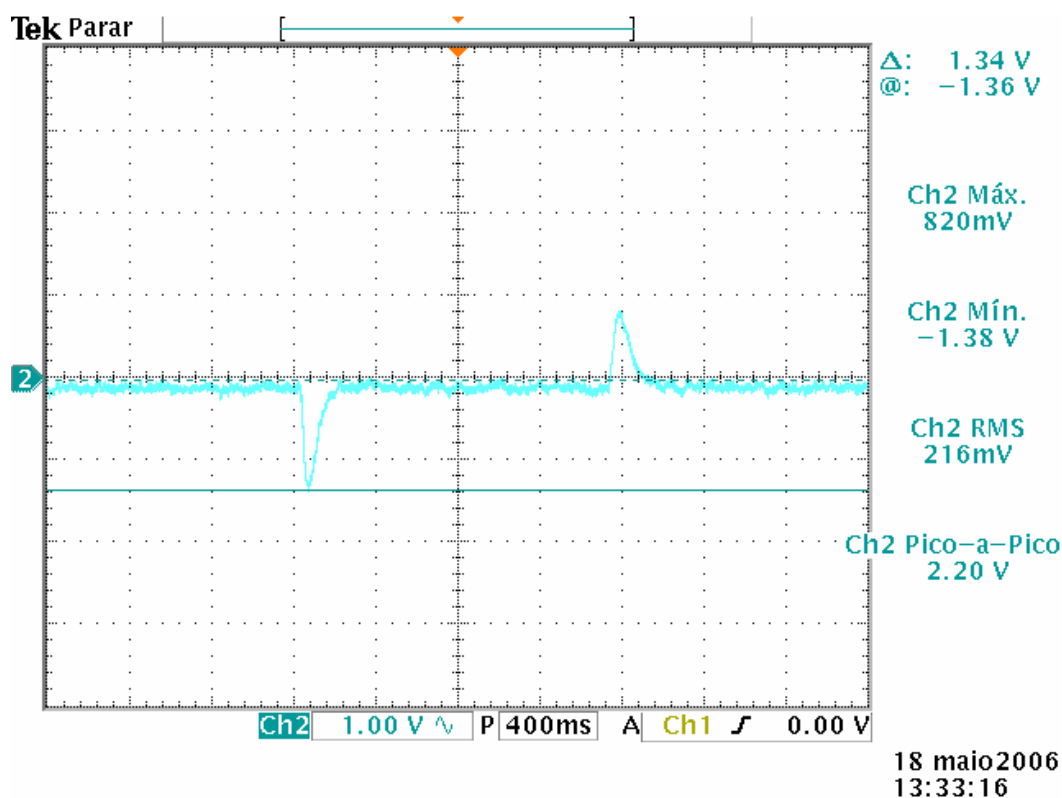


Figura 4.1 - Resposta do sistema com metaniobato de chumbo PZ35.

Constatou-se que o sinal observado era realmente devido à exposição dos sensores piroelétricos à radiação X.

4.4 Precisão do sistema

Para se avaliar a precisão do sistema detector piroelétrico com os sensores, efetuou-se dez medições em todas as energias da radiação com o osciloscópio, e para duas diferentes energias com o *display* microcontrolado.

Nas Tabelas 4.8 e 4.9 são apresentados os resultados obtidos, respectivamente, com leitura no osciloscópio e no *display* digital.

Tabela 4.8 - Precisão do sistema detector com medição da amplitude do sinal com o osciloscópio.

Tensão do tubo (kVp)	PZ35	Niobato de Lítio	PZ34	PZT Nb	PZT Fe	PZ34 PEEK
80	97,49%	98,12%	98,22%	97,79%	97,83%	97,37%
120	99,19%	98,31%	99,03%	98,61%	98,37%	98,93%
180	99,16%	98,33%	99,24%	98,84%	98,11%	98,54%
200	98,47%	98,71%	98,36%	98,03%	98,49%	98,45%
250	98,30%	97,18%	99,23%	97,95%	97,31%	97,05%
300	97,26%	97,95%	98,35%	98,08%	99,34%	98,33%

Tabela 4.9 – Precisão do sistema detector com medição da amplitude do sinal com o *display* digital.

Tensão do tubo (kVp)	PZ35	niobato de lítio	PZ34	PZT Nb	PZT Fe	PZ34 PEEK
120	97,99%	96,75%	96,40%	97,73%	96,83%	95,57%
180	97,20%	96,65%	97,82%	97,94%	97,47%	95,61%

Portanto, a precisão foi superior a 97% com o osciloscópio e superior a 95% na medição com o *display* digital.

4.5 Resposta do sistema detector piroelétrico

Este teste consistiu em utilizar, na câmara piroelétrica, todos os sensores piroelétricos descritos na Seção 3.6, irradiando-os com radiação X produzida pelo equipamento de ortovoltagem na faixa de 80 a 300 kVp.

A face anterior do sensor piroelétrico (que recebe a radiação) ficou em contato físico com a tampa de alumínio da câmara e foi eletricamente conectada ao terra do circuito. A face posterior do sensor ficou em contato físico com uma lâmina de cobre. Nesta lâmina conectou-se um fio que foi ligado diretamente na entrada do conversor corrente-tensão de alta sensibilidade. Tal configuração possibilitou um aumento do sinal

piroelétrico em relação aquele obtido quando a face posterior do sensor foi apoiada no suporte de alumínio.

A Tabela 4.10 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.10 - Resposta do sistema detector piroelétrico.

TENSÃO DO TUBO (kVp)	Φ (W/m²)	PZ35 (V)	NIOBATO DE LÍTIO (V)	PZ34 (V)	PZT Nb (V)	PZT Fe (V)	PZ34 PEEK (V)
80	2,94	1,64	2,20	2,12	1,80	1,90	1,34
120	6,30	3,28	3,00	3,70	3,04	3,00	2,76
180	6,99	1,88	1,80	2,08	1,68	2,28	1,72
200	10,95	1,76	1,64	1,80	1,50	1,88	1,50
250	26,10	1,48	1,57	1,64	1,44	1,40	1,28
300	37,19	1,08	0,92	1,14	0,98	0,96	0,76

Analisando estes resultados observa-se que não há linearidade entre a resposta do Sistema Detector Piroelétrico, com os diferentes sensores utilizados, e a taxa de fluência de energia da radiação. Isto era de se esperar, uma vez que o percentual de energia da radiação absorvida foi diferente para cada sensor e nenhum deles absorveu totalmente a radiação na faixa de ortovoltagem.

Os gráficos abaixo das Figuras 4.2 a 4.5 relacionam a resposta do Sistema Detector Piroelétrico com a taxa de fluência de energia da radiação.

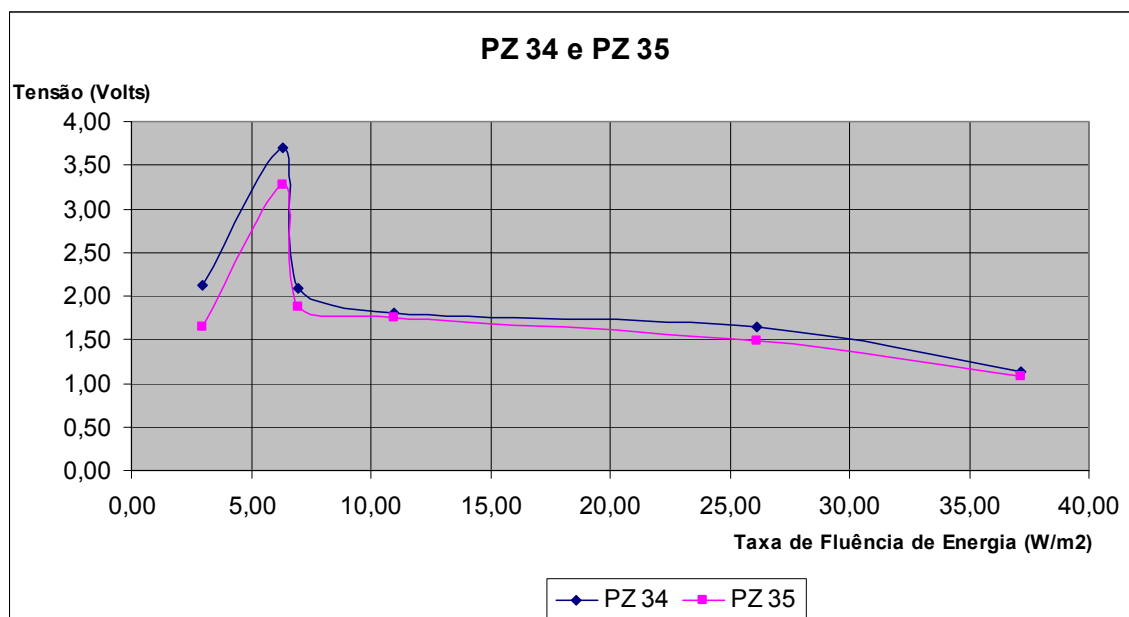


Figura 4.2 - Resposta do sistema detector piroelétrico, com os sensores PZ34 e PZ35, com a taxa de fluência de energia.

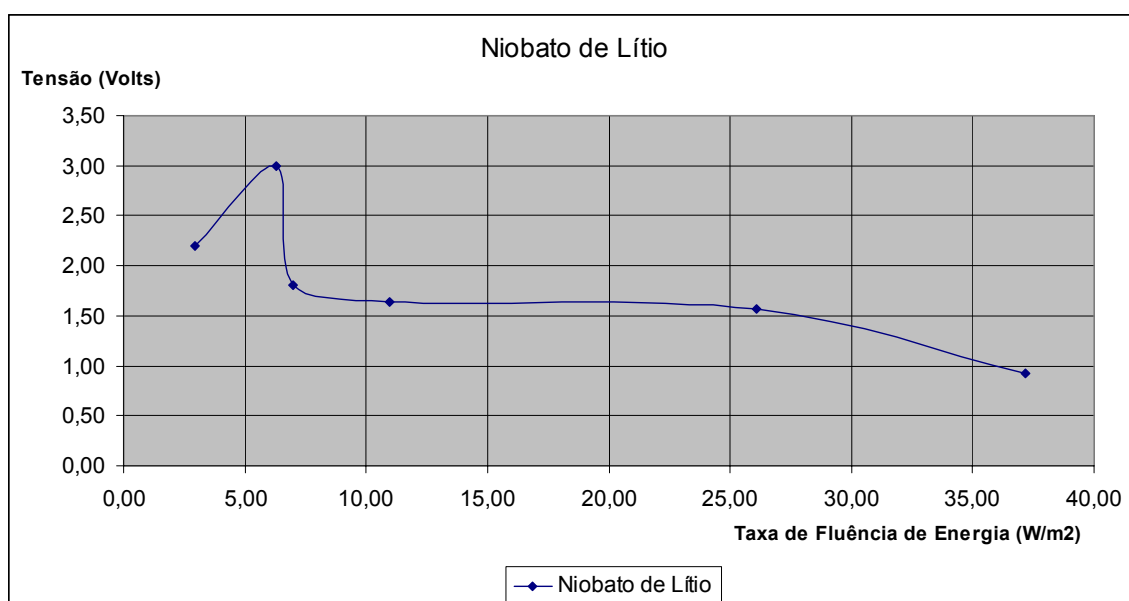


Figura 4.3 - Resposta do sistema detector piroelétrico, com o sensor de niobato de lítio, com a taxa de fluência de energia.

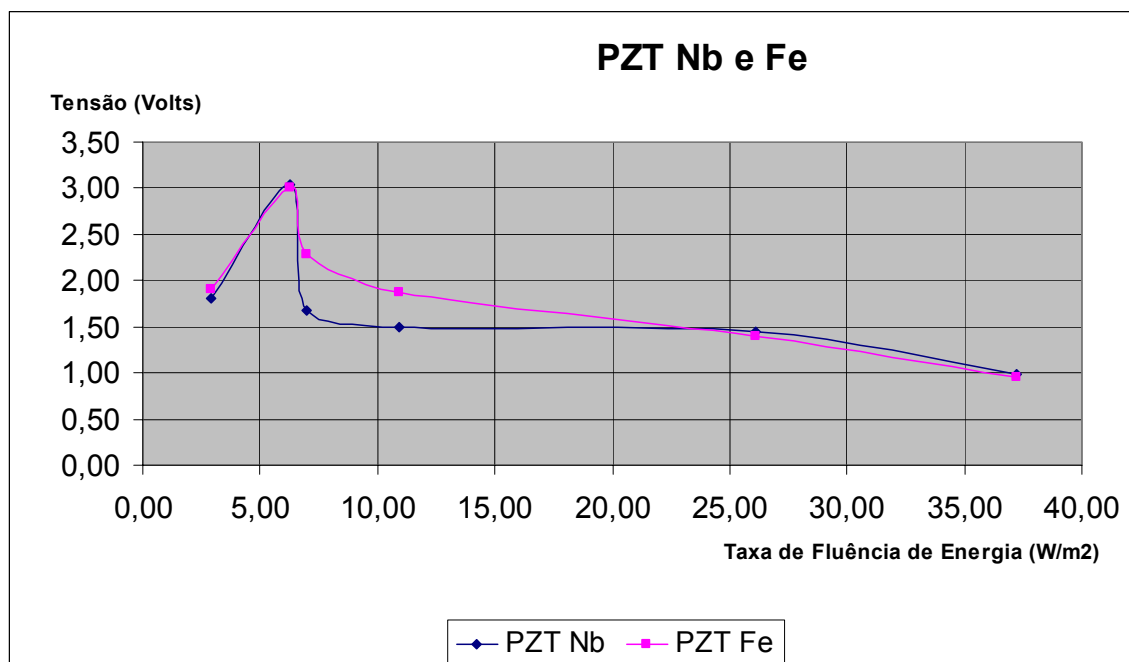


Figura 4.4 - Resposta do sistema detector piroelétrico, com os sensores PZT Nb e PZT Fe, com a taxa de fluência de energia.

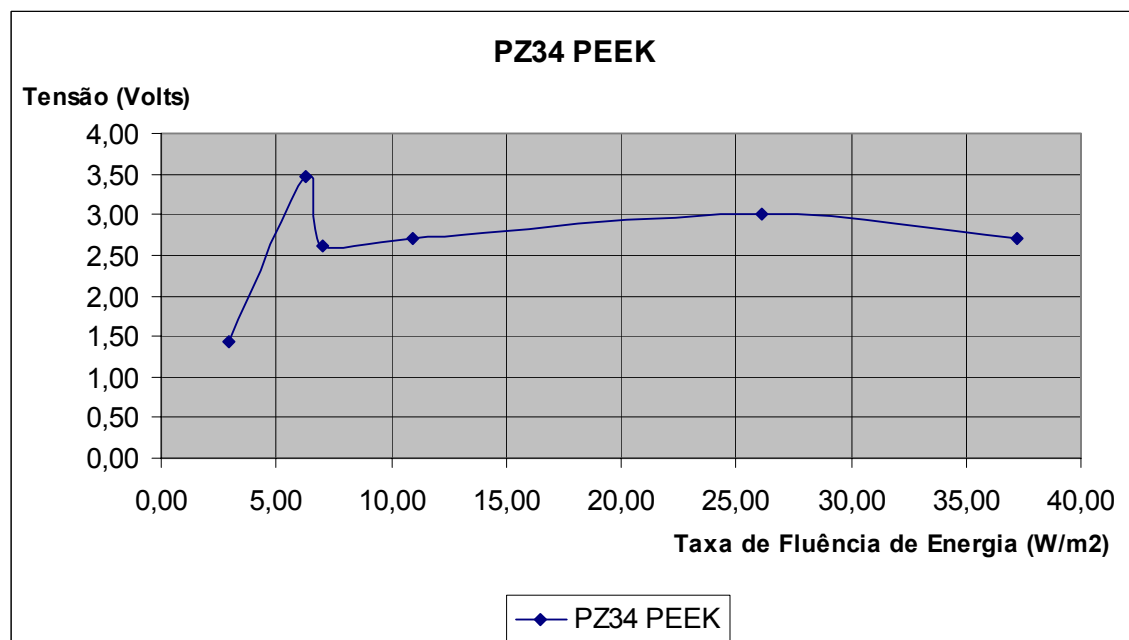


Figura 4.5 - Resposta do Sistema Detector Piroelétrico, com o sensor PZ34 PEEK, com a taxa de fluência de energia.

Analisando-se os gráficos das Figuras 4.2 a 4.5 constata-se que na faixa de 120 a 300 kVp, o sensor PZT Fe é o mais adequado para ser utilizado, por apresentar a maior sensibilidade. O gráfico da resposta do sensor em uma escala ampliada é apresentado na Figura 4.6.

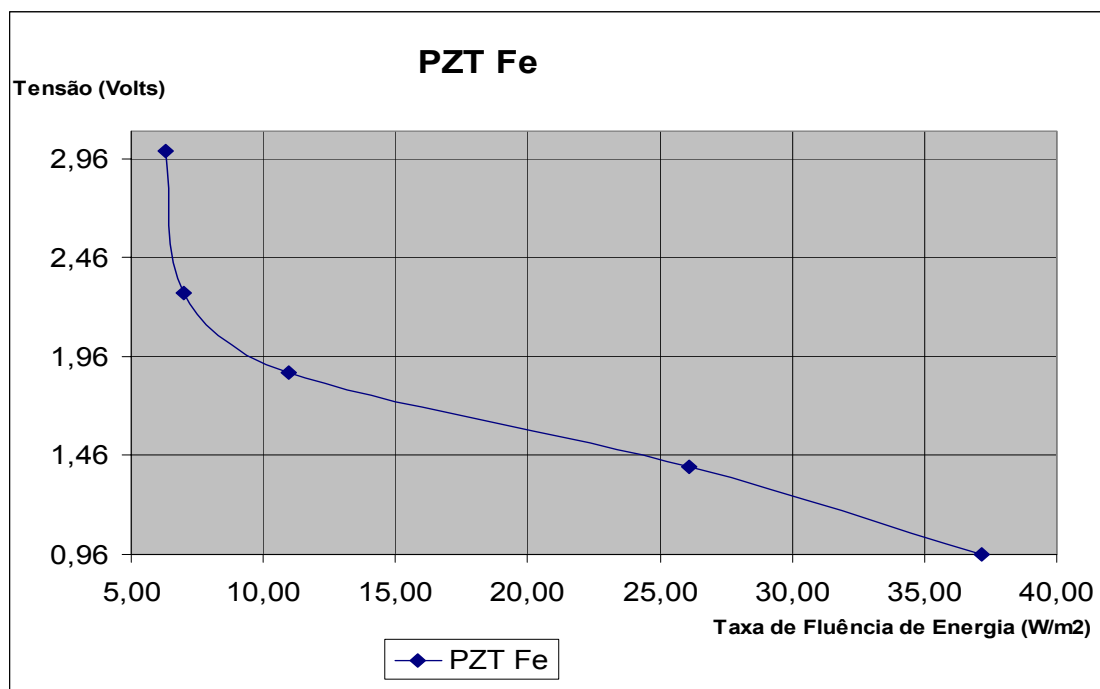


Figura 4.6 - Resposta do Sistema Detector Piroelétrico, com o sensor PZT Fe, na faixa de 120 a 300 kVp.

A curva de resposta do sensor PZT Fe com a intensidade da radiação, na faixa de 120 a 300 kVp, pode ser representada pela equação:

$$y = -0,0003x^3 + 0,0221x^2 - 0,5146x + 5,2004 \quad (4.1)$$

4.6 Resolução do sistema detector piroelétrico

O ruído máximo medido na saída do sistema detector foi de 90 mV. Assumindo que uma relação sinal ruído de no mínimo 5 (cinco) seja necessária para realizar as medições, a mínima intensidade que o sistema detector pode medir é $0,77 \text{ W/m}^2$.

4.7 Degradação dos detectores piroelétricos

Foi investigado se radiação, na faixa de ortovoltagem, altera propriedades piezoelétricas dos sensores utilizados nos experimentos.

As medições das constantes piezoelétricas foram efetuadas com um equipamento constituído por um multímetro (MICRONTA) e um medidor de constante d_{33} (Pennebaker, modelo 8000).

A Tabela 4.11 apresenta a média de 10 medições do d_{33} efetuadas antes (Valor A) e após (Valor D) os sensores serem irradiados.

Tabela 4.11 - Valor médio de d_{33} antes e após a irradiação dos sensores.

	d_{33} (Valor A) (pC/N)	d_{33} (Valor D) (pC/N)
Titanato de Chumbo Modificado, PZ34.	63	62
Metaniobato de Chumbo, PZ35.	95	93
Niobato de Lítio.	7	7
PZT com 1% de Nb	433	430
PZT Fe	190	190
PZ34 PEEK	11	11

A Figura 4.7 mostra graficamente os valores de d_{33} apresentados na Tabela 4.11, sendo os valores ilustrados na figura referentes à “Medida 1” equivalente aos valores antes

da irradiação e os referentes à “Medida 2” para os valores após a irradiação de aproximadamente 0,196 C/kg.

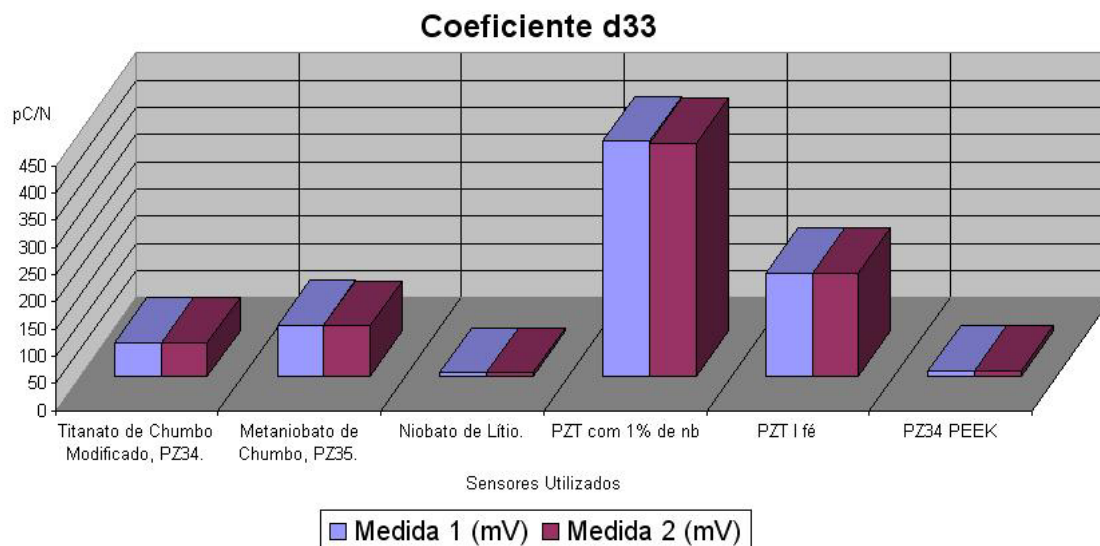


Figura 4.7 - Valor médio de d_{33} antes e após a irradiação dos sensores.

Comparando-se os resultados obtidos antes e após a irradiação, pode-se constatar que não houve variação significativa da constante piezoelétrica d_{33} dos sensores estudados. Brassalotti mostrou, experimentalmente, que não houve modificação nos valores da constante piezoelétrica d_{33} de vários tipos de sensores piezoelétricos, após os mesmos terem sido submetidos a 0,036 C/kg de radiação na faixa de mamografia [14 e 15].

Capítulo 5

Conclusões

Implementou-se um sistema detector piroelétrico para medição da intensidade de radiação X (taxa de fluência de energia) produzida por equipamento de ortovoltagem.

Construiu-se uma nova câmara piroelétrica e montou-se um novo circuito de condicionamento de sinais. Realizou-se uma blindagem completa da câmara para evitar que a radiação atingisse o circuito de condicionamento de sinais.

O sistema pode medir pulsos de raios X de 80 a 300 kVp (correspondentes às energias efetivas dos fótons entre 29,9 e 178,2 keV). Seis diferentes sensores piroelétricos foram utilizados no sistema: metaniobato de chumbo, titanato de chumbo modificado, zirconato titanato de chumbo com 1% de nióbio, zirconato titanato de chumbo dopado com ferro, niobato de lítio e uma pastilha de material compósito.

Todos os sensores apresentaram precisão superior a 97%, quando a medição do sinal piroelétrico produzido pela radiação foi realizada com um osciloscópio digital, e superior a 95% quando realizada com o *display* microcontrolado.

Os sensores não absorveram completamente a energia em toda a faixa de ortovoltagem. Uma das conseqüências deste fato é a resposta não linear do sistema detector com a intensidade da radiação.

A radiação não alterou as constantes piezoelétricas d_{33} dos seis sensores estudados, após os mesmos terem sido irradiados com 0,196 C/kg de radiação, na faixa de ortovoltagem.

Para a tensão do tubo de 120 kVp, que é a mais utilizada em ortovoltagem, o sensor que apresentou a maior sensibilidade ($0,59 \text{ V/W/m}^2$) foi o titanato de chumbo modificado e o de menor sensibilidade foi a pastilha de compósito ($0,44 \text{ V/W/m}^2$). A mínima variação da intensidade da radiação (resolução) que o sistema detector pode medir, utilizando-se o titanato de chumbo modificado, é $0,77 \text{ W/m}^2$.

O PZT Fe é o sensor mais adequado para realizar medições de radiação X na faixa de 120 a 300 kVp, pois foi o que apresentou a maior sensibilidade nesta faixa. Para a tensão do tubo de 80 kVp outros sensores podem ser utilizados.

A precisão, resolução e sensibilidade do sistema detector, com os diferentes sensores piroelétricos, na faixa da ortovoltagem, associados a seu baixo custo, construção relativamente simples, facilidade de realização das medições, podem torná-lo muito útil no monitoramento de radiação produzida por equipamentos de ortovoltagem. Possui também o potencial de medir a energia fornecida (em mJ) a pacientes submetidos a tratamentos radioterápicos de cânceres superficiais.

Na pesquisa implementada há alguns resultados inéditos relacionados à:

- 1) utilização pela primeira vez de dois diferentes PZTs e de um novo material compósito para medir radiação X;
- 2) utilização de seis diferentes sensores para medir intensidade de radiação na faixa de ortovoltagem;
- 3) estudo da variação das constantes piezoelétricas de sensores piroelétricos submetidos à radiação X de ortovoltagem.

Referências Bibliográficas

- [1] Y. Ta, “*Action of Radiations on Pyroelectric Crystals*”, *Compt. Rend.*, vol. 207, pp.1042, 1938.
- [2] J. Cooper, “*A Fast Response Pyroelectric Thermal Detector*”, *J. Sci. Instrum.*, vol.39, pp. 467-472, Aug. 1962.
- [3] J. H. Ludlow, W. H. Mitchell, E. H. Putley, and N. Shaw, “*Infra-red Radiation Detection by the Pyroelectric Effect*”, *J. Sci. Instrum.*, vol. 44, pp. 694-696, Sep. 1967.
- [4] D. L. Hester, D. D. Glower, and L. J. Overton, “*Use of ferroelectrics for gamma-ray dosimetry*”, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, vol. NS-11, pp. 145-154, 1964.
- [5] L. S. Kremenchugskii and R. Y. Strakovskaya, “*Using Pyroelectric Detectors for the Dosimetry of γ Pulsed γ Radiation*”, *Instrum. Exp. Tech.*, vol. 19, pp. 813-819, 1976.
- [6] R. Y. Strakovskaya, L. S. Kremenchugskii, and G. A. Dimoglo, “*Measurement of a Pulse of γ Radiation by Means of a Pyroelectric Receiver*”, *Instrum. Exp. Tech.*, vol. 19, pp. 1317-1319, 1976.
- [7] M. H. de Paula, A. A. de Carvalho, S. Mascarenhas, and R. L. Zimmerman, “*A New Radiation Dosimeter Using a Pyroelectric Detector*”, *Med. Phys.*, vol 11, pp. 866-868, 1984.
- [8] A. S. Beddar and P. D. Higgins, “*Use of Ferroelectric-Crystal Detectors for Electron Dosimetry*”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 37, pp. 26-29, 1990.
- [9] P. E. Cruvinel, S. Mascarenhas, J. Miranda, and R. G. Flocchini, “*The Use of a Perovskite Crystal as a Detector for Proton Beam Current*”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 39, pp. 25-28, 1992.

- [10] S. B. Crestana, S. Mascarenhas, L. P. Geraldo, and A. A. de Carvalho, “*A New Technique for Thermal Neutron Detection Using Pyroelectric Ceramics*”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol. A311, pp. 558-562, 1992.
- [11] A. A. de Carvalho, S. Mascarenhas, M. H. de Paula, and J. R. Cameron, “*Two Thermal Methods to Measure the Energy Fluence of a Brief Exposure of Diagnostic X-Rays*”, *Med.Phys.*, vol. 19, pp. 575-577, 1992.
- [12] A. A. de Carvalho & A. J. Alter, “*Measurement of X-ray Intensity in Medical Diagnostic Range by a Ferroelectric Detector*”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 44, no. 6, 1997, p. 1198-1203.
- [13] Romero, J. B., “*Medição de Intensidade de Raios X na Faixa de Mamografia*”, Dissertação de Mestrado, UNESP. Campos de Ilha Solteira, 2001.
- [14] A. L. Brassalotti & A. A. de Carvalho, “*Medição da intensidade de raios X de equipamentos de mamografia utilizando detector piroelétrico de metaniobato de chumbo*”, In: Congresso Brasileiro de Metrologia 2003, 2003, Recife. Anais do Congresso Brasileiro de Metrologia 2003. Recife: Editora do Congresso Brasileiro de Metrologia 2003, 2003. v. 1, p. 13-17.
- [15] A. A. de Carvalho, A. L. Brassalotti, M. H. de Paula & A. J. Alter, “*Use of a lithium niobate detector for measuring X-ray intensity in the mammographic range*”, Artigo submetido à *Electronics Letters*, 2004.
- [16] D. Brewster, “*Observation of the pyroelectricity of minerals*”, *Edinburgh J. Sei.*, vol. 1, 1824.
- [17] S. T. Liu & D. Long, “*Pyroelectric Detectors and Materials*”, *Proc. IEEE*, vol. 66, pp. 14-26, Jan. 1978.
- [18] Putley, E. H., “*The Applications of Pyroelectric Devices*”, Gordon and Breach, Science Publishers. Inc., *Ferroelectrics*, pp. 207-216, vol. 33, 1981.
- [19] H. E. Johns, J. R. Cunningham, *The Physics of Radiology*, 4th ed. Springfield, IL: Charles C. Thomas, pp.148, 278, 1983.

[20] Visconti, Antônio Carlos. *Microprocessadores 8080 e 8085 - Vol. 1: Hardware*. Editora Érica Ltda. 1983.

[21] Visconti, Antônio Carlos. *Microprocessadores 8080 e 8085 - Vol. 2: Software*. Editora Érica Ltda. 1983.

[22] Siemens. *SAB 8085 Assembly Language Programming*. Manual Order Number: 9800940. Estados Unidos.

[23] LASKOWSKI, L.P., TOCC, R.J. - *Microprocessadores e microcomputadores - hardware e software*. Prentice-Hall, 1983.

[24] MALVINO, Albert P. *Microcomputadores e Microprocessadores*. McGraw-Hill, São Paulo. 1985, 578p.

[25] SOUZA, D. J., “Desbravando o PIC – Baseado no Microcontrolador PIC16F84”, Editora Érica Ltda, 4º Edição. São Paulo, 2000.

[26] DATASHEET DO PIC16F84, da Microchip, obtido no site: www.microchip.com , acessado em: 10/05/2005.

[27] DATASHEET DO PIC16F777, da Microchip, obtido no site: www.microchip.com , acessado em: 10/09/2005.

[28] SOUZA, D. J., LAVINIA, N. C., “Conectando o PIC PIC16F877A: Recursos Avançados”, Editora Érica Ltda, 2º Edição. São Paulo, 2003.

[29] Franco, Sergio, **“Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits”**, second edition, WCB-McGraw-Hill, USA, 1998.

[30] BURR BROWN, **“IC Data Book”**, vol.33, p.2-55.

Apêndice A

“

```

program AD_pico_botao

'declaração das variáveis-----
dim AD_Res as word
'detector de pico-----
dim a as longint
dim AD as word
dim novo_valor as word
dim atual as word

'-----

dim txt as char[6]
dim numero as longint
'-----

'início do programa-----
main:
TRISA = %11110111      'PORTA como input exceto portA.3.
TRISD = 0              'PORTD como output (para LCD).
TRISB = 0              'PORTB como output (para LCD).
ADCON1 = %00001100     'PORTA no modo analógico,
                        ' 0 e 5V são os valores das tensões de referência,
                        ' e o resultado é alinhado à direita.
Lcd8_Config(PORTB,PORTD,2,1,0,7,6,5,4,3,2,1,0)
Lcd8_Cmd(LCD_CLEAR)     ' Limpa LCD
Lcd8_Cmd(LCD_CURSOR_OFF) ' e torna o cursor desligado.
atual = 0
eloop:
PortA.3 = 1            ' Acende o LED.
AD = ADC_Read(1)       ' Realiza a conversão A/D e armazena em AD.

```

```
'detector de pico-----
novo_valor = AD
a = novo_valor - atual
if a >=0 then
    AD_Res = novo_valor
    atual = novo_valor
else
    AD_Res = atual
end if

'botão de disparo para o LCD-----
if PortA.4 = 0 then
    PortA.3 = 0      ' Apaga LED.
    goto eloop
else
portA.3 = 1          ' Acende LED.
delay_ms(100)        ' Atraso de 100 ms.
LCD8_Out(1, 1, "Tensao") ' Apresentação na linha inferior.
delay_ms(100)        ' Atraso de 100 ms.
LCD8_Out(2, 1, "Volts") ' Apresentação na linha inferior.
delay_ms(100)        ' Atraso de 100 ms.
numero = (AD_Res * 500) div 1023 ' Executa operação de conversão para 5 V.
WordToStr(numero, txt)
'mexer diretamente no texto a ser impresso -----
txt[0]=txt[2]
txt[1]=46
txt[2]=txt[3]
txt[3]=txt[4]
txt[4]=32
txt[5]=32
txt[6]=32
'-----
LCD8_Out(1, 8, "      ") ' Limpa o display do resultado anterior.
```

```
delay_ms(100)      ' Atraso de 100 ms
LCD8_Out(1, 8, txt) 'e escrita na linha 1, caracter 8.
LCD8_Out(1, 15, " ") 'Limpa espaço não utilizado.
end if
goto eloop
end.                ' Fim do programa.
”
```

Apêndice B

As figuras 2.10a e 2.10b ilustram a disposição da memória de programa e de dados do PIC 16F777 respectivamente.

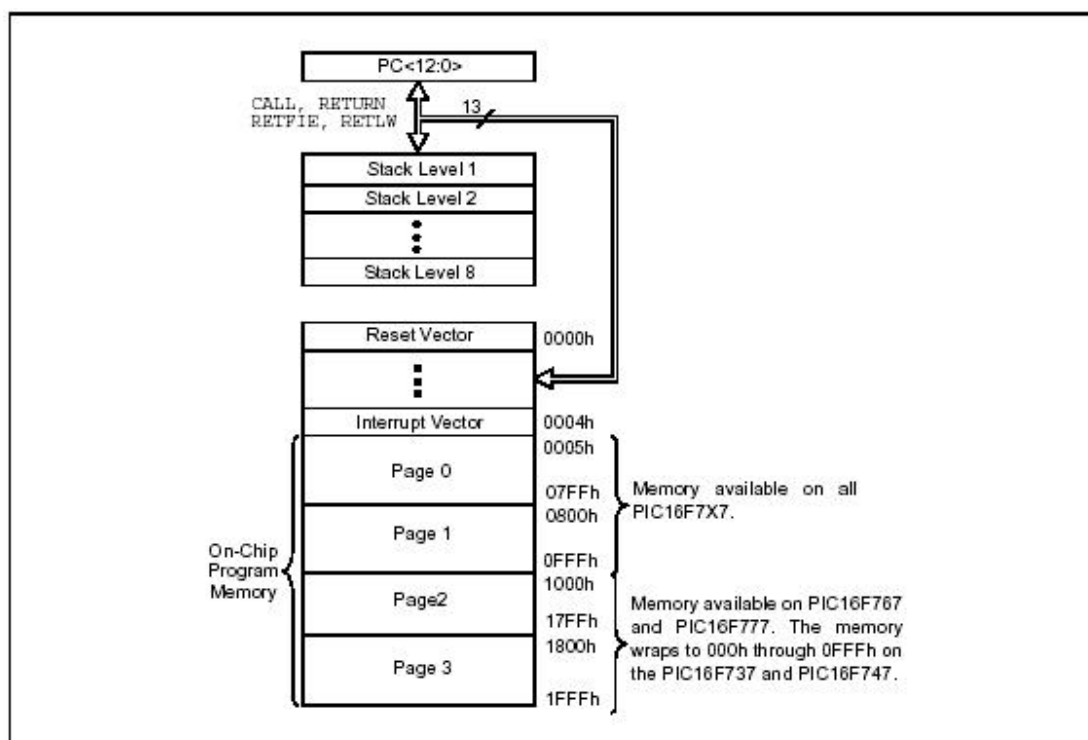


Figura 2.10a - 16F777 – Mapa de memória de programa.

File Address		File Address		File Address		File Address	
Indirect addr. ^(*)	00h	Indirect addr. ^(*)	80h	Indirect addr. ^(*)	100h	Indirect addr. ^(*)	180h
TMR0	01h	OPTION_REG	81h	TMR0	101h	OPTION_REG	181h
PCL	02h	PCL	82h	PCL	102h	PCL	182h
STATUS	03h	STATUS	83h	STATUS	103h	STATUS	183h
FSR	04h	FSR	84h	FSR	104h	FSR	184h
PORTA	05h	TRISA	85h	WDTCON	105h		185h
PORTB	06h	TRISB	86h	PORTB	106h	TRISB	186h
PORTC	07h	TRISC	87h		107h		187h
PORTD	08h	TRISD	88h		108h		188h
PORTE	09h	TRISE	89h	LVDCON	109h		189h
PCLATH	0Ah	PCLATH	8Ah	PCLATH	10Ah	PCLATH	18Ah
INTCON	0Bh	INTCON	8Bh	INTCON	10Bh	INTCON	18Bh
PIR1	0Ch	PIE1	8Ch	PMDATA	10Ch	PMCON1	18Ch
PIR2	0Dh	PIE2	8Dh	PMADR	10Dh		18Dh
TMR1L	0Eh	PCON	8Eh	PMDATH	10Eh		18Eh
TMR1H	0Fh	OSCCON	8Fh	PMADRH	10Fh		18Fh
T1CON	10h	OSCTUNE	90h		110h		190h
TMR2	11h	SSPCON2	91h	General Purpose Register 16 Bytes		General Purpose Register 16 Bytes	
T2CON	12h	PR2	92h				
SSPBUF	13h	SSPADDD	93h				
SSPCON	14h	SSPSTAT	94h				
CCPR1L	15h	CCPR3L	95h				
CCPR1H	16h	CCPR3H	96h				
CCP1CON	17h	CCP3CON	97h				
RCSTA	18h	TXSTA	98h				
TXREG	19h	SPBRG	99h				
RCREG	1Ah		9Ah				
CCPR2L	1Bh	ADCON2	9Bh				
CCPR2H	1Ch	CMCON	9Ch				
CCP2CON	1Dh	CVRCON	9Dh				
ADRESH	1Eh	ADRESL	9Eh				
ADCON0	1Fh	ADCON1	9Fh				
General Purpose Register 96 Bytes	20h	General Purpose Register 80 Bytes	A0h	General Purpose Register 80 Bytes	11Fh 120h	General Purpose Register 80 Bytes	19Fh 1A0h
	7Fh		EFh F0h		16Fh 170h		1EFh 1F0h
		Accesses 70h-7Fh		Accesses 70h-7Fh		Accesses 70h-7Fh	
Bank 0		Bank 1	FFh	Bank 2	17Fh	Bank 3	1FFh

■ Unimplemented data memory locations read as '0'.

* Not a physical register.

Figura 2.10b - Mapa da memória de dados do 16F777.

As características mais importantes que tivemos que nos ater a respeito do microcontrolador utilizado foram para os bits responsáveis pela conversão A/D. No nosso

caso, o microcontrolador 16F777 possui três bits responsáveis pela conversão A/D ilustrados a seguir nas figuras 2.11a a 2.11c [27 e 28]:

PIC16F7X7

REGISTER 12-1: ADCON0: A/D CONTROL REGISTER 0 (ADDRESS 1Fh)

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
ADCS1	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	CHS3	ADON
bit 7							bit 0

bit 7-6 **ADCS1:ADCS0:** A/D Conversion Clock Select bits

If **ADCS2** = 0:

000 = FOSC/2

001 = FOSC/8

010 = FOSC/32

011 = FRC (clock derived from an RC oscillation)

If **ADCS2** = 1:

00 = FOSC/4

01 = FOSC/16

10 = FOSC/64

11 = FRC (clock derived from an RC oscillation)

bit 5-3 **CHS<2:0>:** Analog Channel Select bits

0000 = Channel 00 (AN0)

0001 = Channel 01 (AN1)

0010 = Channel 02 (AN2)

0011 = Channel 03 (AN3)

0100 = Channel 04 (AN4)

0101 = Channel 05 (AN5)⁽¹⁾

0110 = Channel 06 (AN6)⁽¹⁾

0111 = Channel 07 (AN7)⁽¹⁾

1000 = Channel 08 (AN8)

1001 = Channel 09 (AN9)

1010 = Channel 10 (AN10)

1011 = Channel 11 (AN11)

1100 = Channel 12 (AN12)

1101 = Channel 13 (AN13)

111x = Unused

Note 1: Selecting AN5 through AN7 on the 28-pin product variant (PIC16F737 and PIC16F767) will result in a full-scale conversion as unimplemented channels are connected to VDD.

bit 2 **GO/DONE:** A/D Conversion Status bit

1 = A/D conversion cycle in progress. Setting this bit starts an A/D conversion cycle. This bit is automatically cleared by hardware when the A/D conversion has completed.

0 = A/D conversion completed/not in progress

bit 1 **CHS<3>:** Analog Channel Select bit (see bit 5-3 for bit settings)

bit 0 **ADON:** A/D Conversion Status bit

1 = A/D converter module is operating

0 = A/D converter is shut-off and consumes no operating current

Legend:

R = Readable bit

W = Writable bit

U = Unimplemented bit, read as '0'

-n = Value at POR

'1' = Bit is set

'0' = Bit is cleared

x = Bit is unknown

Figura 2.11a - Bits responsáveis pela conversão A/D do 16F777.

PIC16F7X7

REGISTER 12-2: **ADCON1: A/D CONTROL REGISTER 1 (ADDRESS 9Fh)**

R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
ADFM	ADCS2	VCFG1	VCFG0	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0
bit 7							bit 0

- bit 7 **ADFM**: A/D Result Format Select bit
 1 = Right justified. Six Most Significant bits of ADRESH are read as '0'.
 0 = Left justified. Six Least Significant bits of ADRESL are read as '0'.
- bit 6 **ADCS2**: A/D Clock Divide by 2 Select bit
 1 = A/D clock source is divided by two when system clock is used
 0 = Disabled
- bit 5 **VCFG1**: Voltage Reference Configuration bit 1
 0 = VREF- is connected to VSS
 1 = VREF- is connected to external VREF- (RA2)
- bit 4 **VCFG0**: Voltage Reference Configuration bit 0
 0 = VREF+ is connected to VDD
 1 = VREF+ is connected to external VREF+ (RA3)
- bit 3-0 **PCFG<3:0>**: A/D Port Configuration bits

	AN13	AN12	AN11	AN10	AN9	AN8	AN7	AN6	AN5	AN4	AN3	AN2	AN1	AN0
0000	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0001	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0010	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0011	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0100	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0101	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0110	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0111	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A
1000	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A
1001	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A
1010	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A
1011	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A
1100	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A
1101	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A
1110	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A
1111	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D

Legend: A = Analog input, D = Digital I/O

Note: AN5 through AN7 are only available on the 40-pin product variant (PIC16F747 and PIC16F777).

Legend:

R = Readable bit W = Writable bit U = Unimplemented bit, read as '0'
 -n = Value at POR '1' = Bit is set '0' = Bit is cleared x = Bit is unknown

Figura 2.11b - Bits responsáveis pela conversão A/D do 16F777.

PIC16F7X7

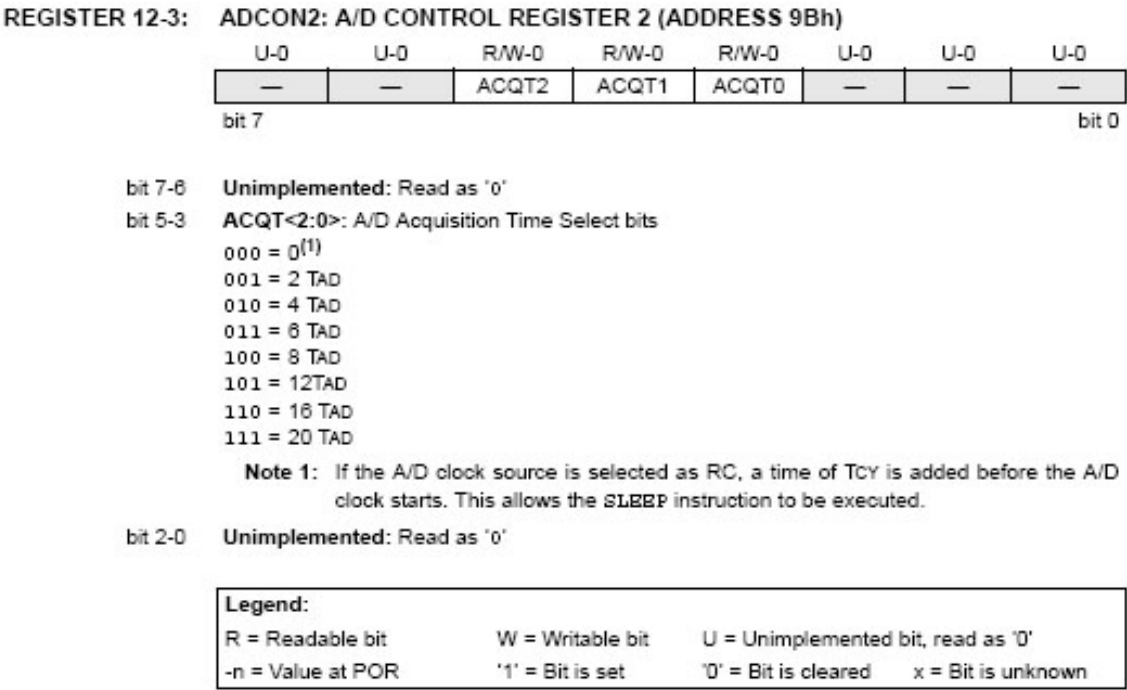


Figura 2.11c - Bits responsáveis pela conversão A/D do 16F777.