

2

DETECTORES DE NÊUTRONS

Tufic Madi Filho

Sistemas de detecção de nêutrons estão se tornando cada vez mais importantes em instalações que operam com materiais radiativos ou aceleradores de partículas, para atuarem no sistema de operação, de segurança e na monitoração radiológica.

O crescente uso de nêutrons nas aplicações médicas e industriais tem levado ao estudo e desenvolvimento de vários tipos de detectores para a aferição precisa da existência de nêutrons nos ambientes em estudo. A radiobiologia de nêutrons tem uma importante implicação social, uma vez que milhares de pessoas estão expostas a doses de nêutrons em reatores nucleares ou sistemas correlatos.

O termo detecção não significa apenas a indicação da presença de radiação nuclear, mas também a medida de sua quantidade, energia e propriedades correlatas.

Os fenômenos físicos que se efetuam nos detectores estão basicamente ligados à absorção da energia proveniente de reações nucleares em elementos radiativos.

No projeto e montagem de um sistema de medidas é necessário conhecer os processos de interação da radiação com o detector a fim de selecionar o que melhor se adapta para o trabalho a ser realizado.

Radiações de mesma energia geram, nas mesmas condições de medida, maior carga no detector semicondutor comparativamente aos detectores gasosos e cintiladores. Isso, porque são necessários no **Si** aproximadamente **3,6 eV** e no **Ge** **2,8 eV**, para a criação de um par elétron-lacuna, os **detectores gasosos** necessitam de aproximadamente **30 eV** para a criação de um par de íons e aproximadamente **300 eV** são necessários para liberar um elétron num **foto-cátodo**, (fotomultiplicadora). [1]

Detecção de Nêutrons

A detecção de nêutrons não é trivial devido à falta de carga dessas partículas e à 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.

O nêutron é uma partícula nuclear fundamental tendo massa e tamanho aproximadamente iguais aos do próton (núcleo de hidrogênio), mas com carga elétrica igual a zero. É instável, quando livre no espaço onde se transforma em um próton e um elétron com meia vida de transformação de 12 minutos. Ele é detectado de maneira indireta, isto é, faz-se necessário o uso de materiais conversores.

Os principais tipos de detectores sensíveis aos nêutrons são: [2]

- (a) gasosos,
- (b) auto-alimentados (self-power),
- (c) cintiladores e
- (d) semicondutores.

Esses detectores possuem internamente um conversor de nêutrons para produzir radiação ionizante. Os conversores são fundamentados em reações nucleares do tipo: **Nêutron + Conversor → Radiação ionizante**

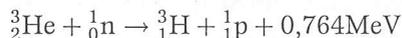
O conversor é um material que apresenta alta probabilidade de interação com o nêutron (alta secção de choque). A secção de choque é um parâmetro que expressa a probabilidade de interação do nêutron com o alvo. Ela é dependente da energia do nêutron incidente. [3]

Conversores de Nêutrons

Para cada energia do nêutron incidente, a probabilidade de ocorrer uma reação de conversão depende da secção de choque do nuclídeo conversor. A relação entre a secção de choque de vários nuclídeos usados como conversores em função da energia do nêutron incidente são mostradas na Figura 1. [1,4]

Conversor ${}^3\text{He}$

O ${}^3\text{He}$ é utilizado no desenvolvimento de detectores gasosos. Ele apresenta secção de choque de 5330 b (barns) para nêutrons térmicos. A conversão é feita por meio da reação:



Nesta reação o próton emitido possui energia cinética de $E_p = 0,573 \text{ MeV}$ enquanto o núcleo do trítio é emitido com $E_{\text{tH}} = 0,191 \text{ MeV}$. [4]

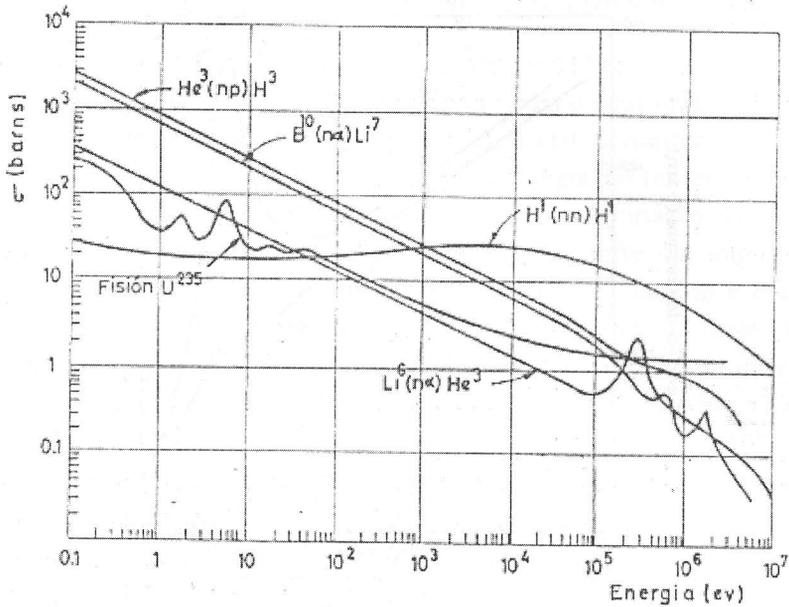
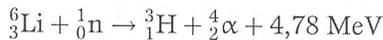


Figura 1 Secção de choque de alguns conversores em função da energia do nêutron incidente. (Figura adaptada de Tanarro)

Conversor ${}^6\text{Li}$

O ${}^6\text{Li}$ é um elemento usado como conversor para a detecção de nêutrons térmicos. Ele apresenta secção de choque de 940 barns para nêutrons térmicos. A reação de nêutrons térmicos com o ${}^6\text{Li}$ usado em detectores pode ser escrita como:



Nesta reação o trítio emitido possui energia cinética de $E_{3\text{H}} = 2,73 \text{ MeV}$ enquanto a partícula α é emitida com $E_{\alpha} = 2,05 \text{ MeV}$. [4]

Conversor ${}^{235}\text{U}$

O ${}^{235}\text{U}$ é utilizado nos detectores de fissão. Os nêutrons térmicos ao atingirem o detector podem produzir fissão do ${}^{235}\text{U}$ cujos produtos de fissão produzirão ionização detectável. O ${}^{235}\text{U}$ e o ${}^{239}\text{Pu}$ possuem alta secção de choque para nêutrons térmicos. A Figura 2 apresenta a secção de choque do ${}^{235}\text{U}$ e do ${}^{239}\text{Pu}$ para nêutrons térmicos. [1,4]

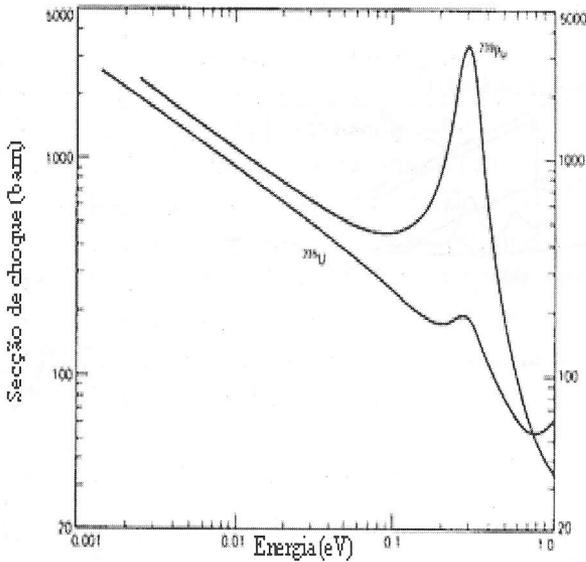
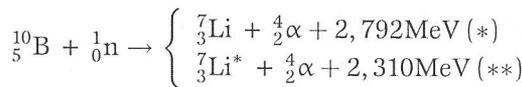


Figura 2 *Secção de Choque do ²³⁵U e ²³⁹Pu em função da energia do nêutron incidente. (Figura adaptada de Knoll)*

Conversor ¹⁰B

O ¹⁰B é usado em vários tipos de detectores de nêutrons principalmente nos detectores gasosos usando o gás ¹⁰BF₃ ou detectores revestidos com boro (boron-lined). Esse elemento apresenta secção de choque de 3840 barns para nêutrons térmicos, e integral de ressonância de 1720 barns.

No ¹⁰B um nêutron é absorvido com subsequente transmutação para ⁷Li e emissão de uma partícula α. No ¹⁰B a reação de conversão (n,α), para nêutrons térmicos, pode ser escrita conforme esquema a seguir:



(*) Estado Fundamental – a frequência dessa vertente é de apenas 6 %

(**) Estado Excitado – a frequência dessa vertente é 94 %, nessa reação o núcleo do ⁷Li emitido possui energia cinética de $E^7_{\text{Li}} = 0,840 \text{ MeV}$ e a partícula α é emitida com $E_{\alpha} = 1,47 \text{ MeV}$.

O núcleo excitado do Lítio decai rapidamente ($\sim 10^{-13}\text{s}$) emitindo um raio gama de aproximadamente 480 keV, $(2,792 \text{ MeV} - 2,310 \text{ MeV} = 482 \text{ keV})$ [4].

“Conversor” ^1H – (Geradores ou Radiadores de Prótons de Recuo)

Embora na literatura seja usado o termo “conversor ^1H ” para designar o efeito de recuo que sofre o núcleo de hidrogênio ao colidir com o nêutron faz-se necessário considerar que o termo “conversor” incorre num erro conceitual. Na interação (n,p) com os produtos hidrogenados, no nível de energia das fontes convencionais de nêutrons, não ocorre propriamente reações de transmutação. Nesse caso, o nêutron continua como nêutron, e o próton somente sofre um impulso devido a transferência de energia do nêutron. O hidrogênio, o deutério e o hélio são núcleos alvos de interesse como produtores de prótons de recuo. Esses elementos servem como fornecedores de prótons de recuo devido à reação (ou interação) de espalhamento elástico ser mais favorável nos núcleos leves. Dentre eles o hidrogênio é o mais utilizado [1,4].

No espalhamento elástico, a energia (Q) liberada na reação de conversão é igual a zero devido ao princípio da conservação da energia. A energia cinética total é conservada na reação.

O núcleo do átomo de hidrogênio possui apenas um próton e que ao ser espalhado é chamado de próton de recuo. Os detectores fundamentados nesse tipo de reação são os detectores de próton de recuo.

Os detectores gasosos tipo próton de recuo são usados na detecção de nêutrons de várias energias. Nesses detectores, para cada região de energia do nêutron incidente, o gás de preenchimento é aplicado a uma pressão apropriada a fim de otimizar o rendimento da detecção do fluxo de nêutrons [3,5].

Em detectores do estado sólido que utilizam materiais que têm em sua constituição hidrogênio, como por exemplo, o polietileno é usado como gerador de prótons de recuo. Como já foi mencionado anteriormente, a água, a parafina e os plásticos como o polietileno são substâncias que mantêm grandes proporções de hidrogênio em suas constituições. Dentre esses, o polietileno, cuja fórmula mínima é $n(\text{CH}_2)$, possui 66% da constituição atômica do plástico. Além de ser um componente rico em hidrogênio possui excelentes qualidades físicas e mecânicas. O polietileno suporta temperaturas relativamente elevadas tendo ponto de amolecimento acima de 80°C e características mecânicas como a rigidez e a dureza que são desejáveis nos projetos dos detectores.

Interação de Nêutrons com a Matéria

O projeto e construção de detectores de nêutrons dependem fundamentalmente do processo pelo qual os nêutrons interagem com os núcleos atômicos.

Os nêutrons interagem com os núcleos por vários processos, a saber [6]:

- Espalhamento Elástico (n,n)

Neste caso o núcleo não sofre nenhuma modificação em sua composição isotópica ou na sua energia interna após a colisão. A energia dos nêutrons se mantém.

- Espalhamento Inelástico (n,n')

Nessa interação o núcleo não sofre nenhuma modificação em sua composição isotópica, mas é deixado em estado excitado. O nêutron transfere energia para o núcleo.

- Reações de Absorção

As reações de absorção podem ser divididas em função da energia do nêutron incidente e do produto final, conforme esquema abaixo:

a) Captura Radioativa (n, γ)

b) Partícula Carregada (n,p), (n, α)

c) Nêutrons de Alta Energia (n,2n), (n,3n)

d) Nêutron Altamente Energético (n,pn), processo raro de ocorrer

- Reações de Fissão

Nas reações de fissão o nêutron colide com certos núcleos pesados que se quebram em dois fragmentos, liberando considerável energia. Na reação com o urânio, o processo libera dois, três ou quatro nêutrons, sendo em média 2,43 nêutrons.



Tipos de Detectores de Nêutrons

Os nêutrons são detectados por vários tipos de sensores tais como: (a) câmaras de ionização, (b) câmaras de fissão, (c) cintiladores líquidos acoplados a fotomultiplicadoras, (d) detectores proporcionais gasosos (BF_3 , ^3He) e (e) detectores semicondutores. 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 elétron-lacuna 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 elétron-lacuna 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. [1,4,7]

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. Os detectores tipo auto-alimentados (self power) por necessitarem de um fluxo elevado de nêutrons, limitam-se a aplicação em reatores nucleares. [1,2,4]

Detectores Gasosos

Os tipos de detectores mais empregados na detecção de radiação são os detectores gasosos. Todos os tipos de detectores gasosos são essencialmente constituídos por um recinto cheio de um determinado tipo de gás, a uma pressão conveniente com dois eletrodos isolados entre si, aos quais se aplica uma tensão elétrica.

O gás de enchimento do detector deve ser um bom isolante. Assim, em condições normais, nenhuma corrente elétrica apreciável circulará entre os eletrodos. Mas, se uma radiação nuclear provocar uma ionização no gás, o campo elétrico existente no detector provocará o movimento das cargas no sentido dos eletrodos (cátodo ou ânodo). Dessa forma originam-se no detector correntes ou pulsos elétricos que podem ser medidos externamente. Eles revelam a presença de radiação incidente e podem em determinadas condições, indicar a energia e a natureza desta radiação.

Nos detectores de nêutrons gasosos, os íons formados na reação entre os conversores e os nêutrons incidentes provocam a ionização do gás de enchimento do detector. O movimento das cargas formadas produzirá no coletor um pulso ou corrente elétrica detectável [1,4].

Detectores Proporcionais de Boro

Nesses detectores é utilizada a reação nuclear $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$. Tanto a partícula alfa como o núcleo de lítio formado provocam uma densa ionização no gás de uma câmara ou de um detector proporcional. O movimento das cargas resultantes formará no eletrodo coletor um pulso elétrico em resposta ao nêutron detectado. [1,4]

Uma câmara de ionização ou um detector proporcional podem ser preenchidos com gás contendo boro. O gás normalmente empregado é o trifluoreto de boro (BF_3). O BF_3 é quase uma escolha universal devido às suas propriedades superiores como um gás proporcional. Geralmente os fabricantes de detectores apresentam a sensibilidade do detector em unidades: cps/nv. O produto nv é definido como um feixe com n nêutrons por cm^3 com velocidade de $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ atingindo simultaneamente um alvo, i.e., $1 \text{ nv} = 1 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Câmaras Revestidas com Boro

Para a medida de fluxo de nêutrons térmicos superiores a 10^3 nêutrons $\cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, pode-se utilizar câmaras de ionização cheias com gás inerte e com seus eletrodos revestidos de boro enriquecido com ^{10}B . [1,4]

Câmara de Fissão Revestida com Urânio

As câmaras de fissão são detectores que utilizam como material conversor o urânio. É usado o urânio natural como sensor de nêutrons rápidos ou urânio enriquecido (^{235}U) a 93 % como sensor de nêutrons térmicos. [1,4]

Detectores Auto-Alimentados (Detectores Tipo *Self Power*)

Os detectores auto-alimentados são construídos com materiais que possuem alta secção de choque para nêutrons. Após a reação com o nêutron o material emite uma partícula beta ou uma radiação gama. A corrente gerada pelas partículas beta é proporcional à taxa de reação de nêutrons no material. Sendo a corrente de beta medida diretamente, não é necessária tensão externa de alimentação. Por essa razão ele é chamado auto-alimentado. A radiação gama emitida interage com o material por efeito: Compton, Fotoelétrico ou Formação de Pares. A corrente dos elétrons secundários é usada como sinal básico do detector. [1,4]

Detectores que Utilizam ^6Li

Cintiladores de iodeto de ^6Li ativado com európio $^6\text{Li}(\text{Eu})$ são utilizados para a detecção de nêutrons térmicos e rápidos. O $^6\text{Li}(\text{Eu})$ é semelhante ao $\text{NaI}(\text{Tl})$. 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 $^6\text{Li}(\text{Eu})$ 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. [8,9]

O ${}^6\text{Li}$ pode ser incorporado a outros materiais na produção de cristais ou soluções cintiladores para a detecção de nêutrons rápidos. O ${}^6\text{LiF}$ é usado como conversor (n,α) para detector de nêutrons usando cristal de silício. Mesmo apresentando alguns problemas, tem a vantagem de que a energia da partícula alfa emitida permite boa discriminação da radiação gama eventualmente presente. [1,4,6,7]

Detectores Tipo Traço CR-39

O material comercial conhecido como *Columbia Resin* número 39 (CR-39) é constituído de carbono, oxigênio e hidrogênio ($\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_7$). Foi originalmente desenvolvido para ser utilizado como lente óptica. Em 1978 Cartwright, Shirk e Price demonstraram suas propriedades como detector de traços nucleares.

O CR-39 é um detector de estado sólido tratado quimicamente. Este plástico sofre danos (traços) ao ser exposto à radiação. [2,10]

Detectores Semicondutores

Em um cristal os átomos estão agregados segundo uma determinada estrutura. Devido a essa estrutura, os elétrons orbitais se “misturam” e os níveis de energia nos quais podem estar os elétrons se agrupam em bandas de energia, denominadas permitidas, de cuja largura dependem as forças de interação entre os átomos. Cada banda contém tantos níveis discretos quantos são os átomos no sólido. Sendo a densidade num sólido cristalino da ordem de 10^{22} átomos/cm³, cada banda contém um grande número de níveis separados por diferenças de energias tão pequenas que, para efeitos práticos, a banda pode ser considerada contínua de níveis permitidos. Essas bandas são separadas por intervalos de energia que o elétron não pode ocupar. São as chamadas bandas proibidas. [1,4]

Os elétrons das camadas mais externas ou de valência são considerados livres no interior do cristal, como se não pertencessem a nenhum átomo em particular. A banda onde se localizam esses elétrons é chamada de valência. Os elétrons da banda de valência podem ser acelerados por um campo elétrico externo e passar para a banda denominada de condução. Quando um elétron passa para a banda de condução o lugar que ocupava fica vago. Essa ausência é denominada lacuna ou vacância.

Na banda de condução a população dos elétrons depende da natureza e da temperatura do cristal. Por elevação da temperatura, os elétrons da banda de

valência podem adquirir energia suficiente para saltar a banda proibida e chegar à banda de condução. Nos semicondutores, a banda proibida possui uma largura tal que, a zero Kelvin, a banda de valência está repleta e a de condução vazia, não havendo passagem de elétron nem mesmo sob a ação de um campo elétrico externo. [4,6]

Quando a temperatura é aumentada, alguns elétrons têm energia para saltar a banda proibida. Se o elétron passa para a banda de condução, surgem dois portadores de carga elétrica: o elétron que se desloca na banda de condução sob a ação de um campo elétrico externo e a lacuna que se desloca na banda de valência, pois o elétron vizinho pode ocupar a lacuna deixando seu lugar vago e assim sucessivamente. Desta forma num semicondutor surgirão duas correntes elétricas: a dos elétrons e a das lacunas.

A criação de um par elétron-lacuna não ocorre apenas por variação da energia térmica, mas também por energia cedida por radiação ionizante que incida no semicondutor. O silício (Si), com banda proibida de 1,09 eV, e o germânio (Ge), com banda proibida de 0,79 eV, são os semicondutores mais utilizados como sensores de radiação ionizante. [4,11]

As figuras 3 à 8 apresentam as repostas de alguns tipos de detectores de nêutrons, obtidas utilizando uma fonte de nêutrons de AmBe de 1Ci de Am, essa fonte gera uma taxa de nêutrons em 4π da ordem de $2,5 \cdot 10^6 \text{ ns}^{-1}$. [12]

A Fig. 9 apresenta a faixa de operação de alguns detectores de nêutrons utilizados em controle de reatores nucleares.

Resposta de Alguns Detectores de Nêutrons

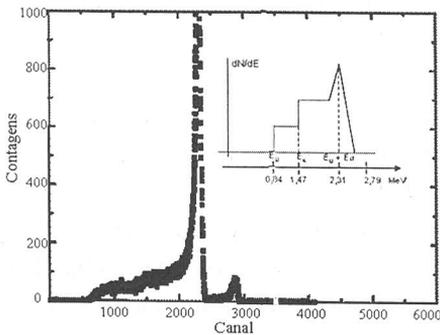


Figura 3 BF3 – Detector a Gás

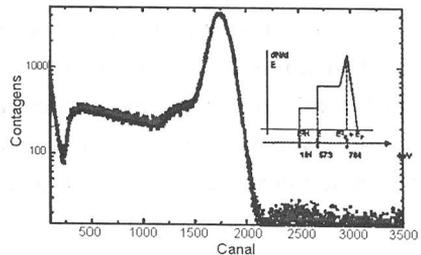


Figura 4 ³He – Detector a Gás

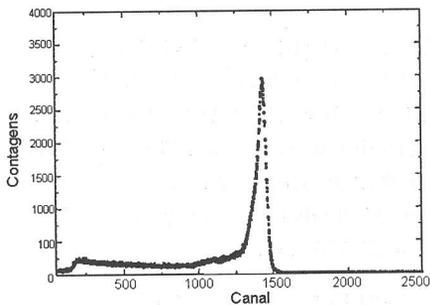


Figura 5 1H - Detector a Gás - 10 atm

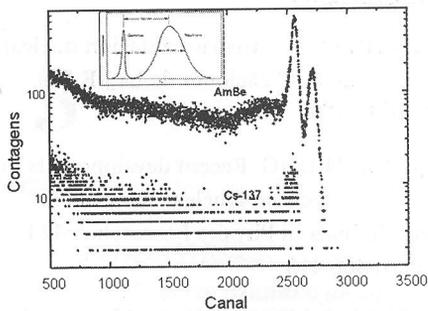


Figura 6 Detector Cintilador - NE 213

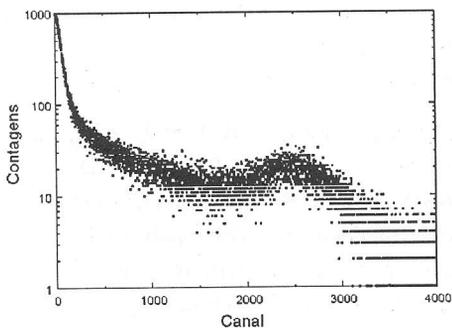


Figura 7 Detector Cintilador - NE 400

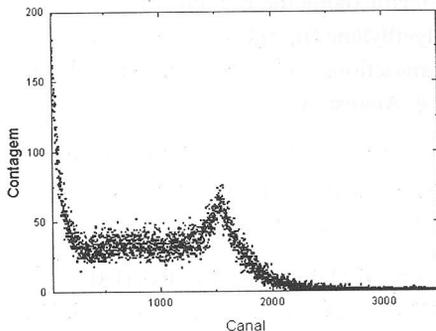


Figura 8 Detector Semicondutor - Foto diodo

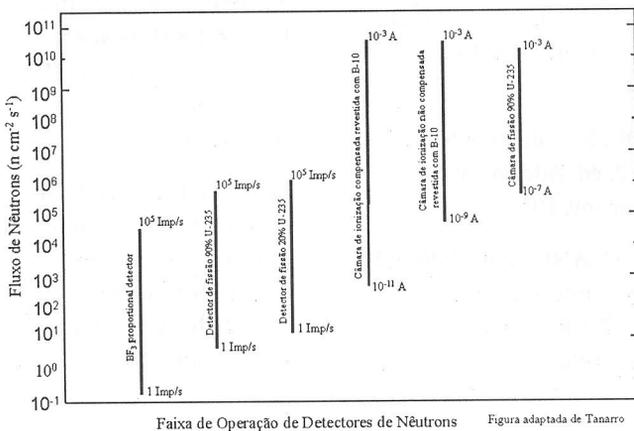


Figura 9 Faixa de operação de detectores de nêutrons usados em reatores

Referências

- TANARRO, A S. Instrumentación nuclear. Servicio de Publicaciones de La J.E.N.. Madrid 1970
- A.J. PEURRUNG. Recent developments in neutron detection. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 443 (2000) 400 415
- CARLOS H. MESQUITA, TUFIC MADI FILHO, AND MARGARIDA M. HAMADA. Development of Neutron Detector Using the PIN Photodiode with Polyethylene (n; p) Converter. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 50, N. 4, August 2003.
- KNOLL, G. F.; Radiation detection and measurement. 2 ed. John Wiley & Sons. 1986
- TUFIC MADI FILHO, MARGARIDA MIZUE HAMADA, FUMIO SHIRAIISHI, CARLOS HENRIQUE DE MESQUITA Development of neutron detector using the surface barrier sensor with polyethylene (n.p) and $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ converters. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A Feb-2001 volume/issue: 458/1-2 pages: 441-447
- LAMARSH, J.R., Introduction to nuclear reactor theory. 2. ed. Addison-Wesley Publishing Company, 1972.
- DEARNALEY, G. AND NORTHROP D.C, Semiconductor counters for nuclear radiations, 2 ed. E &F.N. Spon Limited-London, 1966
- M. VOYTCHEV, M.P. IÑIGUEZ, R. MÉNDEZ, A. MAÑANES, L.R. RODRÍGUEZ, R. BARQUERO. Neutron detection with a silicon PIN photodiode and ^6LiF converter. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 512 (2003) 546-552.
- SHELLEN, J.; BALZHAUSER, M.: HOENGESBERG, F.: ENGELS, R.: REINARTZ, R. A new neutron detector development based on silicon semiconductor and ^6LiF converter. Physica B Condensed matter, v. 234 - 239, p. 1084-1086, 1997
- FERNÁNDEZ F., BOUSSOLE T., DOMINGO C., LUGUERA E, AND BAIXERAS C. Response of a CR-39 fast neutron dosimeter with a polyethylene converter improved with makrofol, Radiation Protection Dosimetry, v. 66 (1-4), p. 343-347, 1996
- TAKAMI, Y., SHIRAIISHI, F., MURAKAMI, H., SIEMINSKI, M. ISAWA, N. Development of large area p-Si surface barrier detectors and the associated charge sensitive preamplifier IEEE Transactions on Nuclear Science, v.36(1), p.181-184,1989
- MARSH, J.W., THOMAS, D. J. AND BURKE M. High resolution measurements of neutron energy spectra from Am-Be and Am-B neutron sources Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A v. 366, p. 340-348, 1995