

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**Desenvolvimento de um sistema embarcado para detecção de
nêutrons térmicos e fótons de baixa energia.**

Geraldo Porto de Araújo

Belo Horizonte – MG

FEVEREIRO – 2013

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**Desenvolvimento de um sistema embarcado para detecção de
nêutrons térmicos e fótons de baixa energia.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares.

ÁREA: Aplicações das Radiações Radioproteção e Instrumentação Nuclear

Orientador: Arno Heeren de Oliveira
Universidade Federal de Minas Gerais

Geraldo Porto de Araújo

Belo Horizonte – MG

FEVEREIRO – 2013

*Dedico esta dissertação aos meus pais
que já se foram e a minha maravilhosa
filha, minha razão maior de viver.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Geraldo Antônio Nabuco de Araujo e Lêda Pôrto de Araujo, que Deus os tenha em um bom lugar, pois não só me deram a vida como me ensinaram a vivê-la, ensinando-me realizar sonhos mesmo quando tudo parecia perdido.

A minha filhinha, Bruna Moura de Araujo, adolescente começando a escrever sua história, companheira das horas da saudade e do aperto no coração razão do meu viver.

Aos meus irmãos, Haroldo e Renê por todo carinho, pelo afeto e compreensão. Em especial quero agradecer a meu irmão Haroldo meu grande mestre na arte de transpor obstáculos da vida.

Aos meus familiares, que mesmo longe sempre acreditaram em mim. A Aline e o João que me acolheram em sua residência durante todo o período em que passei em Belo Horizonte.

Aos meus professores: Tarcisio, Claubia, Auxiliadora e Arno pelas lições aprendidas e quantas? Como foi desafiante para mim este curso e como foram positivos os ensinamentos dos mestres.

O Professor Arno Heeren, pela orientação, “peça” fundamental para conclusão desta dissertação.

Ao professor Clemente Gusmão Carneiro pela participação efetiva no desenvolvimento de todo trabalho.

Ao Centro em Ciências e Técnicas das Radiações – CTR/UESC na pessoa do diretor Fermin Garcia Velasco que disponibilizou os laboratórios para execução das praticas experimentais do trabalho, e a todos do Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares – PCTN/UFMG. O qual me permitiu desenvolver esta dissertação.

A CNEN por acreditar na proposta e me conceder bolsa que de fato me ajudou muito.

Aos meus colegas por compartilharem comigo os seus conhecimentos e experiências, vocês são especiais.

Aos meus Amigos André Carneiro e Mario Roberto, pessoas raras, de imenso valor, sempre me ajudando na logística dos meus afazeres.

Não poderia esquecer meu amigo Olavo, conterrâneo responsável pela informática no Departamento de Engenharia Nuclear – DEN, sempre solícito.

E, finalmente, agradeço a todos que diretamente ou indiretamente contribuíram de alguma forma que eu chegasse até aqui. É muito bom saber que vocês fazem parte da minha vida!

RESUMO

O cristal de iodeto de lítio-6 ativado por európio é um cintilador usado para detecção de gama e nêutrons. Um sistema portátil de detecção foi construído com base nesse cintilador. Este sistema possui três módulos: o cristal de LiI(Eu), um guia de luz líquido de 10 m e o módulo da Hamamatsu H9319 usado como um digitalizador de pulso de luz. Este dispositivo além de mostrar-se sensível a raios X, raios gama e nêutrons térmicos foram registrados, em intervalos de tempo de 10 ms a 1 s, o armazenamento de até 10.000 contagens. Esta sensibilidade do sistema a radiação possibilitou seu uso para construir sondas de umidade e densidade de solos baseados respectivamente na moderação de nêutrons de rápidos e no espalhamento da radiação gama em solos quando acoplado uma fonte de fonte Amerício-Berílio (AmBe) ao cristal de LiI(Eu). Testes foram realizados para determinar a reprodutibilidade das taxas de contagem, foi medida também a radiação ambiente em várias temperaturas para verificar a influência da corrente de escuro do tubofo multiplicador do módulo H9319.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema embarcado versátil, de fácil manipulação, que preservasse os seus principais componentes contra choques mecânicos e que detectasse radiação gama e nêutron térmico. podendo ser usado como uma sonda de umidade e densidade.

Palavras-chaves: cintilador; sonda de nêutrons; detector.

ABSTRACT

Europium-activated lithium-6 iodide is a scintillator used for gamma and neutron counting. A portable detection system was built based on this scintillator. This system has three modules: the scintillator, a 10 m liquid light guide, and a Hamamatsu photon counting head H9319 used as a light pulse digitizer. Data transfer, measurement time and other necessary adjustment can be controlled by software from the PC through the RS-232C interface. The scintillator, a crystal of ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$, is a small cylinder with 3 mm diameter and 40 mm length completely sealed in an aluminum tube coupled to the light guide. The small size of the scintillator increases the neutron/gamma count ratio, since 2 to 3 mm of thickness of this crystal absorbs all thermal neutrons. Intensities of X and gamma rays, and thermal neutrons can be recorded for time intervals of 10 ms to 1 s storing up to 10000 countings. The system was calibrated for measuring radiation doses for validating numerical models in dosimetry. Two characteristic reinforce this application, measurements can be done at several meters away from the radiation source and also inside of water. In addition, it was used to build nuclear probes based on Compton scattering or neutron moderation in porous media by attaching an AmBe source to the top of the aluminum tube.

Tests were done to determine the reproducibility of counting rates. Background counting was measured at several temperatures to verify the influence of dark current of PMT. Sealed AmBe, low activity Am,

Keywords: detection system, neutron moderation e scintillator.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE SIGLAS	xi
INTRODUÇÃO	12
1 REVISÃO DA LITERATURA	16
1.1 NÊUTRON	16
1.2 DETECTORES DE NEUTRONS	18
1.3 cintiladores	18
1.4 SONDAS DE UMIDADE	19
1.5 SONDAS DE DENSIDADE	21
1.6 GUIA líquido de luz	23
1.7 eletrônica associada	25
1.8 MÓDULO H9319-01	26
2. MATERIAIS E MÉTODOS	27
2.1 FONTE DE AmBe	27
2.2 CRISTAL DE LiI(Eu)	28
2.3 GUIA LÍQUIDO DE LUZ	29
2.4 MODULO H9319-01	31
2.4.1 OPERAÇÕES BÁSICAS	32
2.4.2 TUBO FOTOMULTIPLICADOR.....	33
2.4.3 FONTE DE ALTA TENSÃO.....	34
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
3.1 CONTAGEM DE RADIAÇÃO NATURAL	40
3.2 CONTAGEM COM A FONTE DE AMericio-Berílio ACOPLADO AO SISTEMA .	41
3.3. MEDIDAS DE DENSIDADE DE MADEIRA	44
4 CONCLUSÕES	45
5 PERSPECTIVAS FUTURAS	45
6 REFERENCIAS	46
7 ANEXOS	47

7.1 Trabalho publicado no INAC – 2011 com o título FLUCTUATIONS ON THE X-RAY INTENSITY BEAM USING A PORTABLE X-RAY PROBE BASED ON ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ CRYSTAL;.....	48
7.2 Trabalho publicado no INAC – 2011 com o título PORTABLE GAMMA AND THERMAL NEUTRON PROBE USING A ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ CRYSTAL	54

LISTA DE FIGURAS E TABELA

Figura 1 Diagrama de Bloco do Módulo H9319 -01	26
Figura 3: Decaimento AmBe (Lamarsh 1975)	27
Figura 2 Diagrama do sistema embarcado	27
Figura 4 Detector de LiI(Eu) construído pela REXON utilizado no experimento. O detector possui dois revestimentos de alumínio para proteção do cristal.	28
Figura 5: Foto de um guia-liquido comercial de 3.0 metros de comprimento.	29
Figura 6 Modulo H9319-01 da Hamamatsu	31
Figura 7: Esquema da fonte de alta tensão do tipo Cockcroft-Walton (HAMAMATSU s.d.)	35
Figura 8: Forma do pulso de resposta na saída do amplificador e entrada do discriminador (HAMAMATSU s.d.)	36
Figura 9: Esquema de bloco do módulo H9319 (HAMAMATSU s.d.)	37
Figura 10: Circuito do módulo PMT H9319-01 (HAMAMATSU s.d.).....	38
Figura 11: Contador de pulsos do módulo H9319-01 (HAMAMATSU s.d.).....	39
Figura 12: Protótipo da sonda de nêutron, gama	40
Figura 13: Taxas de contagens da radiação ambiente a temperatura de 22°C nas temperaturas variando de 22 a 26°C (Gusmão 2011)	41
Figura 14: Confecção do arranjo experimental para testar as taxas de contagens dos nêutrons térmicos.	42
Figura 15: Arranjo experimental para testar as taxas de contagens dos nêutrons térmicos.	42
Figura 16: Taxas de contagens de nêutrons térmicos no centro do tubo (com parafina) e a esquerda e a direita do tubo (sem parafina).	43
Figura 17 Menu Principal do software EVAL 40.....	43
Figura 18: Blocos de madeira utilizados para teste de densidade.....	44
Figura 19: Taxas de contagem versus densidades para três blocos de madeira, A, B, C, respectivamente, com densidades de 0,96 1,06 e 0.58 gcm-3.	44
Tabela 1: Características do Tubo Fotomultiplicador R1924A.....	34

LISTA DE SIGLAS

AC – corrente alternada;
AMP – Amplificador;
CR – Corrente retificada;
Cps – contagem por segundo;
DAC – Digitalizador de corrente alternada;
DC – Corrente Digitalizada;
DCE – Corrente Digital de Entrada;
DTE – Terminal Digital de Entrada;
EVAL 40 – Programa de Avaliação;
Kev – Quilo Eletrovolt;
MeV – Mega Eletrovoltes;
NIR – radiação não Ionizante;
OSC – oscilador;
PMT – Tubo Multiplicador de Pulso;
PVC – Policloreto de vinila;
USB - Universal Serial Bus;
UV – Ultravioleta;
 σ_{abs} – Secção de choque de absorção;
 σ_{esp} – Secção de choque de Espalhamento;
 σ_T – Secção de choque total;

INTRODUÇÃO

Apesar de desconhecerem a existência dos nêutrons, os primeiros pesquisadores a trabalharem com nêutrons foram Bothe e Becker na Alemanha em 1930 e o casal Curie na França em 1931 (ANDRADE 2008). Eles estavam estudando a natureza de uma radiação penetrante, do resultado do bombardeamento de partículas - α do elemento polônio em alvos de elementos leves. Descobriram em se tratar de radiação - γ com energias de alguns MeV. Entretanto havia uma dificuldade ao se atribuir o caráter de radiação - γ para a radiação oriunda do alvo de berílio. A sua energia deveria ser muito elevada e de acordo com os estudos realizados por Webster e Joliot Curie (1932) este valor deveria ser da ordem de 50 MeV. Neste mesmo ano, Chadwick comprovou experimentalmente que esta radiação era um nêutron, uma partícula sem carga e, com massa comparável à do próton, a qual havia sido proposta por Rutherford em 1912 (ANDRADE 2008).

Emitir luz em consequência da absorção de energia é uma propriedade presente na maioria dos materiais. Notamos anteriormente que um átomo que perde elétrons fica em estado excitado, e um dos mecanismos para retornar a um estado estável envolve emissão de luz. Nos detetores cintiladores é justamente esta luz emitida que permite a detecção de partículas ionizantes. Para ser utilizável como cintilador, um material deve reunir as seguintes propriedades:

- Converter a energia cinética de partículas absorvidas em fótons, com boa eficiência;
 - A quantidade de fótons gerados deve ser linearmente proporcional a energia absorvida;
 - Ser transparente aos fótons por ele gerados, de modo que a luz possa ser transmitida a um dispositivo capaz de captá-la;
 - O processo de emissão deve ter curta duração, para que seja viável a contagem de partículas.
- Estas propriedades restringem os cintiladores a algumas classes já bem conhecidas, embora o desenvolvimento de novos cintiladores continue desde a descoberta dos primeiros: cristais orgânicos, líquidos e plásticos, cristais inorgânicos, vidros e gases.

O uso efetivo de cintiladores só foi possível depois da invenção dos tubos fotomultiplicadores (~ 1940), que convertem fótons de baixa energia em elétrons num processo semelhante ao das

avalanches em detectores a gás. Mais recentemente foram disponibilizados comercialmente os fotodiodos e diodos avalanche, que tornam ainda mais versátil o uso dos cintiladores.

Recentemente, sistemas de detecção de nêutrons térmicos e gamas baseados em cintiladores de Iodeto de lítio(LiI) foram usados em medidas de atividade, monitoramento a distância, doses da radiação e também em sondas nucleares de umidade e densidade (Frame 2011). A principal vantagem desses detectores do tipo cristais são suas dimensões. Eles podem ser obtidos em forma cilíndrica de alguns milímetros de raio e poucos centímetros de comprimento com a mesma eficiência dos detectores gasosos de nêutrons. Além disso, o desenvolvimento desses sistemas associados a guias de luz acoplado ao módulo H9319-01 da Hamamatsu pode ser decisivo na construção dessas sondas (KNOLL 2000).

Os materiais cintilantes são caracterizados pela intensidade do pulso de luz, espectro de energia dos fótons, pelo tempo de decaimento desse pulso e pela atenuação da luz no interior desses cintiladores. Eles podem ser do tipo plástico, de vidro ou na forma cristalina. Esses últimos são geralmente muito higroscópicos e se caracterizam por produzirem um maior número de fótons. Entre os mais conhecidos, estão os cristais de NaI(Tl) e LiI(Eu), respectivamente para detecção da radiação gama e nêutrons. Existe uma grande variedade de cintiladores de vidro e de plástico que podem ser usados para as mais variadas aplicações. Em particular podem-se citar os cintiladores de ${}^6\text{Li}$ ativados com Cério que podem ser usados para uma grande variedade de aplicações nucleares. Esses cintiladores são extremamente robustos sendo resistentes a todos os produtos químicos orgânicos e inorgânicos com exceção ao ácido fluorídrico. Eles também podem ser usados em ambientes hostis, proibitivos para a maioria de outros tipos de detectores. Algumas aplicações típicas desses cintiladores são:

- Detecção de nêutrons térmicos.
- Neutronografia.
- Perfis de contagens de gamas, nêutrons e radioatividade natural em poços “oil well logging”.

O processo de fabricação de fibras óticas é realizado em um forno de indução capaz de derreter o vidro em cadinho de platina. As chamadas fibras cintiladoras para nêutrons são obtidas incorporando o ${}^6\text{Li}$ e o Ce^{3+} no vidro derretido. Essas fibras óticas são utilizadas na detecção de nêutrons térmicos devido ao ${}^6\text{Li}$ ter uma grande seção de captura para nêutrons térmicos. A

reação de captura produz um íon de trício e uma partícula alfa. O íon de trício tem uma grande probabilidade de interagir com o íon de Cério, resultando na excitação de um dos elétrons do átomo de Cério. A desexcitação desses elétrons produz um “flash” de luz. Essa cintilação se propaga através da fibra até um tubo fotomultiplicador acoplado na extremidade da fibra.

Apesar do excelente desempenho dos detectores gasosos comerciais à He_3 para detectar nêutrons térmicos, em algumas aplicações eles têm limitações, principalmente pelo seu grande volume e sua baixa sensibilidade. As fibras cintiladoras sensíveis a nêutrons térmicos é uma alternativa viável para substituir os detectores a $He-3$. Usando essas fibras foi possível a construção de novos sensores comerciais de várias formas e dimensões impossíveis de serem construídos usando detectores gasosos de nêutrons térmicos. Os detectores de fibras são flexíveis, insensíveis às vibrações e tem um desempenho robusto para as aplicações de campo.

Existem várias importantes vantagens da utilização dessas fibras ou plásticas como sensores de nêutrons térmicos em substituição aos detectores convencionais construídos com tubos contendo He_3 pressurizado. Existem mais moles de 6Li no vidro do que no tubo de gás de He_3 . Além disso, esses átomos se distribuem espacialmente de maneira mais uniforme no vidro, resultando em um maior volume sensível para detecção de nêutrons, em consequência, eles apresentam uma maior sensibilidade. Do ponto de vista de segurança, tanto as fibras óticas ou detectores plásticos e de vidro enriquecidos de 6Li são seguros. Eles podem ser transportados sem cuidados especiais, inclusive na bagagem pessoal, porém o mesmo não pode ser dito em relação aos riscos de explosão dos detectores gasosos de nêutrons térmicos onde as pressões variam de 3 a 20 atmosferas. Na tabela 1, as principais características das fibras cintiladoras são comparadas aquelas dos detectores gasosos para nêutrons térmicos.

As sondas nucleares portáteis de umidade e densidade baseadas em cintiladores não sofrem interferências ou ruídos eletromagnéticos. Guias de luz transportam os pulsos de luz do cintilador para o módulo H9319-01 da Hamamatsu. Esse módulo transforma uma sequência de pulsos de luz em uma sequência de pulsos elétricos digitalizados que seguem para a porta USB de um sistema computacional onde são contados e armazenados através de um programa de computador. Assim esse trabalho pode ser considerado um avanço tecnológico ou uma extensão do conhecimento na funcionalidade de sondas nucleares. Vale ressaltar que a inovação tecnológica do sistema embarcado de detecção não está no espalhamento coerente e incoerente da

radiação gama que uma técnica conhecida e usada em vários equipamentos comerciais, mas sim na transmissão dos pulsos de luz por guias líquidos e pelo modulo H9319 da Hamamatsu. (KNOLL 2000)

O principal objetivo desse trabalho foi desenvolver um sistema para detecção de nêutrons térmicos e gama que seja fácil de operar, com boa reprodutibilidade, protegido contra choques mecânicos e que os dados de contagens possam ser armazenados diretamente em um sistema portátil de computação em tempo real.

1 REVISÃO DA LITERATURA

1.1 NÊUTRON

O nêutron é uma partícula nuclear fundamental com massa e tamanho aproximadamente igual ao do próton (núcleo de hidrogênio), mas com carga elétrica igual a zero. É instável, quando livre no espaço onde se transforma em um próton. Os nêutrons são classificados de acordo com sua energia:

- Ultra-rápidos - nêutrons com energia acima de 100 MeV;
- Rápidos - nêutrons com energia entre 1 e 100 MeV;
- Intermediários - nêutrons com energia entre 1 e 1000 keV;
- Epitérmicos-nêutrons no intervalo intermediário da termalização (0,025eV até poucos eV);
- Lentos - nêutrons com energia entre 1 e 1000 eV, região de ressonância de absorção de nêutrons por muitos núclídeos;
- Térmicos - nêutrons com velocidade correspondente ao movimento dos átomos e moléculas em temperatura ambiente. Da alta velocidade são levados ao nível térmico por moderação em material hidrogenado. Os nêutrons térmicos têm energia de aproximadamente 0,025 eV;
- Frios - nêutrons com velocidade semelhante ao movimento dos gases em temperaturas extremamente baixas. São obtidos por atenuação em blocos de grafite. Sua energia está no intervalo de 10^{10} eV. (Eisberg 1979) (Emico Okuno 1982)

O nêutron possui $\text{spin} = 1/2$, momento de dipolo magnético $\mu = - 1,913 \mu\text{N}$ ($\mu\text{N} \equiv$ magneton nuclear), a sua massa é de 1,008664904(14) u.m.a. e, se possuir carga líquida, esta deve ser menor que $1,5 \times 10^{-20} e$ ($e \equiv$ carga do elétron). A meia-vida do nêutron livre é de 12,8 minutos e decai pela emissão de um próton, um elétron e um anti-neutrino (Kaplan 1962).



De acordo com as teorias atuais, o nêutron é composto por três quarks (1 up e 2 down \rightarrow udd) e decai em um próton (uud) mediante a transformação de um quark “d”, em um “u”, ou seja (BYRNE 1995):

$$d \rightarrow u + e^- + \nu \quad (1.2)$$

Pelo fato do nêutron possuir carga nula e momento magnético nulo, a sua interação com a matéria ocorre mediante forças nucleares, ou magnéticas. Quando o nêutron interage com um alvo ele pode ser espalhado ou absorvido. No processo de espalhamento elástico a interação pode ocorrer ou como resultado de uma colisão do tipo “bola de bilhar” ou então o nêutron penetra no núcleo excitando-o e, este retorna ao seu estado fundamental emitindo um nêutron. Em ambos os casos a energia cinética do sistema nêutron - núcleo alvo se conserva. No processo de espalhamento inelástico o nêutron penetra no núcleo e este também emite um nêutron, mas neste caso a energia cinética do sistema não se conserva e parte dela é utilizada como energia de excitação nuclear. No processo de absorção o nêutron penetra no núcleo deixando-o excitado o qual retorna ao seu estado fundamental mediante a emissão de partículas e/ou de radiações – γ (GUREVICH e V 1968). (Eisberg 1979)

A probabilidade de ocorrência destes processos é caracterizada por meio de uma grandeza denominada secção de choque microscópica (σ), expressa na unidade barn ($1 \text{ barn} \equiv 10^{-24} \text{ cm}^2$). Classicamente é interpretada como uma área efetiva que o núcleo alvo apresenta ao nêutron para a ocorrência da interação. A secção de choque total (σ_T) para a ocorrência de qualquer um destes processos é dado pela soma da secção de choque espalhada (σ_{esp}) com a secção de choque absorvida (σ_{abs}) (GUREVICH e V 1968):

$$\sigma_T = \sigma_{\text{abs}} + \sigma_{\text{esp}} \quad (1.3)$$

A detecção de nêutrons não é simples devido à falta de carga dessas partículas e a peculiaridade de suas interações com a matéria. As fontes de nêutrons geram também radiação gama as quais podem interferir na sua medida. É necessário que o sistema detector seja capaz de discriminar essas interferências. Os principais tipos de detectores sensíveis aos nêutrons são: (a) gasosos, (b) auto-alimentados (self-power), (c) cintiladores e (d) semicondutores. Esses detectores possuem internamente um conversor de nêutrons para produzir radiação ionizante (Yoshimura 2010).

O conversor é um material que apresenta alta probabilidade de interação com o nêutron (alta secção de choque). A secção de choque é um parâmetro que expressa a probabilidade de

interação do nêutron com o alvo. Ela é dependente da energia do nêutron incidente. (Lamarsh 1975)

1.2 DETECTORES DE NEUTRONS

Os neutrons são detectados por vários tipos de sensores tais como: Câmaras de ionização, câmaras de fissão, cintiladores líquidos acoplados a fotomultiplicadoras, detectores proporcionais gasosos (BF_3 , H_3) e detectores semicondutores. (Frame 2011)

Radiações de mesma energia geram, nas mesmas condições de medida, maior carga no detector semicondutor comparativamente aos detectores gasosos. Isso, porque no semicondutor são necessários aproximadamente 3,6 eV para a criação de um par elétronlacuna e os detectores gasosos necessitam de aproximadamente 30 eV para a criação de um par de íons. Assim, em um detector semicondutor a energia da radiação incidente poderá ser melhor estimada, isto é, consegue-se melhor resolução do que em um detector gasoso.

O princípio de operação de um semicondutor de silício baseia-se na produção de pares de elétronlacuna quando a radiação incide no cristal. Os pares criados na região de depleção serão separados pelo campo produzido pela diferença de potencial aplicada aos seus eletrodos produzindo assim um sinal elétrico. (Frame 2011) (AVELAR 2008)

Os detectores de nêutrons mais utilizados para monitoração ambiental e controle de reatores nucleares são: as câmaras de ionização, os detectores proporcionais e os detectores cintiladores contendo substância conveniente para responder a algum efeito secundário necessário na detecção de nêutrons. (Kaplan 1962)

1.3 CINTILADORES

Um sistema de detecção de radiação é constituído de duas partes: um mecanismo detector e outro de medida. A interação da radiação com o sistema ocorre no detector e o sistema de medida interpreta esta interação. De maneira geral, os sistemas de detecção de radiação são chamados de detectores. (BACCARELLI e (2003) 2003) (JENSER 1967)

Muitos detectores são de natureza eletrônica e indicam a intensidade da radiação num determinado ponto e num determinado instante de tempo. São principalmente os detectores por ionização, os detectores a cintilação e os detectores semicondutores. Os detectores à cintilação baseiam-se na propriedade de fluorescência ou cintilação, que é o fenômeno observado em certas substâncias que emitem luz quando bombardeadas por um feixe de radiação ionizante. As cintilações produzidas pela radiação nos cristais cintiladores são amplificadas em uma válvula foto multiplicadora, que gera um pulso elétrico que é medido. Os detectores de iodeto de sódio (NaI) e Iodeto de lítio (LiI) se enquadram-se nesta categoria. (THOMPSON 1965)

1.4 SONDAS DE UMIDADE

As sondas nucleares para medidas da umidade de solos são baseadas na teoria da moderação de nêutrons. Esta teoria pode ser encontrada em Lamarsh (1975). A energia média perdida é muito maior nas colisões de nêutrons com átomos leves do que nas colisões envolvendo átomos mais pesados. O hidrogênio é o elemento mais leve de um solo e está sempre presente em quantidade apreciável, dependendo da umidade, portanto, este elemento reduz a energia cinética dos nêutrons rápidos mais eficazmente do que qualquer outro elemento presente no solo. O hidrogênio no solo está presente quase que inteiramente na forma de água e por isso a densidade de nêutrons térmicos resultante das colisões de nêutrons rápidos com o hidrogênio, é uma função do teor de água do solo. A resposta de uma sonda de nêutrons depende também da presença de outros elementos moderadores no solo, principalmente nos solos com elevados teores de matéria orgânica ou de carbonato. Neste caso a sonda de nêutrons tende a indicar uma umidade maior que aquela realmente existente no solo. Além disso, pode existir no solo elementos absorvedores de nêutrons tais como o cloro, ferro, magnésio; que produzem o efeito contrário. Neste caso, a sonda de nêutrons tende a indicar uma umidade menor do que a realmente existente. A densidade global do solo influencia a curva de calibração da sonda de nêutrons. (AVELAR 2008)

As interações dos nêutrons com os núcleos dos elementos constituintes dos solos ocorrem pelos seguintes processos: i) captura de nêutrons; ii) espalhamento de nêutrons por colisões inelásticas; iii) espalhamento de nêutrons por colisões elásticas. O principio de funcionamento da sonda de

nêutrons se baseia neste último processo. Quando um mesmo nêutron colide sucessivamente com o hidrogênio das moléculas de água sua energia é reduzida e ele pode ser termalizado e atingir uma energia da ordem dos 0,025eV. Alguns nêutrons termalizados retornam para o local de onde foram emitidos, provocando no detector de nêutrons uma taxa de reações nucleares com o ^{10}B ou o ^6Li . Essa taxa é função da umidade do solo, já que os nêutrons são termalizados principalmente pelo hidrogênio constituinte da água, devido a sua elevada seção de choque (COUCHAT 1968).

Um dos principais problemas das sondas de nêutrons está associado a sua eletrônica, nesta sonda os circuitos de alta tensão e de pré-amplificação são encapsulados em um cilindro de aço inoxidável, juntamente com a fonte radioativa ($^{241}\text{Am-Be}$ ou ^{252}Cf), dificultando sua manutenção. As sondas de nêutrons comerciais utilizam detectores proporcionais do tipo BF_3 ou H_3 . Estes detectores apresentam baixa sensibilidade aos raios gamas como também aos nêutrons rápidos emitidos pela fonte. Para se aumentar a eficiência para os neutros térmicos é comum o uso de detectores na forma de tubos com comprimentos acima de dez centímetros. Jenser (1967) estudou a viabilidade da substituição dos detectores gasosos por detectores cintiladores de cristais de LiI enriquecidos com ^6Li visando melhorar o desempenho destas sondas. Eles demonstraram que a principal vantagem destes cintiladores em relação aos detectores gasosos é sua melhor eficiência para a detecção de nêutrons térmicos. Eles são de dimensões milimétricas, porém permitem obter taxas de contagens iguais ou superiores às obtidas com tubos BF_3 ou H_3 . Contudo, como os cristais de LiI são bastante higroscópicos, eles devem ser utilizados em sistemas selados. (Yoshimura 2010)

Na década de 60 Jensen e Somer (1967) construíram uma sonda nuclear para medir a umidade de um solo baseada em um cintilador de $\text{LiI}(\text{Eu})$. O Li-6 tais como o B-10 e o He_3 têm seção de choque de absorção muito elevada para nêutrons térmicos e que decresce rapidamente à medida que a energia dos nêutrons aumenta. Os nêutrons são detectados através da reação nuclear $n + ^6\text{Li} > \text{He}_3 + \text{H}_3 + 4.78\text{MeV}$ tornando o cristal de $\text{LiI}(\text{Eu})$ viável como um detector de nêutrons térmicos. Todas as sondas de umidade seguem o mesmo princípio, o acréscimo da quantidade de água dos poros do solo aumenta a moderação de nêutrons acarretando um aumento da taxa de reações de nêutrons térmicos.

Cintiladores de iodeto de ${}^6\text{Li}$ ativado com európio $\text{LiI}(\text{Eu})$ são utilizados para a detecção de nêutrons térmicos e rápidos. O $\text{LiI}(\text{Eu})$ é semelhante ao $\text{NaI}(\text{Ti})$. Ambos os cristais são higroscópicos, por essa razão, para serem utilizados devem ser construídos em arranjos herméticos de modo a evitar que sejam expostos à umidade. O cristal cintilador $6\text{LiI}(\text{Eu})$ tem o seu uso prejudicado à temperatura ambiente por ter resposta não linear na produção dos trítios e partículas alfa, geradas na reação nuclear com o lítio. Mas, à temperatura do nitrogênio líquido apresentam boa linearidade (Zamboni 2007).

Os cintiladores de $\text{LiI}(\text{Eu})$ também podem ser usados na construção de sondas de densidade. Essas sondas se baseiam na detecção dos fótons espalhados no meio. Cada volume elementar desse meio pode ser considerado como uma fonte secundária de gamas. Para uma determinada energia do feixe dos fótons primários, a quantidade de fótons espalhados depende da densidade eletrônica e da energia de ligação dos elétrons dos átomos que compõe esse meio, em termos macroscópicos, composição química e densidade. Esses gamas podem ser absorvidos pelo meio, sofrer novo espalhamento, sair do meio ou atingir o cintilador. Assim, somente uma pequena fração desses fótons atinge o detector. Quando um fóton espalhado atinge o cintilador de LiI pode arrancar um elétron de um átomo de Li ou de I por efeito fotoelétrico ou Compton. Esse elétron progressivamente vai perdendo sua energia arrancando elétrons no interior desse cintilador resultando em um pulso de fótons com uma fração desses fótons na faixa do visível. Esses pulsos de luz são dirigidos para o fotosensor através de um guia de luz. Dessa maneira pode-se usar o mesmo sistema portátil baseado no cristal de LiI para medir a taxa de contagens da radiação espalhada e conseqüentemente a densidade do meio (Zamboni 2007).

1.5 SONDAS DE DENSIDADE

As sondas de densidade se baseiam nas interações da radiação gama com a matéria. A sonda desenvolvida nesse estudo se baseia em uma fonte ${}^{241}\text{Am}$ que emite uma radiação gama de 59,6 KeV. Portanto serão analisadas as interações fundamentais de fótons com a matéria para energias menores de 60 keV na região onde efeito fotoelétrico e espalhamento coerente e incoerente são predominantes. (THOMPSON 1965)

Nas últimas décadas, têm sido desenvolvidas novas técnicas de análise onde fótons de baixa energia que são utilizadas em uma variedade de disciplinas. A análise dessas interações utilizam aproximações simplistas que devem ser consideradas apenas como um ponto de partida. Fórmulas Klein-Nishina (KN) pressupõe a interação de uma onda eletromagnética com um elétron livre. Segundo Chatterjee *et al.* (2006), o espalhamento de fótons com elétrons ligados continua a ser um processo ainda não completamente entendido. Estudos teóricos desse espalhamento também foram realizados usando o código Monte Carlo por diversos autores. (KNOLL 2000)

As medidas de densidade pelo espalhamento Compton podem ser obtidas utilizando radiação transmitida usando uma única energia ou uma fonte emitindo dois gamas de energias diferentes dependendo da energia do fóton primário e o ângulo de dispersão. A idéia simples em que se baseiam esses métodos é o de calcular a atenuação do feixe primário e a radiação espalhada através de medições de transmissão, utilizando fontes de energia apropriadas.

Para elementos de baixo número atômico, a relação entre densidade de elétrons e a radiação espalhada é constante. Portanto, esse método pode ser usado para determinar a densidade de elétrons da amostra, mas não sua densidade mássica. Para isso seria necessário se conhecer os valor efetivo da relação Z/A da amostra. A constante de proporcionalidade pode ser determinada, realizando o conjunto das medições em uma amostra de água. Para o caso da madeira onde os elementos leves são preponderantes e a composição varia pouco acarretando um valor efetivo de Z/A quase constante, pode-se usar amostras padrões com densidades conhecidas garantindo uma correlação linear entre a radiação espalhada e a densidade da madeira (ANDRADE 2008).

Um cintilador de LiI foi usado por Mukhopadhyaya and Mchugh (2004) para construir um equipamento portátil de detecção simultânea de raios gama e nêutrons térmicos. Nesse trabalho os pulsos oriundos da radiação gama são discriminados daqueles produzidos por nêutrons usando circuitos de discriminação pela forma dos pulsos. Yang *et al.* (2011) mostraram que um cristal de cintilação do haloide, enriquecido de ^6Li , pode ser usado como detector em sistemas portáteis sensíveis a nêutron térmicos. Eles utilizaram fotodiodos como uma alternativa para substituir tubos fotomultiplicadores. Esses detectores são muitas vezes usados para trabalhar na presença de

um background elevado de radiação gama. *Baker et al.* (2007) desenvolveram um dispositivo com base em um sistema de detecção de NaI(Tl) e LiI(Eu) combinados. Este equipamento pode ser usado para monitoramento ambiental, perfis de contagens de nêutrons para estudos geológicos, bem como para equipamentos de segurança (detecção de explosivos) (Zamboni 2007).

Em trabalhos recentes realizados por Silva (2004), Teixeira (2005) e Penna (2006) foi estabelecida a viabilidade de construção de sondas de umidade de solos e densidade de madeira utilizando uma fonte de ($^{241}\text{Am} - \text{Be}$) que emite tanto fótons como nêutrons. Os sistemas de detecção foram construídos usando, respectivamente, cintiladores plásticos para a detecção de fótons e um cristal de LiI(Eu) para detectar tanto nêutrons térmicos como fótons de luz. Os pulsos de luz produzidos nesses cintiladores eram encaminhados para um tubo fotomultiplicador através de um guia líquido de luz. Os pulsos elétricos produzidos no anodo do Tubo Multiplicador de Pulso - PMT eram então pré-amplificados, amplificados e armazenados em uma placa de aquisição de dados da CANBERRA. Silva (2010) substituiu o PMT e os equipamentos associados pelo módulo H9319-01 da Hamamatsu. Isto possibilitou a construção de sondas portáteis para medida da densidade. Carneiro et al. (2011) desenvolveram um sistema similar substituindo o cintilador plástico por um detector de LiI(Eu) que pode ser utilizado tanto nas medidas de umidade como de densidade de materiais porosos. Araújo et al. (2011) usaram esse sistema para estudar as flutuações da intensidade do feixe de elétrons de um aparelho de raios X. (Araujo 2011)

1.6 GUIA LÍQUIDO DE LUZ

A transmissão de fótons de luz através dos guias líquidos de luz é baseada na reflexão total da luz no interior de tubos comerciais de Teflon AF 1600 e 2400 que apresentam índices de refração de 1,31 e 1,29, respectivamente. O índice de refração destes tubos é mais baixo do que aqueles da maioria dos líquidos em condições normais de temperatura e pressão. Os tubos de teflon AF podem ser comprados em diversos diâmetros internos. Devido ao efeito da reflexão total, eles podem transmitir a luz visível com baixas perdas quando preenchido com líquidos de índice de refração maiores do 1,31 tais como a água, etileno glicol (1,43) ou glicerina (1,47).

Nestas condições, toda a radiação proveniente de um meio aquoso que incide nas paredes do capilar recoberto com esta resina, em ângulos maiores que um ângulo limite (definido pela razão entre os índices de refração do Teflon AF 2400® e do meio aquoso), sofre reflexão total. Esta condição permite a construção de uma “fibra óptica líquida” Portanto, a utilização de um tubo de Teflon® AF, ou mesmo de um tubo de vidro ou qualquer outro material recoberto com este polímero minimiza a perda de luz do interior do guia. A perda inerente ao guia de luz é de 14 dB em 674 m se o capilar for preenchido com água (KNOLL 2000).

Os tubos capilares de Teflon AF 2400® foram usados como guias de luz de núcleo líquido para análises espectrais de absorvância e de fluorescência Raman em meio líquido de baixíssimas concentrações tem sido reportada. O guia líquido de luz é um tubo constituído de três camadas. A primeira externa tem por função impedir a entrada de luz do exterior. A segunda é metálica e tem a função de proteger o guia de luz que se encontra em seu interior. A terceira mais interna é um tubo constituído de um material específico, teflon AF, cheio de um líquido cristalino, homogêneo e transparente para guiar um feixe de luz através de um trajeto qualquer.

O tubo interno de teflon AF deve ter um índice refração baixo menor do que o da água. É desejável que os líquidos que guiam a luz possuam índice de refração muito alto em relação aquele do tubo de teflon para permitir a reflexão interna total nesse tubo. O tubo é vedado nas duas extremidades e possui em cada uma delas uma janela de vidro ou de sílica, estas extremidades não devem possuir rugosidade e devem ser bastante polidas. O guia de luz é robusto e tem longa vida quando é utilizado de modo correto.

Os guias líquidos de luz são flexíveis e duráveis em aplicações manuais ou automatizadas. Ele permite uma excelente transmissão de luz ultravioleta e luz visível numa faixa que vai de 250 a 750 nm. Também é excelente alternativa econômica no lugar dos feixes de fibras óticas. Um cabo acoplado a um cintilador pode ter comprimento de até 30.0 metros sem que haja perdas significativas de luz de uma ponta a outra. Sua flexibilidade é ótima e não há nenhuma perda quando se efetua curvas de pequeno raio. Além disso, permite um fluxo de 30% a mais de luz ultravioleta comparado às fibras óticas de vidro. É menos propenso a quebras. Está disponível com núcleos de 3,0 mm, 5,0 mm, e 8,0 mm de diâmetros e numa larga faixa de comprimentos e ótima abertura numérica, na ordem de 0,59, enquanto, para comparação, uma fibra ótica de vidro

possui abertura numérica de 0,22 a 0,25. Para revestimento externo o guia de luz pode ser protegido por uma variedade de materiais, incluindo alumínio, borracha, PVC, e aço galvanizado. O Teflon AF usado nos guias é transparente para uma excelente faixa de comprimento de ondas que vai de 20 a 2000 nm. Seu índice de refração é de 1,29, menor que da água, que é (1.33). Assim, quando um tubo com estas propriedades é cheio de água ele se comporta como um guia para a luz, transferindo-a de forma eficiente de uma ponta para outra.

Para maximizar a transferência de luz de um ponto ao outro, um guia líquido de luz oferece vantagens significantes comparadas aos feixes de fibras óticas, das quais podemos citar:

1. É mais barato que os feixes fibras óticas de tamanho equivalente;
2. Possui transmitância mais alta no comprimento ultravioleta(UV), até 300.0nm;
3. Possui transmitância mais alta no comprimento próximo ao infravermelho (NIR);
4. Ângulos de aceitação maiores
5. Produção de luz mais uniforme;
6. Alto processamento através do aumento do ângulo de aceitação, cerca de 72°, comparado aos 25° em feixes de fibras óticas.
7. Um guia líquido de luz resiste melhor a limpeza e a dobras do que as fibras de óticas de vidro. (BACCARELLI e (2003) 2003)

1.7 ELETRÔNICA ASSOCIADA

As propriedades gerais dos detectores permitem identificar a eletrônica associada. O princípio comum a todos é a transferência total ou parcial da energia de radiação a massa do detector, e a conversão dessa energia a um sinal mais acessível à percepção humana.

Modelo simplificado de um detector

- a. A carga “Q” aparece no detector em $t = 0$;
- b. As cargas “Q” devem ser coletadas para formar um sinal elétrico básico;
- c. Tipicamente, a coleta da carga é feita mediante a aplicação de um campo elétrico no interior do detector;

- d. O tempo necessário para coletar o sinal varia muito de um detector para o outro;
- e. A interação da partícula com o meio gasoso do detector ocorre em nanosegundos e nos detectores semicondutores em picosegundos. A carga Q gerada na interação é depositada no detector que junta à carga suficiente para se gerar um sinal elétrico detectável. (KNOLL 2000)

1.8 MÓDULO H9319-01

Os H9319 são projetados para realizar contagem de fóton apenas conectado-se a um PC. No modelo inclui, com 25 mm (1 ") de diâmetro de cabeça o tubo do fotomultiplicador, circuito de contagem de fótons de alta voltagem, circuito de alimentação de energia do contador e o microprocessador. Transferência de dados, medida do tempo e outros ajustes necessários podem ser controladas por comandos a partir do PC através da interface RS-232C.

Com uma série de correções de linearidade executada pelo micro-processador interno do H9319, se consegue uma excelente contagem dentro de um intervalo de $20 \times 10^6 \text{ s}^{-1} \pm 1\%$. O módulo H9319-01 tem como principais componentes um PMT, uma fonte de alta tensão, um microcontrolador para processamento de sinais eletrônicos. Ele está descrito no manual do usuário. (HAMAMATSU s.d.)

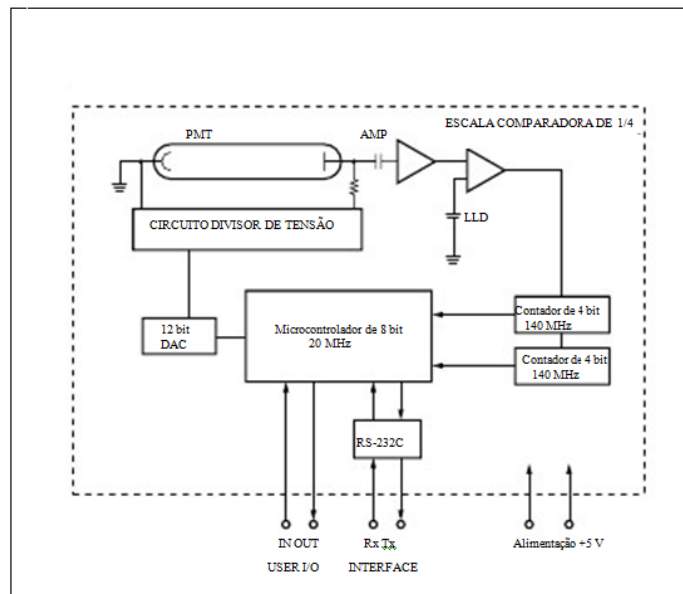


Figura 1 Diagrama de Bloco do Módulo H9319 -01

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O digrama abaixo mostra o esquema de construção da sonda de umidade e densidade.

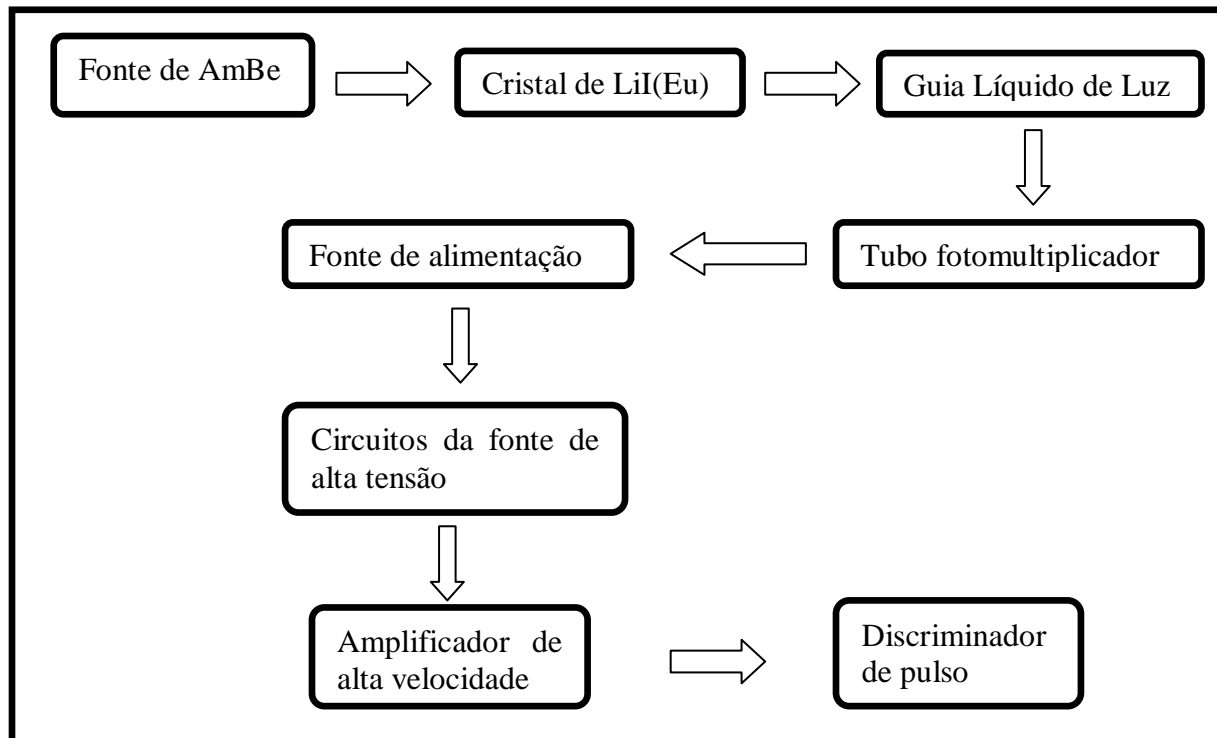


Figura 2 Diagrama do sistema embarcado

2.1 FONTE DE AMBE

O ^{241}Am no seu estado fundamental decai emitindo uma partícula alfa gerando o elemento neptúncio-237 em diferentes níveis quânticos de energia. Este isótopo quando decai para o estado fundamental emite gamas de várias energias. A Figura 03 apresenta o diagrama de decaimento do amerício-241 que mostra que a radiação gama de 59,7 keV é emitida em um percentual de 40%.

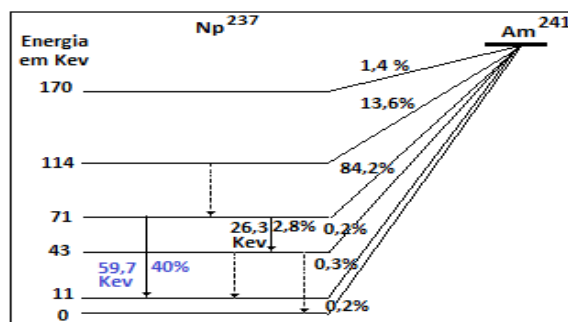


Figura 3: Decaimento AmBe (Lamarsh 1975)

Numa fonte de Am-Be, o berílio em partículas muito finas é sintetizado juntamente o ^{241}Am aumentando a superfície de contato entre os dois elementos para produzir nêutrons pelo bombardeio da partícula α emitida pelo decaimento do ^{241}Am com o núcleo do berílio. As fontes de Am-Be são usadas em várias aplicações tais como: perfilhamento de poços de petróleo, análise de materiais em ensaios não-destrutivos, em espessuras ligas leves, vidro, plásticos e borracha em que fontes de partículas β não são adequadas. Nos testes do sistema portátil ela é usada como fontes de radiação γ de 60 KeV e de nêutrons rápidos na faixa de 2-10 Mev. Os nêutrons e gamas são emitidos nas taxas de 10^4 n/s e 10^7 gamas/s respectivamente, com uma atividade de 20×10^7 Bq. (ANDRADE 2008) (Lamarsh 1975)

2.2 CRISTAL DE LI(EU)

O de cristal de Iodeto de Lítio foi adquirido diretamente da empresa REXON. Entre vários cristais usados como cintilador o de LiI(Eu) é o mais higroscópico. As dimensões desse cintilador são 3,2mm de diâmetro por 41.0mm de comprimento. A Figura 04 mostra uma radiografia deste detector. Podemos notar que por ser muito higroscópico este detector possui um encapsulamento de 1,20mm de alumínio junto ao cristal com uma janela de vidro para a passagem do pulso de luz. Além do um revestimento externo de 1,2 mm que fixa o cristal ao guia-líquido. O tamanho pequeno do cintilador aumenta a proporção de contagem de nêutrons térmicos em relação aos nêutrons rápidos desde que 2 a 3 mm de espessura deste cristal já são suficientes para absorver todos os nêutrons térmicos. (BYRNE 1995)

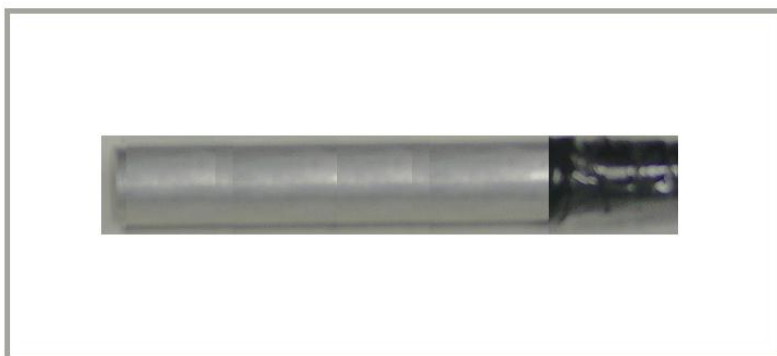


Figura 4 Detector de LiI(Eu) construído pela REXON utilizado no experimento. O detector possui dois revestimentos de alumínio para proteção do cristal.

2.3 GUIA LÍQUIDO DE LUZ

O guia líquido de luz é um tubo constituído de três camadas. A primeira externa tem por função impedir a entrada de luz do exterior. A segunda é metálica e tem a função de proteger o guia de luz que se encontra em seu interior. A terceira mais interna é um tubo constituído de um material específico, teflon AF, cheio de um líquido cristalino, homogêneo e transparente para guiar um feixe de luz através de um trajeto qualquer. A figura 05 mostra um guia líquido comercial.

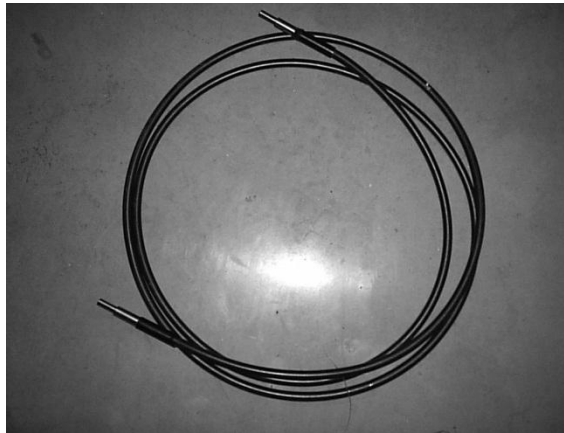


Figura 5: Foto de um guia-líquido comercial de 3.0 metros de comprimento.

O tubo interno de teflon AF deve ter um índice refração baixo menor do que o da água. É desejável que os líquidos que guiam a luz possuam índice de refração muito alto em relação aquele do tubo de teflon para permitir a reflexão interna total nesse tubo. O tubo é vedado nas duas extremidades e possui em cada uma delas uma janela de vidro ou de sílica, estas extremidades não devem possuir rugosidade e devem ser bastante polidas. O guia de luz é robusto e tem longa vida quando é utilizado de modo correto. (ANDRADE 2008)

Os guias líquidos de luz são flexíveis e duráveis em aplicações manuais ou automatizadas. Ele permite uma excelente transmissão de luz ultravioleta e luz visível numa faixa que vai de 250 a 750 nm. Também é excelente alternativa econômica no lugar dos feixes de fibras óticas. Um cabo acoplado a um cintilador pode ter comprimento de até 30.0 metros sem que haja perdas significativas de luz de uma ponta a outra. Sua flexibilidade é ótima e não há nenhuma perda quando se efetua curvas de pequeno raio. Além disso, permite um fluxo de 30% a mais de luz ultravioleta comparado às fibras óticas de vidro. É menos propenso a quebras. Está disponível

com núcleos de 3,0 mm, 5,0 mm, e 8,0 mm de diâmetros e numa larga faixa de comprimentos e ótima abertura numérica, na ordem de 0,59, enquanto, para comparação, uma fibra ótica de vidro possui abertura numérica de 0,22 a 0,25. Para revestimento externo o guia de luz pode ser protegido por uma variedade de materiais, incluindo alumínio, borracha, PVC, e aço galvanizado. O Teflon AF usado nos guias é transparente para uma excelente faixa de comprimento de ondas que vai de 20 a 2000 nm. Seu índice de refração é de 1,29, menor que da água, que é (1.33). Assim, quando um tubo com estas propriedades é cheio de água ele se comporta como um guia para a luz, transferindo-a de forma eficiente de uma ponta para outra.

Para maximizar a transferência de luz de um ponto ao outro, um guia líquido de luz oferece vantagens significantes comparadas aos feixes de fibras óticas, das quais podemos citar:

1. É mais barato que os feixes fibras óticas de tamanho equivalente;
2. Possui transmitância mais alta no comprimento ultravioleta(UV), até 300.0nm;
3. Possui transmitância mais alta no comprimento próximo ao infravermelho (NIR);
4. Ângulos de aceitação maiores
5. Produção de luz mais uniforme;
6. Alto processamento através do aumento do ângulo de aceitação, cerca de 72°, comparado aos 25° em feixes de fibras óticas.
7. Um guia líquido de luz resiste melhor a limpeza e a dobras do que as fibras de óticas de vidro.

Os guias líquidos de luz usados no presente trabalho foram desenvolvidos utilizando-se da resina fabricada pela Du Pont que são denominados de Teflon AF. Estes tubos são preenchidos com etileno glicol, e tem como característica principal a baixa perda de fótons devido a sua excelente transparência e ao baixo índice de refração. Essas características permitem a transmissão dos fótons do cintilador para o fotocatodo com perdas, praticamente desprezíveis, através da reflexão total. O índice de refração do teflon AF é de 1,29 e do etileno glicol 1,43. (KNOLL 2000)

Os guias líquido de luz já montados, utilizados no experimento foram adquiridos da empresa ROFFIN. Esses guias são comercialmente disponíveis em vários comprimentos e diâmetros diferentes. A figura 5 mostra um tubo de 3 metros. Importantes características desses guias são a

sua flexibilidade e a proteção contra impactos mecânicos ou meios agressivos. A mangueira pode ser curvada sem ser danificada e em cada uma de suas extremidades é colocada uma peça de metal para acoplar o guia de Teflon AF respectivamente ao cintilador e ao fotocatodo do PMT.

2.4 MODULO H9319-01

O objetivo maior do modulo H9319-01 da Hamamatsu foi desenvolver um contador de fótons com resposta rápida quando comparado aos contadores mais disponíveis que são lentos e degradam as respostas dos tubos fotomultiplicadores e amplificadores de banda larga. A solução óbvia foi integrar os contadores em um sistema embarcado e encontrar uma maneira de enviar a contagem acumulada para o usuário. A inclusão de um microcontrolador de 8 bits com uma interface serial RS-232-C resolveu facilmente esse problema. Assim foram incluídos no modulo H9319-01(figura 6) os seguintes componentes:

- Tubo fotomultiplicador
- Fonte de alimentação
- Circuitos da fonte de alta tensão
- Amplificador de alta velocidade
- Discriminador de pulso
- Pre-scaler
- Microcontrolador
- Capsula de alumínio (blindagem)



Figura 6 Modulo H9319-01 da Hamamatsu

Para facilitar a utilização do conjunto detector e para garantir o melhor desempenho, Hamamatsu testou e configurou o ponto de operação (alta tensão), o nível de discriminação e mediu o tempo morto de todo o conjunto. Estes valores foram inseridos na memória permanente. O microcontrolador pode então definir o módulo para a alta tensão adequada e corrigir os dados para sobreposição de pulso sem intervenção do usuário. (HAMAMATSU s.d.)

Quando se tem um grande número de circuitos encapsulados em um tubo metálico é esperar uma acumulação de calor do tubo. Este é responsável direto pelo aumento da corrente de escuro do fototubo e conseqüentemente as contagens reduzindo a sensibilidade do detector. Para resolver esse problema potencial foi utilizada uma fonte de alta tensão de Cockcroft-Walton para alimentar o tubo fotomultiplicador. Além disso, circuitos de baixa potência foram selecionados para amplificadores e os circuitos discriminador e contador. Como todos os circuitos foram alimentados a partir de uma fonte USB de + 5 volts, o consumo de energia total foi de apenas de 250 miliwatts. (HAMAMATSU s.d.)

2.4.1 OPERAÇÕES BÁSICAS

Quando a tensão de 5 volts é aplicada ao módulo, o microcontrolador é disparado e executa uma inicialização dos seus circuitos integrados. Por exemplo, a porta de comunicação serial (RS-232-C) e o temporizador, que define o tempo de integração, são definidos nesse momento. Além disso, o conversor digital para analógico é definido como zero para manter a fonte de alimentação de alta tensão desligada. O microcontrolador ativa o processador de comando, que simplesmente espera por um comando do computador. Quando recebido o comando, ele é interpretado e executado. (Emico Okuno 1982) (KNOLL 2000)

Para começar a ler o nível de luz, o computador envia o comando '0', além de um retorno de carro, ativando assim a alta tensão para o tubo fotomultiplicador. Isto é feito. Outras comandos programáveis também podem ser enviados para configurar quanto tempo o sinal luminoso será integrado, quantas leituras devem ocorrer em uma seqüência e se existe um disparador externo das leituras. Em seguida começará o processo de tomada de dados.

Com o processo de leitura em andamento, o microcontrolador zera os contadores e, em seguida acionam os contadores para iniciar nova contagem. Uma vez que a alta tensão do fotomultiplicador já está ativada, o tubo está enviando um pulso de corrente no circuito amplificador e discriminador para cada fóton detectado que atingir a janela de entrada. (Lamarsh 1975)

A porta permanece aberta para estes pulsos de corrente e assim a contagem continua até que o cronômetro de precisão no microcontrolador atinge 10 milissegundos. Neste momento em que a porta está fechada para novas contagens, o valor dos contadores é lido e salvo em uma memória temporária e os contadores retornam a zero. Finalmente, o processo é reiniciado como antes com mais contagens de sinal sendo registradas.

Enquanto o processo de contagem estiver seguindo, o dado coletado é testado para não exceder o número máximo permitido de contagem. Se não, é adicionado a leitura anterior. Este processo continua até que o número de leituras de 10 milissegundos é igual ao período de integração programado. Atingido o tempo de integração, o microcontrolador envia o total de todas as leituras individuais em forma binária de quatro bits para interface serial do computador. (HAMAMATSU s.d.) (Lamarsh 1975)

Após a conclusão da medição, o microcontrolador retornará para o processador de comando. A sequência será recomeçada quando for necessário ou depois que a configuração inicial sofra modificada. No final de cada intervalo de 10 milissegundos, o microcontrolador verifica a porta serial para ver se um comando de parada (CR) foi enviado pelo computador. Se o computador interromper o processo de leitura para reiniciar o controle do módulo, ele pode fazê-lo dessa maneira.

2.4.2 TUBO FOTOMULTIPLICADOR

O componente principal do módulo H9319-01 é o tubo fotomultiplicador R1924A. Este tubo foi selecionado por causa de sua alta velocidade, tipo de fotocátodo e pequeno tamanho físico. As características do tubo fotomultiplicador R1924A são mostradas na Tabela abaixo.

Tabela 1: Características do Tubo Fotomultiplicador R1924A

Diametro	25mm
DiaAtivo	22mm
Min λ	300nm
Max λ	650nm
Pico λ.	420nm
Sens. Catodo	85mA/W
Janela	Borosilicate
Tipo catodo	Bialkali
Ganho	2,0E+06
Corrente escuro depois de 30 min.	3nA
Tempo de subida	1,5ns
Tempo de transito	17ns
Numero de dinodos	10
Tensão de operação	1000V

O tempo de subida do pulso nesse PMT é menor que 2 nanosegundos. A janela de entrada tem uma estrutura levemente-côncava que ajuda a manter a velocidade de resposta do pulso e melhora a eficiência de coleta dos elétrons arrancados do fotocatodo. O desempenho do tubo também melhora aumentando a voltagem entre o cátodo e o primeiro dinodo. Para aumentar a tensão, a relação normal do divisor de 1:1:1:....: 1 é modificada para 2:1:1:.... ou 3:1:1:....

Um maior campo elétrico nesta seção do tubo permite melhor controle da trajetória do elétron e melhor eficiência de coleta. Um benefício adicional é melhorar o ganho do primeiro dinodo devido a maior energia cedida para os elétrons e o conseqüente aumento na emissão secundária. Um maior ganho no primeiro dinodo resulta em uma melhor razão de pico-vale, conseqüentemente um plateau mais plano e uma melhor estabilidade operacional. (HAMAMATSU s.d.)

2.4.3 FONTE DE ALTA TENSÃO

O R1924A usado no módulo H9319-01 requer uma tensão de polarização próxima de 1000 volts. O ajuste da tensão é necessário para definir o ponto de operação no plateau. Como a acumulação de calor provoca um aumento dramático do ruído de fundo do tubo, o módulo H9319-01 usa uma fonte de alta tensão do tipo Cockcroft-Walton por causa de seu baixo consumo de energia. O diagrama esquemático para esta fonte é mostrado mais abaixo a Figura 7.

A idéia básica da fonte de Cockcroft-Walton é o uso de uma rede de diodos e capacitores para retificar uma tensão AC de entrada. Essa tensão é uma onda sinusoidal de 55 a 95 volts e de 185 kHz. (Lamarsh 1975) (Kaplan 1962)

Esta tensão é gerada por um cristal oscilador e um transformador que permitem a operação com uma tensão positiva de 5 volts de entrada. Múltiplos inteiros da tensão pico a pico estão disponíveis em voltagens DC para alimentar o fotomultiplicador. A alta frequência permite o uso de componentes de pequeno tamanho mantendo um baixo ruído. Uma vez que nenhum resistor é usado para definir as tensões como nos circuitos de divisor resistivo, a dissipação de potência é muito reduzida e também o aumento de calor.

A alta tensão de alimentação do fototubo deve ser estável para pequenas variações com a tensão de 5 volts de entrada ou a temperatura ambiente. Um circuito de retroalimentação é usado para permitir um ajuste com o objetivo de manter constante a alta tensão. Do diagrama de bloco, pode-se ver que esse circuito é realmente um conversor analógico-digital. Desta forma, o usuário pode controlar a alta tensão aplicada ao tubo muito facilmente através do microcontrolador usando o computador.

A pequena resistência de saída da fonte alta tensão Cockcroft-Walton pode resultar em uma corrente bastante grande no anodo quando o fotocatodo é fortemente iluminado. Essa corrente pode ser prejudicial tanto para a fonte de alimentação como para o tubo fotomultiplicador. Porém, ela pode ser reduzida quando atingir um valor limite através de um circuito de retroalimentação que diminui a tensão do oscilador. (HAMAMATSU s.d.)

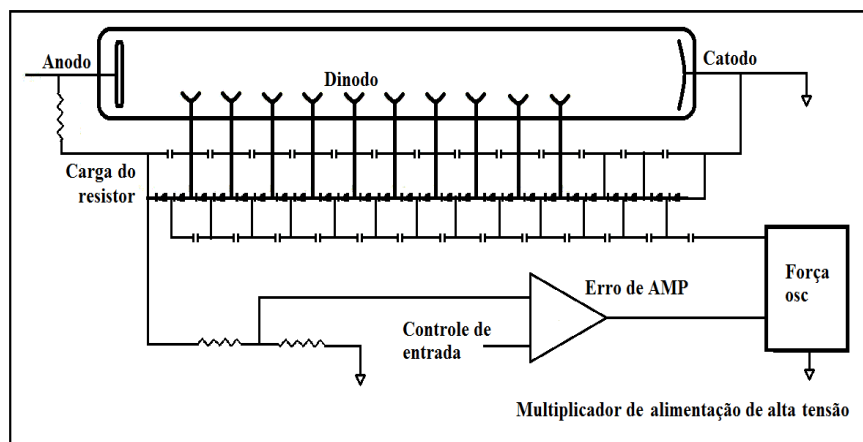


Figura 7: Esquema da fonte de alta tensão do tipo Cockcroft-Walton (HAMAMATSU s.d.)

Normalmente, a corrente máxima do anodo é de várias centenas de microamperes e a corrente de entrada do circuito de alta tensão é limitada a um nível seguro de 20 miliampères. Naturalmente, estes níveis não podem ser tolerados pelo tubo por mais de 10 segundos sem o risco de danos ao tubo. Com as tensões de operação do tubo, como mencionado, a saída típica no ânodo é cerca de 2 milhões de elétrons para cada foto-elétron. O pulso de tensão produzido por esses elétrons em uma resistência de 50 Ω é apenas de 5 a 10 mV. Antes de ser discriminado, o pulso deve ser amplificado de 20 a 30 vezes. Para o módulo H9319-01, o ganho é cerca de 30 vezes, com uma largura de banda de 100 MHz. A figura 8 mostra a forma do pulso na saída do amplificador. Com este ganho e largura de banda, os pulsos são suficientemente grandes para que o discriminador possa ficar na faixa de 50 a 100 mV.

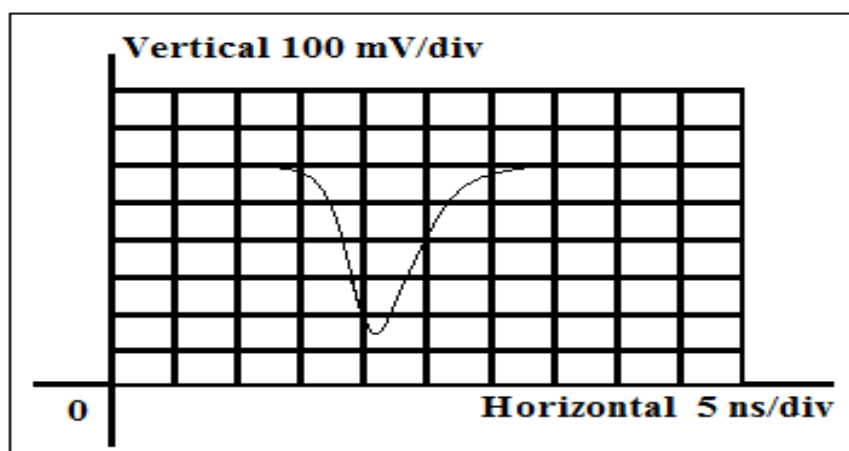


Figura 8: Forma do pulso de resposta na saída do amplificador e entrada do discriminador (HAMAMATSU s.d.)

Na saída do discriminador o pulso está em um formato digital e pode então ser processado por circuitos digitais. Antes de ser enviados para os contadores, cada sequência de quatro pulsos é reduzida para um pulso, o que equivalente a dividir por quatro o numero total de pulsos. Por exemplo, se 1000 pulsos saírem do discriminador o contador somente registra 250. Este circuito é usado para se ter um ganho na velocidade de contagem. No microcontrolador antes de ser enviada ao computador a contagem é restaurada para a taxa original, multiplicando-se por quatro. Durante o ciclo de leitura as contagens não são apagadas. Como as contagens são integradas em ciclos de 10 milisegundos e não apagadas entre cada ciclo, as perdas de 1 a 3 contagens serão perdidas somente após o tempo de integração. (HAMAMATSU s.d.)

O módulo H9319-01 é alimentado por uma fonte de corrente contínua de tensão de 5,0 volts. Esta fonte foi obtida da porta USB de um notebook. Ele contém uma interface de comunicação RS-232C padrão (também conhecido por EIA RS-232C ou V.24) para troca serial de dados binários entre um terminal de dados (DTE) e um comunicador de dados (DCE). É por meio desta porta de comunicação que se controla o módulo através de seu software.

O PMT é o principal elemento do módulo H319-01. Cada pulso de luz oriundo do detector de LiI é conduzido pelo guia líquido de luz diretamente para o fotocatodo do PMT do módulo H9319-01 arrancando uma certa quantidade de elétrons. Essa quantidade inicial é multiplicada através dos diversos dinodos do PMT. Na saída do fotomultiplicador há aproximadamente 2,0 milhões de elétrons por cada fotoelétron que chega ao tubo. Isto produz um pulso de 5,0 a 10,0 mV nos terminais de um resistor de 50 Ω . Por isto, se faz necessário amplificar este sinal entre 20 a 30 vezes antes que possa ser enviado ao discriminador de pulsos. O ganho é de 30 vezes e a frequência de operação chega aos 100 MHz. (HAMAMATSU s.d.)

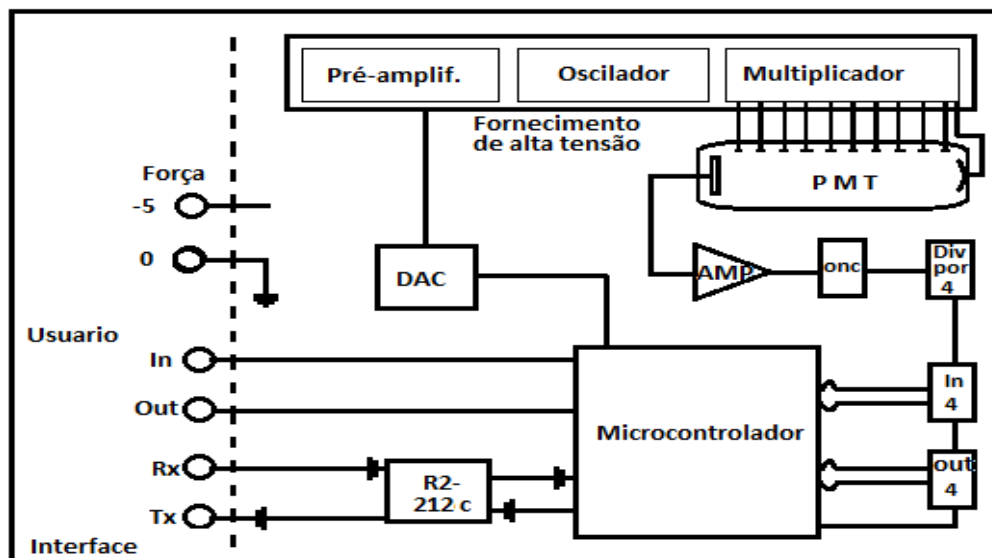


Figura 9: Esquema de bloco do módulo H9319 (HAMAMATSU s.d.)

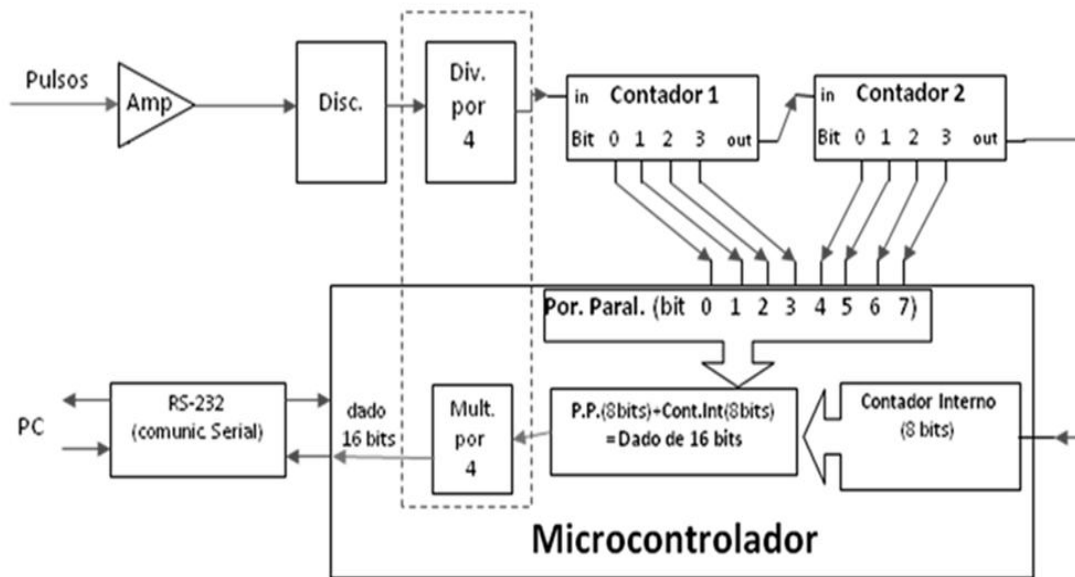


Figura 10: Circuito do módulo PMT H9319-01 (HAMAMATSU s.d.)

O sinal elétrico no anodo desse PMT é então amplificado e enviado para o discriminador que elimina aqueles outros provenientes do *background*. O discriminador pode ser configurado para aceitar apenas os pulsos de tensão entre 50,0 até 100,0 mV. Uma vez discriminado, o pulso se encontra em um formato digital (0 ou 5,0 V) e pode ser processado por circuitos digitais. Antes de enviar os pulsos digitais para os contadores os pulsos são pré-escalados ao serem divididos por 4. Isto é feito para aumentar a velocidade de contagem, uma vez que se faz possível contar grandes taxas de pulsos sem saturar os contadores. Do discriminador saem 10^6 pulsos por segundo, mas aos contadores só chegam $2,510^5$ pulsos por segundo, uma taxa menor que diminui a possibilidade de saturação. Ao final do processo o valor das contagens é multiplicado por 4. O microcontrolador antes de enviar o dado final para o PC multiplica a contagem por quatro, para restaurar o valor original. Por esta razão os dados recebidos no PC são sempre múltiplos de quatro.

Os contadores funcionam por intervalos de 10 milissegundos. Durante este tempo são coletados os pulsos e depois de integrados são armazenados na memória interna do microcontrolador. Um novo ciclo de 10,0 ms é começado, e a mesma operação se repete até completar o tempo definido pelo usuário ou até chegar uma interrupção do PC.

A Figura 11 apresenta detalhes do contador de pulsos. O sistema possui um contador de 16 bits. Para isso o arranjo possui dois contadores externos de quatro bits cujos dados são lidos pelo microcontrolador via porta paralela (contador 1 e contador 2) que representam os bits de D0 a D7 do dado. Além disso, o microcontrolador possui um contador interno de 8 bits que representam os bits D8 a D15 do dado.

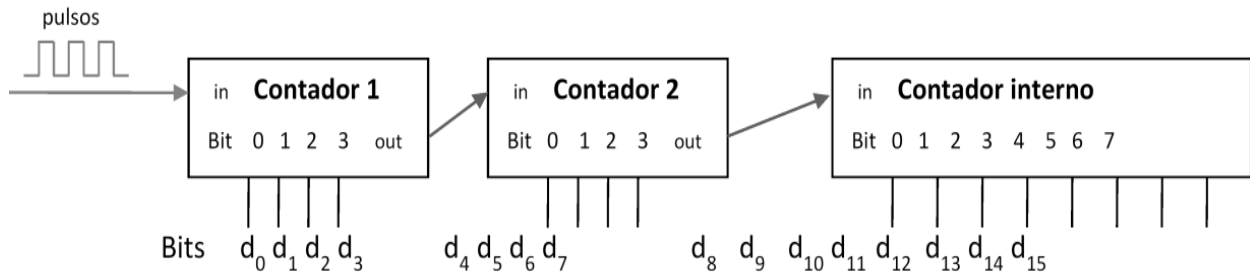


Figura 11: Contador de pulsos do módulo H9319-01 (HAMAMATSU s.d.)

Com esta montagem o microcontrolador pode registrar até 2^{16} (65535) contagens ou 262140 pulsos reais (fotoelétrons). Deve ser lembrado que estas contagens foram anteriormente pré-escaladas (divididas por 4). Por outro lado, o sistema mede somente em intervalos de 10,0 ms o que significa que a taxa máxima de contagem é de 262140 pulsos em 10,0 ms ou $2,62 \cdot 10^5$ pulsos por segundo (HAMAMATSU s.d.).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A montagem do protótipo iniciou-se no laboratório de Instrumentação Nuclear do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Minas e finalizou-se e no Laboratório de Metrologia das Radiações – LMET no Centro de Ciências e Tecnologias das Radiações da Universidade Estadual de Santa Cruz. (A figura 12 mostra a Imagem do protótipo)



Figura 12: Protótipo da sonda de nêutron, gama

Vários experimentos foram realizados para verificar o desempenho do sistema portátil de detecção.

3.1 CONTAGEM DE RADIAÇÃO NATURAL

Inicialmente mediu-se a contagem da radiação natural fazendo-se variar a temperatura ambiente de 22 a 26°C. Conforme Figura 13, observa-se um aumento progressivo das contagens quando o ar condicionado é desligado e a temperatura sobe progressivamente de 22 até 26 ° C. Esse pequeno aumento das taxas contagens com uma temperatura é devido emissão termiônica que depende fortemente da temperatura do fotocátodo. Todas as medidas são em contagem por segundo - cps e foram obtidas em intervalos de 10 ms. Os valores médios das taxas foram respectivamente $30,7 \pm 0,4$ e $32,6 \pm 1,3$. Nesse intervalo de variação, o sistema portátil pode ser pouco sensível à temperatura ambiente já que um aumento de 4 °C da temperatura da sonda portátil corresponde a uma variação da taxa de contagens média menor do que 2 cps.

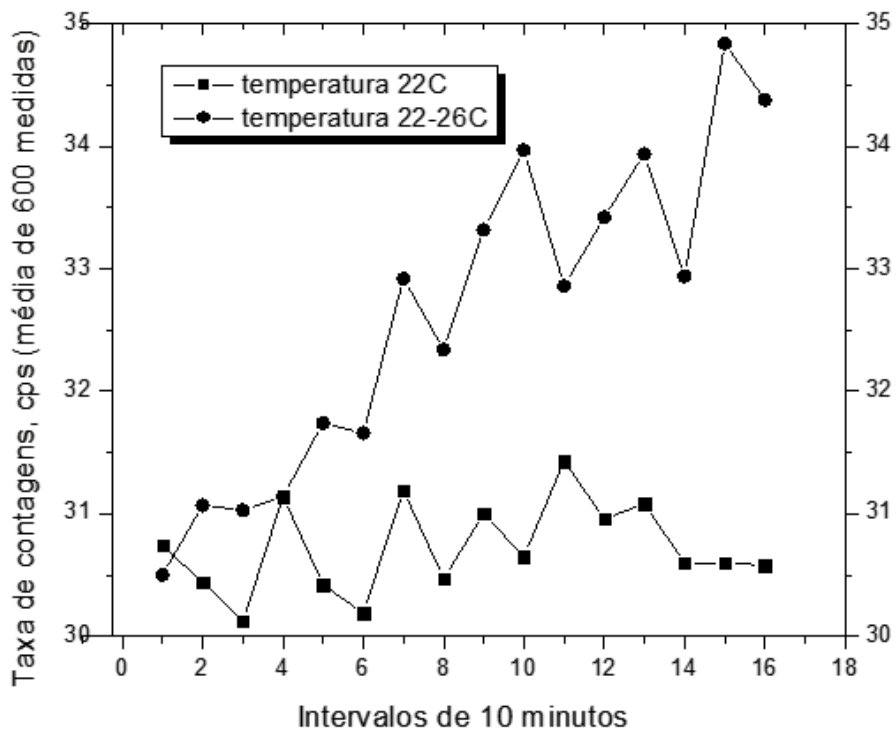


Figura 13: Taxas de contagens da radiação ambiente a temperature de 22°C nas temperaturas variando de 22 a 26°C (Gusmão 2011)

3.2 CONTAGEM COM A FONTE DE AMERICIO-BERILIO ACOPLADO AO SISTEMA

Medidas de nêutrons térmicos foram efetuadas usando o experimento mostrado na (Figura 14). Nesse experimento a fonte foi encapsulada em um cilindro oco de chumbo fechado nas extremidades com espessura das paredes de quatro mm.de chumbo. Esse cilindro foi fixado na extremidade do cintilador de iodeto de lítio, e em seguida deslocado no interior de um tubo de PVC. Em torno do centro desse tubo foi colocado um bloco cilíndrico de parafina de 20 cm de diâmetro e 15 de comprimento com o objetivo de termalizar os nêutrons da fonte de AmB circundando o tubo de PVC. Então três medidas foram efetuadas, duas a 20 cm à esquerda e à direita das extremidades do bloco de parafina e a terceira no centro do bloco. O objetivo foi testar o sistema de detecção para nêutrons térmicos nos pontos extremos esquerdo e direito do arranjo onde não havia moderação de nêutrons e no centro onde a moderação era máxima para nêutrons térmicos.



Figura 14: Confeção do arranjo experimental para testar as taxas de contagens dos nêutrons térmicos.

Nêutrons térmicos foram contados colocando-se uma fonte de nêutrons rápidos de Am-Be de 1,11 GBq dentro do tubo de PVC ao lado do detector LiI, A fonte foi blindada para os gamas de 60 keV por um cilindro oco de chumbo de 4 mm de paredes,. Taxas de contagem de nêutrons foram feitas em três posições neste tubo no interior do bloco e fora do bloco, à esquerda e à direita, do bloco de parafina (Figura 15).



Figura 15: Arranjo experimental para testar as taxas de contagens dos nêutrons térmicos.

Obtivemos o seguinte resultado gráfico mostrado na figura 14.

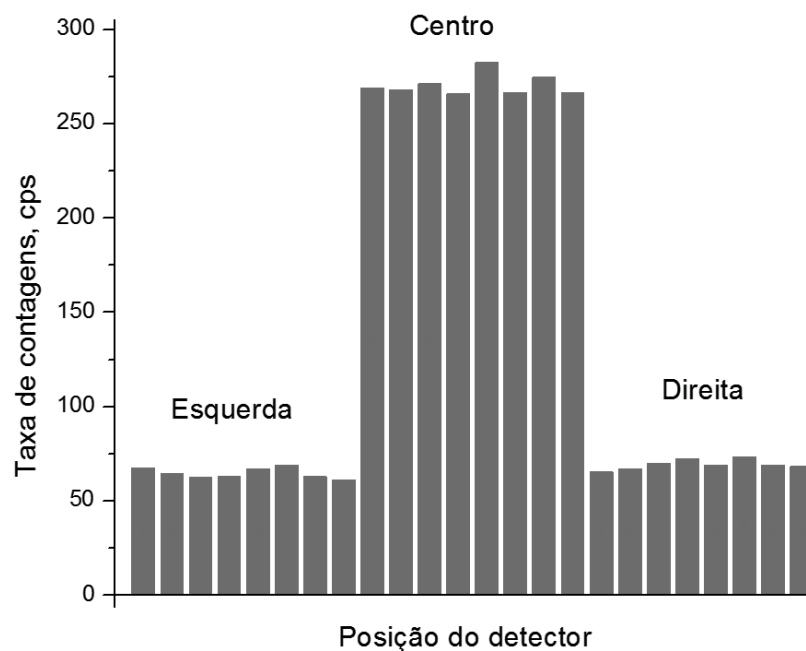


Figura 16: Taxas de contagens de nêutrons térmicos no centro do tubo (com parafina) e a esquerda e a direita do tubo (sem parafina).

Com o Programa EVAL 40, (figura 17), foram feitas contagens com o sistema embarcado, estas contagens foram feitas com a utilização de uma fonte de amerício de 60Kev blindada por chumbo, e inserida em dois meios diferentes, o meio 1 é um tubo de parafina e o meio 2 foi o ar.



Figura 17 Menu Principal do software EVAL 40

3.3. MEDIDAS DE DENSIDADE DE MADEIRA

Para testes de densidade foram utilizados três blocos de madeira, Pequi (*Caryocar brasiliense*; Caryocaraceae), maçaranduba (*Manilkara amazônica*) e vinhático (*Platymenia foliolosa*) de densidades de 0,96; 1,06 e 0,58 $\frac{g}{cm^3}$ e dimensões xyz 30x25x25 cm, com um furo de 1,5 cm no centro, no sentido longitudinal, de cada bloco (Figura 18).



Figura 18: Blocos de madeira utilizados para teste de densidade

Os blocos de madeira com densidades distintas foram usados para determinar uma relação entre as taxas de radiação gama espalhada e densidade de cada bloco. A composição química das madeiras além de variar pouco é formada por elementos de baixo número atômico. Esses dois fatores acarretam um valor efetivo de Z/A quase constante. O detector foi colocado no centro de cada bloco e as contagens da radiação espalhada foram obtidas. Entre fonte e o cintilador foi colocada uma blindagem de 4 mm de chumbo para blindar o feixe da radiação primária.

Os resultados mostraram a existência de uma correlação entre os valores de densidade das amostras padrões e a taxa de contagem medida pelo sistema numa dada geometria. Os resultados são mostrados na figura abaixo.

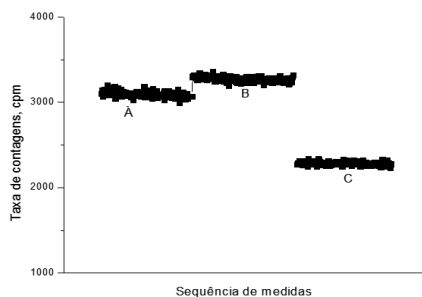


Figura 19: Taxas de contagem versus densidades para três blocos de madeira, A, B, C, respectivamente, com densidades de 0,96 1,06 e 0.58 g/cm^3 .

4 CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um produto nacional portátil para medir densidades e umidade, usando uma fonte de nêutrons de AmBe, um cristal de ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$, um guia líquido de luz e modulo H9319 da Hamamatsu usado como um digitalizador de pulso de luz. Uma correlação linear entre a radiação espalhada e a densidade de diversos tipos de madeira mostrou uma boa resolução e alta sensibilidade do sistema desenvolvido.

No experimento de moderação de nêutrons utilizando um bloco cilíndrico de parafina, os resultados mostraram que o sistema poderá ser utilizado como sonda de umidade para determinação de umidade de solo em trabalho de campo.

O sistema é leve de fácil transporte, autonomia de tempo em torno de 6 horas e permite uma adaptação para vários tipos cintiladores plástico e guias de luz o tornando versátil.

Testes futuros oriundos de outros trabalhos devem ser feitos para mensurar os limites de sensibilidade e confiabilidade das medidas geradas por este protótipo assim como seu aprimoramento e desenvolvimento de curvas de calibração em densidades de madeira e umidades de solo.

5 PERSPECTIVAS FUTURAS

O sistema portátil pode evoluir para diversas especificidades dentre elas ser usado como instrumento de perfilação de poços petrolíferos fazendo um estudo de possíveis combinações de cintiladores e de guias de luz adequado a função.

Logo, estudos futuros podem ser feitos para sua adequação e aplicação.

6 REFERENCIAS

ANDRADE, MARCOS LEANDRO GARCIA. “RADIOGRAFIA COM ELÉTRONS INDUZIDA POR NÊUTRONS.” 2008: 08.

Araujo, Geraldo Porto de. “FLUCTUATIONS ON THE X-RAY INTENSITY BEAM USING A PORTABLE X-RAY PROBE BASED ON 6Li(Eu) CRYSTAL.” Belo Horizonte, 2011.

AVELAR, F. B., Otimização de Parâmetros Geométricos de uma Sonda Nuclear. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, (2008). “Otimização de Parâmetros Geométricos de uma Sonda Nuclear.” 2008.

BACCARELLI, A. M., e Sistema Primário por Coincidências 4nP-Y para a padronização de radionuclídeos empregando cintiladores plásticos. São Paulo: IPEN. (2003). “Sistema Primário por Coincidências 4nP-Y para a padronização de radionuclídeos empregando cintiladores plásticos.” 2003.

BYRNE, J. *Neutrons, Nuclei and Matter – An exploration of the physics of slow neutrons*. United States, Philadelphia, 1995.

COUCHAT, Pascal. *Determination de la courbe*. Vienna, IAEA, 1968.

Eisberg, Robert. *Física Quântica*. California: Campus, 1979.

Emico Okuno, Iberê Luis Caldas, Cecil Chow. *Física para Ciências Biológicas e Biomédicas*. São Paulo: HARBRA, 1982.

Frame, Paul. *Boron Trifluoride (BF₃) Neutron Detectors*. Universidades Associadas de Oak Ridge. outubro de 2011. (acesso em agosto de 2012).

GUREVICH, I. I., e L TARASOV V. *Low-Energy Neutron Physics*. . Amsterdam, North Holland, 1968.

Gusmão, Clemente Carneiro. <http://www.inac2011.com.br/enan.php>. International Nuclear Atlantic Conference . 24 a 28 de Outubro de 2011. (acesso em novembro de 2011).

HAMAMATSU. *Head on PMT Photon Counting Head H9319 Series*. (acesso em maio de 2012).

JENSER, P.A. & SOMER. *Scintillation techniques in soil-moisture and density measurements*. 1967.

Kaplan, I. *Nuclear Physics*. Reading: Addison Wesley, 1962.

KNOLL, G.F. Radiation detection and measurements. 3 ed. John Wiley &. *Radiation detection and measurements*. 3ª. 2000.

Lamarsh, John R. *Introduction to nuclear engineering*. New York, 1975.

THOMPSON, M. N. *Neutron spectra fi-om Am-Be Nuclear Instruments and Methods*. Vol. 37. 1965.

Yoshimura, Elisabeth Mateus. *Física das Radiações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

Zamboni, Cibele Bugno. *Fundamentos da Física de Neutrons*. 1ª. São Paulo, São Paulo: Livraria da Física, 2007.

7 ANEXOS

7.1 TRABALHO PUBLICADO NO INAC – 2011 COM O TÍTULO FLUCTUATIONS ON THE X-RAY INTENSITY BEAM USING A PORTABLE X-RAY PROBE BASED ON ⁶LI(EU) CRYSTAL;

*2011 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011
Belo Horizonte, MG, Brazil, October 24-28, 2011
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR - ABEN
ISBN: 978-85-99141-04-5*

FLUCTUATIONS ON THE X-RAY INTENSITY BEAM USING A PORTABLE X-RAY PROBE BASED ON ⁶Li(Eu) CRYSTAL.

Geraldo P. Araujo¹, Arno H. Oliveira¹, André C. Carneiro², Clemente J. G. Carneiro², Felix M. Milian² e Fermin G. Velasco².

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares - PCTN
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG
Av. Antônio Carlos, 6627 Campus UFMG
PCA 1 – Anexo Engenharia
Pampulha – Belo Horizonte – MG
CEP: 31.270-90
geraldo.porto@hotmail.com, arnoheeren@yahoo.com.br

² Centro de Pesquisa em Ciências e Tecnologias das Radiações – CPqCTR
Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC Rodovia Ilhéus – Itabuna, KM 16
45662-900 Ilhéus, BA
andreccarneiro@gmail.com, clementecarneiro@yahoo.com.br, felix_mas_milian@yahoo.com, fermin@uesc.br

ABSTRACT

X-rays are produced by accelerating electrons with a high voltage and allowing them to collide with a metal target. This high voltage presents fluctuations that define peak, minimum, and average voltages. Different voltages are applied to the X-ray tube depending on the radiographic applications. A rectifier circuit converts the alternating high voltage to unidirectional high voltage to accelerate electrons in this tube. The fluctuations on the energy in the electron beam depend on the mode of rectification. Both energy of the electrons and X rays intensity fluctuates. A portable probe built with a ⁶Li(Eu) detector coupled to a 10 m light guide and a Hamamatsu photon counting head H9319 was used to measuring X ray intensities. This system is designed to collect up to 10000 counts in intervals of 10 ms to 1 s. Counts were accumulated in time intervals of 10 ms during 10 s. The system starts the count before activating the X-ray apparatus, which is on during a time interval of 100ms. During this period, counts may overflow in consequence high voltage was adjusted to be 40kV, in order to avoid such a problem. For each of these points dose was measured using an ionization chamber. The objectives of this work are to study fluctuations on the X-ray beam and to calibrate the portable probe for measuring radiation doses. Counting rates measured for each 10 ms presented strong variations due to high voltages fluctuations. Both dose and counting rate when correlated with distances between source and detector followed the inverse square law and presented values of R2 near of unit. A calibration curve of the portable system for dose measurements showed also R2 value near of unity.

Key words: high voltage, X-ray tube, ionization chamber, light guide

1. INTRODUCTION

Fluctuation of X-ray beam is related to wave form of voltage applied to the tube. However, because the transformer is connected to the network, so low-frequency (60 Hz), the waveform of voltage applied to the tube is a sine wave rectified. High voltage in an x-ray apparatus is traditionally obtained by a transformer voltage elevator whose output is rectified by a bridge of diodes and linked directly to the tube. The valve rectifier has the same operating principle that an x-ray tube, the cathode is a tungsten filament and the anode is a metal plate or a cylinder around the filament. Rectifier systems used are the half wave, complete wave, and three-phase. Variations in voltage between anode-cathode decrease the image quality obtained from an X-ray apparatus. Variation in the voltage applied to the tube produces a significant contribution to the patient absorbed dose. Terini, R. C. P. et al, 2009 have evaluated the practical peak voltage (PPV) for different types of x-ray equipment. PPV, standard of voltage recommended by International Atomic Energy Agency (IAEA), is determined from the acquisition of the waveform of the voltage applied to the x-ray tube during the exposure.

Portable radiation detection systems can be used in some applications as dose measurements and monitoring radiation at a distance. Mukhopadhyaya and McHugh, 2005 have worked with ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ crystals and ${}^6\text{Li}$ glass to develop field-operable dual sensors that detect gamma rays and neutrons simultaneously. The prototype ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ counter, which has been built and tested, is designed to collect data for periods of one second to more than eight hours.

The objective of this work is measure variations of X-ray beam using ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ radiation portable system detection.

2. MATERIAL AND METHODS

The X ray detection system was built using a small scintillator of ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ crystal. The scintillator is a small cylinder with 3 mm diameter and 40 mm length completely sealed in an aluminum tube coupled to a 10 m liquid light guide with a Hamamatsu PMT H9319-01. This PMT works as a light pulse digitizer (Figure 1).



Figure 1 Portable probe built with a ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ detector

The liquid light guide is a tube formed by three layers. The first layer seals the detector against external light. An intermediary metal layer protects the light guide internal layer. This layer is a polymer made up of a specific material and full of a crystalline liquid, homogeneous and transparent that guides a light bunch.

The power supply for the PMT is obtained from notebook USB port. PMT has a communication interface RS-232 for binary data transfer between data terminal (DTE) and data communicator (DCE). Each bunch of light pulses is transformed into this PMT in electric pulses of the same height. Consequently, this system does not discriminate pulses by energy. Also, all counts are obtained in time intervals of 10 ms and integrated up to one second. The system can store up to 10000 counts.

This detector was placed at distances varying from 0.8 m to 2.0 m from X ray source. Counts were done in time intervals of 10 ms for a time total of 100 ms, parameter of the X ray apparatus. Fluctuations in these counts reflect variations on high voltages that depend on the design of the Xray machine. For avoiding counting overflow, the high voltage selected for this experiment was 40 kV. The maximum counting rates observed was around 300000 counts per 10 ms.

The X ray apparatus was manufactured by RAEX, model RC/300D. Counting rates and integral radiation doses were measured simultaneously at each point. Doses were measured using a Victoreen X-ray test device, model 4000M+. During the X ray exposure, the kV in the tube varies with time, producing a kV waveform, resulting in a variability of the counting rates. The variation of counting rates depends on the rectifier circuit of the X ray apparatus. The average counting rate versus Xrays dose, was obtained using the Victoreen X-ray test device. (Figure 2)



Figure 2- Experimental arrangement
A - acquisition system + PMT 9519-01
B - 10 m Liquid light guide
C - LiI scintillator
D - X-ray test
E - X-ray apparatus

In high voltage single phase transformer, the voltage applied to x-ray tube varies constantly during the cycle, as well as the amount and the energy spectrum of x-rays produced. The signal applied to the x-ray tube is a sine wave rectified without filtering and for this reason there is a big ripple. Variations in voltage between anode-cathode, contribute to the spreading of the spectrum.

The half-wave rectifier's circuits and full waveform are used in these transformers. Three voltage values are associated with single-phase waveform, related to one aspect of the production of x-rays. At any instant of time, the tension has an instantaneous value (kVi), which determines the rate of production of x-rays at that instant. During each cycle the voltage reaches a maximum value or peak (kVp), selected by the operator at the control panel. The effective voltage (kVe) reflects the fact that the voltage vary with time and not always produce the same energy of peak value. For a typical single-phase voltage, the voltage value is effective 70.7% of the value of the peak voltage, as shown in Figure 3. (Ros, R. A.,2000).

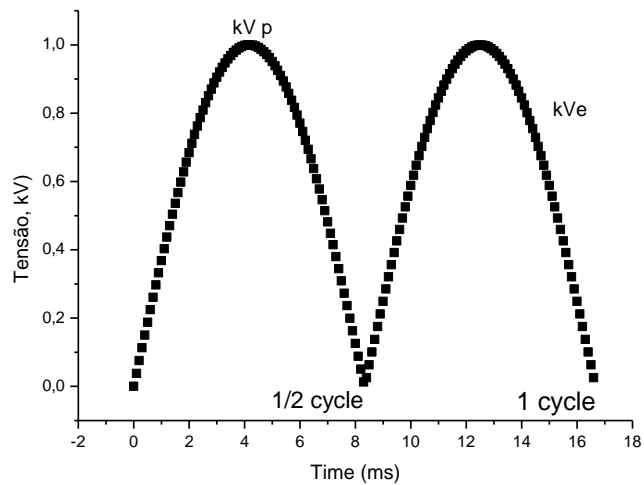


Figure 3 Fluctuation in the high voltage for X-ray

Instead of using the classical values kVp and kVe, a new index (Equation 1) based on counting rates, respectively CRmax, and CRe can be defined. The fluctuation in the high voltage for X-ray machine is called ripple. In the Figure 03 the ripple can be estimated using maximum and minima count rates in intervals of 10 ms (Figure 04) for each exposure time. The index for indicating the degree of ripple based on counting rates is done by.

$$RI = \frac{CRm}{CRmax} \quad [1]$$

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The Figure 4 shows counting rates before, during and after the exposure time for three distances between detector and X ray source. In the first interval counts are due the environment radiation, about 40 cps, in the second counts go up very fast up due to X-ray exposure, and in the third the inductive effect of kV circuit retards the drop in voltage. In consequence, after X-ray turn off, count rates remain high during a few seconds.

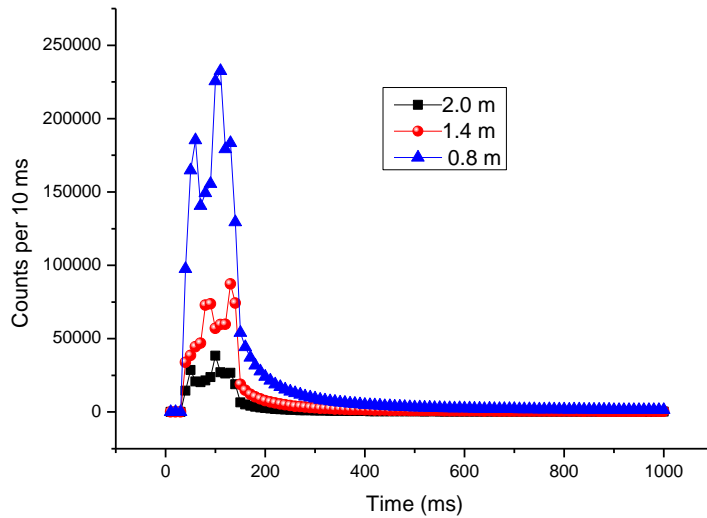


Figure 4 Counting rates before, during and after the exposure time for three distances between detector and X ray source.

The Figure 5 showed both average counting rates and radiation doses as functions of inverse of square distance between LiI detector and X ray source. Fluctuations on counting rates measured in time intervals of 10 ms are due to variations of high voltage. Counts over 100 ms intervals take on account six periods of high voltage fluctuations in consequence do not suffer influence of alternating voltage frequency.

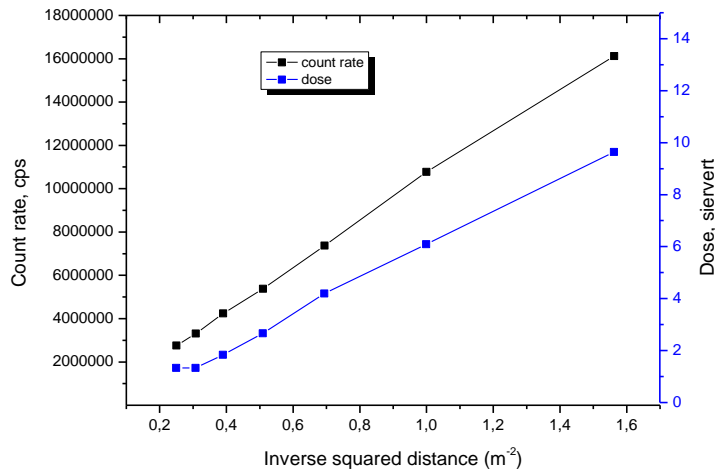


Figure 5 Counting rate and dose as function of the square of the inverse of distance of X ray source and detector

X Ray doses (D) were correlated with counting rates (CR) according the linear straight line: $D=6.37 \cdot 10^5 CR-0.68$ with $R^2=0.997$. This equation permitted calibrates the X-ray detection system in radiation doses.

Values of RI were determined using of Equation of inverse square law. For each distance between X-ray source and detection system 10 count rates were done. The results are shown in the Table 1.

Table 1 Index of ripple for the ray apparatus manufactured by RAEX at several distances between X-ray source and LiI detector

Distance (m)	RI
2,0	0,66
1.8	0,66
1.6	0,67
1.4	0,64
1.2	0,64
1.0	0,65
0.8	0,70

4. CONCLUSIONS

A LiI(Eu) system based on PMT H9319-01 can be calibrated for measuring radiation doses.

A new index for estimating the fluctuations of the high voltage is defined. This index is based on counting rates in time intervals shorter than a cycle of the alternated current during time exposure.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the Centre of Research in Sciences and Technology of Radiations - CPqCTR, where the research was developed, and the National Research Council of Brazil for funding the project.

REFERENCES

1. R. Andreucci, "A Radiologia Industrial", (2003).
2. A. C. Badin, "Fonte de Alimentação de um Tubo de Raios para Diagnósticos Odontológicos od" Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Mestrado em Engenharia Elétrica: 120, (2004).
3. S. Mukhopadhyaya, M. R. Harold "Portable gamma and thermal neutron detector using ⁶LiI(Eu) crystals". SPIE--The International Society for Optical Engineering, (2004).
4. R. A. Ros, Metodologia de Controle de Qualidade de Equipamentos de Raios X (Nível Diagnóstico) Utilizados em Calibração de Instrumentos. IPEN USP. São Paulo, São Paulo. Mestre: 107, (2000).
5. R. A. Terini, M. P. A. Potiens, S. B. Herdade, M. A. G. Pereira, J. S. J. Pires, H. S. Videira "A medição da grandeza practical peak voltage na prática radiológica" Radiol Bras. 42(6), (2009).

7.2 TRABALHO PUBLICADO NO INAC – 2011 COM O TÍTULO **PORTABLE GAMMA AND THERMAL NEUTRON PROBE USING A ${}^6\text{LiI}(\text{EU})$ CRYSTAL .**

Portable gamma and thermal neutron probe using a ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ crystal.

Authors

clementecarneiro@yahoo.com.br

geraldo.porto@hotmail.com

arnoheeren@yahoo.com.br

mario_marthins@yahoo.com.br

picodoitambe@gmail.com

ABSTRACT

Europium-activated lithium-6 iodide is a scintillator used for gamma and neutron counting. A portable detection system was built based on this scintillator. This system has three modules: the scintillator, a 10 m liquid light guide, and a Hamamatsu photon counting head H9319 that works as a light pulse digitizer. Data transfer, measurement time and other necessary adjustment can be controlled by software from the PC through the RS-232C interface. The scintillator, a crystal of ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$, is a small cylinder with 3 mm diameter and 40 mm length completely sealed in an aluminum tube coupled to the light guide. The small size of the scintillator increases the neutron/gamma count ratio, since 2 to 3 mm of thickness of this crystal absorbs all thermal neutrons. Intensities of X and gamma rays, and thermal neutrons can be recorded for time intervals of 10 ms to 1 s storing up to 10000 countings. The system was calibrated for measuring radiation doses for validating numerical models in dosimetry. Two characteristics reinforce this application, measurements can be at several away from the radiation source and also inside of water. In addition, it was used to build nuclear probes based on Compton scattering or neutron moderation in porous media by attaching an AmBe source to the top of the aluminum tube.

Tests were done to determine the reproducibility of counting rates. Background counting was measured at several temperatures to verify the influence of dark current of PMT. Sealed AmBe, low activity Am, and Xrays sources were used for studies of radiation counting statistics, including in short time intervals of 10 milliseconds. X rays apparatus was used to correlate counting rates measured with the ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ detection system and doses measured with an ionization chamber at several distances from the X ray source.

Key words: scintillator, light guide, nuclear probes, dosimetry

Introdução

Portable radiation detection systems can be used in some applications as dose measurements, monitoring radiation at a distance, density of wood and soil, and oil well logging.

Mukhopadhyaya and McHugh, 2005 have worked with ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ crystals and ${}^6\text{Li}$ glass to develop field-operable dual sensors that detect gamma rays and neutrons simultaneously. The prototype ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ counter, which has been built and tested, is designed to collect data for periods of one second to more than eight hours.

Novak and Mullerova, 2009 developed a scintillator-light guide-photomultiplier combination. The time response of was measured with a time-constant of 3 ns. The portable system measured counts

Majewski et al, 1995 developed an inexpensive and efficient liquid light guide. This guide was built in teflon tubing filled with mineral oil. It has transmission properties almost matching those of an expensive commercial light guide and of standard polystyrene fibers with acrylic cladding. The main advantage of the technique is mechanical flexibility of the light guides obtained. This could be an option for lowering costs of detection.

The main purpose of this research was develop a portable system for gamma and thermal neutrons detection. This portable system is very easy to operate, reliable, well protected against chocks and works at a distance. Also, data are stored in a notebook and can be transferred to a pendrive or by a 3G network to any location.

Material and methods

Europium-activated lithium iodide is a scintillator useful for gamma and neutron counting. Neutrons are detected through interaction with the ${}^6\text{Li}$ component of the crystal via the reaction $n + {}^6\text{Li} > {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + 4.78 \text{ MeV}$. The crystal contains the ${}^6\text{Li}$ component enriched to 96% and uses the high thermal neutron absorption cross section of ${}^6\text{Li}$ (941 barns). A portable detection system was built based on this scintillator. This system has three modules: the scintillator, a 10 m liquid light guide, and a Hamamatsu photon counting head H9319 that works as a light pulse digitizer. Data transfer, measurement time and other necessary adjustment can be controlled by software from the PC through the RS-232C interface.

The scintillator, a crystal of ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$, is a small cylinder with 3 mm diameter and 40 mm length completely sealed in an aluminum tube coupled to the light guide. The small size of the scintillator increases the neutron/gamma count ratio, since 2 to 3 mm of thickness of this crystal absorbs all thermal neutrons.

A liquid light guide is a tube formed of three layers. The first layer seals the detector against external light. An intermediary metal layer protects the light guide internal layer. This layer is a polymer made up of a specific material and full of a crystalline liquid, homogeneous and transparent that guides a light bunch. The basic structure of this polymer is a concentric cylinder with determined thicknesses and with refraction index smaller than liquid that allows the phenomenon of the total internal reflection. Liquid light guides allow an excellent transmission

of ultraviolet and visible light in a band that goes from 250 to 750 nm and is an excellent economic option to replace bunches of glass optical fibers. They were built using a resin manufactured by Du Pont denominated teflon AF. These tubes were filled with ethylene glycol that allows photons to be sent to photocathode with negligible losses by total reflection. Refraction indexes are 1.29 and 1.43 for teflon AF and ethylene glycol, respectively.

The PMT H9319 is a counting head designed by Hamamatsu to perform photon counting by just connecting to PC. The H9319 includes a 25 mm diameter head-on photomultiplier tube, photon counting circuit, high-voltage power supply circuit, counter and microprocessor. Data transfer, measurement time and other adjustments can be controlled by commands from the PC through the RS-232C interface. The H9319 use a 5.0 V power supply from netbook USB port.

Several tests were done to verify the performance of the portable detection system (Figure 1-ab). Environment radiation was used to analyze statistical counting parameters. Effect of temperature in count rates was measured. Thermal neutrons were counted placing an Am-Be source of fast neutron inside of PVC tube beside of the LiI detector Neutrons counting rates were done at three positions in this tube at center, left, right of the paraffin block (Figure 1-c). Wood blocks used to measuring wood density (Figure 1-d). Finally, an X-ray apparatus was used to test this portable system in a high intensity X-ray beam. Counting rates were measured placing the detector at distances varying from 0.8 m to 2.0 m from X ray source. Counts were done in time intervals of 10 ms for a total time of 100 ms, parameter of the X ray apparatus.

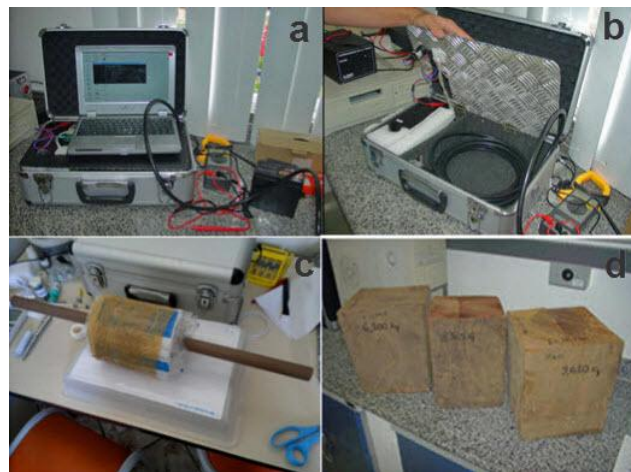
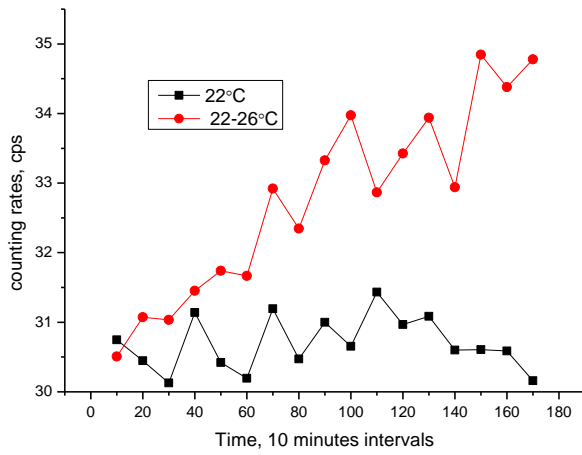


Figure XX shows: a) Portable detection system; b) A view inside of suitcase: liquid light guide and PMT 9319; c) Paraffin block around neutron access tube and d) Blocks of wood

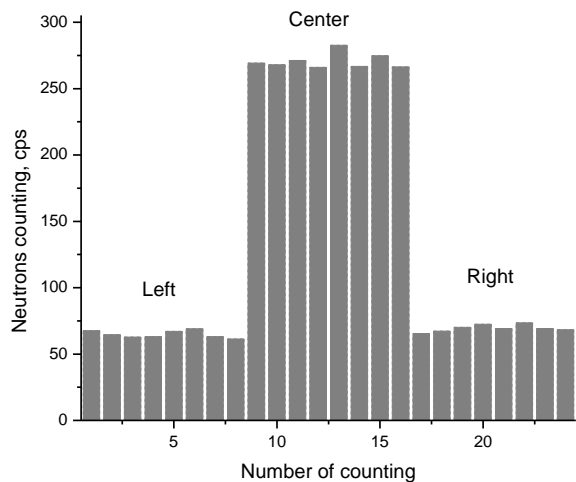
Counting rates were measured placing the detector at distances varying from 0.8 m to 2.0 m from X ray source. Counts were done in time intervals of 10 ms for a time total of 100 ms, parameter of the X ray apparatus.

Results

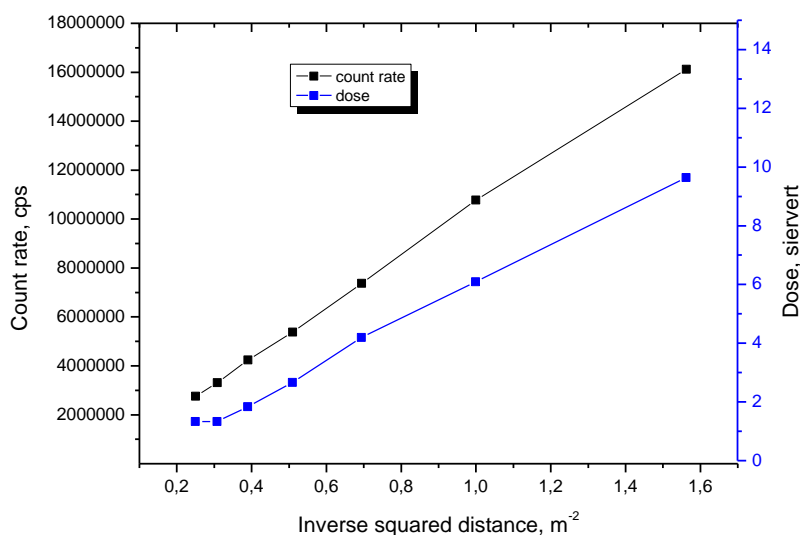
The figure XX shows two plots. In the plot A the temperature is constant at 22C and in the plot B the air conditioner is turned off when count rates started. A steadily increase of counting rates is observed the plot B in the figure XX, when temperatures varies from 22 to 26C. All measures are in cps and were done in 10 m intervals. Averages counting rates were respectively 30.7 ± 0.4 and 32.6 ± 1.3 . The portable system is not sensitive to ambient temperature. An increasing of 4 C of temperature the portable probe responds with a variation of less than 2 cps. The small increasing of counting rates with a temperature may be due to dark current of the PMT.



Neutron counting was done at the center and left and right of a PVC access tube. Paraffin candles were set around the center of this tube to slowing down the fast neutrons from the AmBe source.



Xray experiments showed that the radiation detection system can be used to measure radiation doses when calibrated against an ionization chamber. Both doses and counting rates follow the inverse square law (Figure XX).



All points follow the ISL including when counting rates is $1.6 \cdot 10^7$ cps, indicating negligible counting losses, in consequence dead time about 100 nanoseconds. X ray doses (D) were linearly correlated with counting rates (CR). The straight line: $D=6.37 \cdot 10^5 CR-0.68$ with $R^2=0.997$. This equation permitted calibrates the X-ray detection system in radiation doses.

Reference List

- Majewski, L. A., S. Majewski, and C. Zorn. "STUDY OF A FLEXIBLE LIQUID LIGHT GUIDE." Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment 337.2-3 (1994).
- Mannes, David, et al. "Neutron imaging versus standard X-ray densitometry as method to measure tree-ring wood density." Trees - Structure and Function 21.6 (2007).
- Melcher, C. L. "Perspectives on the future development of new scintillators." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 537.1-2 (2004).
- Milbrath, B. D., et al. "Radiation detector materials: An overview." Journal of Materials Research 23.10 (2008).
- Mohelnikova, J. "Tubular light guide evaluation." Building and Environment 44.10 (2009).
- Mukhopadhyaya, Sanjoy and Harold R. McHugh. "Portable Gamma and Thermal Neutron Detector Using ⁶Li(Eu) Crystals". 2005.
- Novak, L. and I. Mullerova. "Single electron response of the scintillator-light guide-photomultiplier detector." Journal of Microscopy-Oxford 233.1 (2009).