



CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

AUTARQUIA ASSOCIADA A UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE DE DETETORES AUTO-ENERGIZADOS (SPDs)

VADIM SURKOV

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Reatores Nucleares de Potência e
Tecnologia do Combustível Nuclear.**

**Orientador:
Dr. Adalberto José Soares**

**São Paulo
1994**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE DE DETETORES AUTO-
ENERGIZADOS (SPDs)**

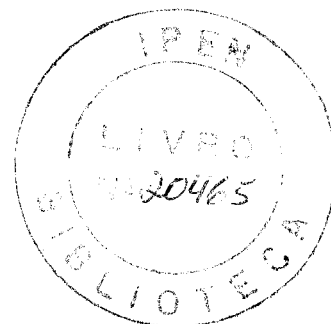
VADIM SURKOV

Dissertação apresentada como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências
na Área de Reatores Nucleares de Potência e
Tecnologia do Combustível Nuclear.

ORIENTADOR: Dr. ADALBERTO JOSÉ SOARES

SÃO PAULO

1994



**"... nem tudo pode ser verdadeiro por
consequência da nossa parcial imperfeição."**

Descartes

AGRADECIMENTOS

- À COPESP -Coordenadoria para Projetos Especiais- pelo apoio material para a realização deste trabalho.

- Ao IPEN-CNEN/SP - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, pelo apoio material e de pessoal, particularmente ao grupo de detetores do TE-IPEN pela construção dos SPDs.

- Ao Dr. Adalberto José Soares pelo incentivo, discussões e excelente relacionamento durante o trabalho.

- Ao Roberto Frajndlich, Tonicarlos e Laurindo, do Grupo de Operação do Reator IEA-R1, pelo trabalho realizado durante as irradiações dos SPDs.

- Ao José Roberto Berreta pela determinação da atividade das folhas de ouro.

- Ao Ulisses d'Utra Bitelli pela discussão relativa ao cálculo do fluxo de neutrons.

- À Dr. Leticia L. C. Rodrigues e ao Técnico de Proteção Radiológica Vanderley pela leitura dos TLDs e execução da curva de calibração destes detetores em altas taxas de exposição.

- A todos os amigos que participaram com sugestões e discussões durante este trabalho, de A até Z.

DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE DE DETETORES AUTO-ENERGIZADOS (SPDs)

VADIM SURKOV

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o estudo de detetores do tipo "Self Powered Detectors" (SPD) e a medida da sensibilidade inicial deste tipo de detetor. O estudo foi feito abordando os vários tipos de SPDs existentes e os mecanismos de interação da radiação com os mesmos. Foram realizadas medidas de sensibilidade para o fluxo de neutrons térmicos e epitérmicos e medidas de sensibilidade para o fluxo gama. A determinação da sensibilidade a neutrons foi realizada irradiando-se os SPDs no Reator IEA-R1 do IPEN (2 MW). Os fluxos de neutrons térmicos e epitérmicos foram determinados com folhas de ativação (ouro) nuas e cobertas com cádmio e o fluxo gama com dosímetros termo-luminescentes (TLDs). Para avaliação da sensibilidade à radiação gama, os detetores foram irradiados utilizando-se uma fonte de Co-60 de $1,85 \cdot 10^{14}$ Becquerels (5000 Curies) disponível no TE-IPEN. O trabalho mostra o resultado obtido com detetores de vanádio, cobalto, ródio, prata e platina e, quando possível, estes valores são comparados com os existentes na literatura consultada.

SENSIBILITY DETERMINATION OF SELF POWERED DETECTORS (SPDs)

VADIM SURKOV

ABSTRACT

The objective of this work is the study Self Powered Detectors (SPDs), including the comprehension of its principle of operation and the measurement of its initial sensitivity. The study was made considering the several types of SPDs and the mechanisms of the radiation interaction with them. Measurements of thermal and epithermal neutron sensitivities and gamma flux sensitivity were made. The determination of neutron sensitivity was made using the IEA-R1 Reactor from IPEN (2 MW) as the neutron source. The neutron flux was determined with Gold activation foils. Bare and Cadmium covered activation foils were used to distinguish between thermal and epithermal flux. To determine the gamma-ray sensitivity, the detectors were irradiated using a Co-60 gamma source of $1,85 \cdot 10^{14}$ Becquerels (5000 Curies) available at IPEN. The work presents the results obtained with Vanadium, Cobalt, Rhodium, Silver and Platinum detectors and, when possible, the values are compared with those from the existing literature.

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1.1- Vista esquemática de um SPD	2
2.1- Representação esquemática do efeito fotoelétrico	5
2.2- Representação esquemática do efeito Compton.....	6
2.3- Interação predominante em função da energia do fóton e do número atômico	7
3.1- Vista esquemática de um SPD	8
3.2- Número de falhas de SPDs testados no reator OCONEE	13
3.3- Variação da resistência de isolação com radiação (10^6 R/h) e temperatura	14
3.4- Variação da resistência de isolação do óxido de magnésio e óxido de alumínio com o aumento de temperatura	14
4.1- Corrente do SPD devido aos gamas externos em função do número atômico do emissor	20
5.1- Esquema de decaimento do cobalto	23
5.2- Esquema de decaimento do vanádio.....	24
5.3- Esquema de decaimento do ródio	25
6.1- Sinal do SPD de prata sob irradiação no campo gama	26
6.2- Corrente de "BG" do SPD de platina-04 (resistência de isolação de $0,3 \cdot 10^9$ Ohms)	27
6.3- Corrente de "BG" do SPD de platina-05 (resistência de isolação acima de $200 \cdot 10^9$ Ohms)	28
6.4- Variação relativa dos sinais dos SPDs em função da temperatura	29
6.5- Variação relativa dos sinais dos SPDs em função da temperatura	29
7.1- Esquema do arranjo experimental utilizado na irradiação dos SPDs.....	32
7.2- Corrente do condutor de sinal do SPD de prata sob irradiação.....	33

7.3- Corrente do SPD de vanádio (uma medida por segundo)	
no campo gama.....	34
7.4- Corrente do SPD de cobalto (uma medida por segundo)	
no campo gama.....	34
7.5- Corrente do SPD de ródio (uma medida por segundo)	
no campo gama.....	35
7.6- Corrente do SPD de prata (uma medida por segundo)	
no campo gama.....	35
7.7- Corrente do SPD de platina (uma medida por segundo)	
no campo gama.....	36
7.8- Vista geral do reator IEA-R1.....	38
7.9- Vista esquemática do dispositivo de irradiação.....	40
7.10- Placa matriz e posição de irradiação dos detetores.....	42
7.11- Vista esquemática da vareta utilizada para a fixação de TLDs ou folhas de ouro com as respectivas posições relativas aos SPDs.....	44
7.12- Corrente do SPD de vanádio (uma medida por segundo)	
Detetor nu.....	46
7.13- Corrente do SPD de vanádio (uma medida por segundo)	
Detetor com cádmio.....	46
7.14- Corrente do SPD de cobalto (uma medida por segundo)	
Detetor nu.....	47
7.15- Corrente do SPD de cobalto (uma medida por segundo)	
Detetor com cádmio.....	47
7.16- Corrente do SPD de ródio (uma medida por segundo)	
Detetor nu.....	48
7.17- Corrente do SPD de ródio (uma medida por segundo)	
Detetor com cádmio.....	48

7.18- Corrente do SPD de prata (uma medida por segundo)	
Detetor nu.....	49
7.19- Corrente do SPD de prata (uma medida por segundo)	
Detetor com cádmio.....	49
7.20- Corrente do SPD de platina (uma medida por segundo)	
Detetor nu.....	50
7.21- Corrente do SPD de platina (uma medida por segundo)	
Detetor com cádmio.....	50
8.1- Sinal do SPD de prata durante uma das irradiações de folhas de ouro no reator IEA-R1 a uma potência de 10 kW.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela.....	Página
3.1- Tipo de resposta, queima e característica do sinal de emissores mais comuns.....	10
3.2- Abundância isotópica, seção de choque, meia-vida e ressonâncias de materiais usados como emissores de SPDs.....	11
3.3- Variação da resistência de isolamento utilizando-se óxido de alumínio e óxido de magnésio como isolante de SPDs.....	13
3.4- Seções de choque de absorção para o alumínio e magnésio.....	15
7.1- Resistência de isolamento dos SPDs.....	31
7.2- Valores médios da corrente de "BG" e sob irradiação, na fonte de Co-60, dos SPDs em estudo.....	33
7.3- Valores médios das correntes dos SPDs devido à radiação gama.....	36
7.4- Valores médios da corrente de "BG" e sob irradiação dos SPDs em estudo.....	45
7.5- Correntes médias para os SPDs, nus e cobertos com cádmio, com os respectivos fluxos.....	51
7.6- Taxa de exposição devido à radiação gama no reator.....	51
8.1- Valores da sensibilidade à radiação gama dos SPDs.....	52
8.2- Comparação das sensibilidades à radiação gama, obtidas para os SPDs, com os valores disponíveis na literatura consultada.....	52
8.3- Valores da sensibilidade aos neutrons térmicos e epitérmicos.....	53
8.4- Comparação das sensibilidades aos neutrons térmicos e epitérmicos, obtidas para os SPDs, com os valores disponíveis na literatura consultada.....	53

ÍNDICE

	Página
AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	iv
LISTA DE TABELAS	vii
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - MECANISMOS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM O SPD	4
2.1 - INTERAÇÃO COM NEUTRONS.....	4
2.2 - INTERAÇÃO COM A RADIAÇÃO GAMA.....	5
2.2.1 - EFEITO FOTOELÉTRICO.....	5
2.2.2 - ESPALHAMENTO COMPTON.....	6
2.2.3 - FORMAÇÃO DE PARES	7
3 - DESCRIÇÃO DE UM SPD.....	8
3.1 - EMISSOR.....	9
3.2 - ISOLANTE.....	12
3.3 - COLETOR.....	15
3.4 - CABO DE LIGAÇÃO.....	16
4 - COMPOSIÇÃO DO SINAL DO SPD.....	17
4.1 - CORRENTE DEVIDO A CAPTURA DE NEUTRONS	17
4.2 - CORRENTE DEVIDO AOS RAIOS GAMA DE CAPTURA	18
4.3 - CORRENTE DEVIDO AOS RAIOS GAMA DO REATOR	18

4.4 - CORRENTE DEVIDO AOS ELETRONS GERADOS NOS MATERIAIS DO REATOR	19
4.5 - SINAL DO SPD	19
5 - PRINCIPAIS MATERIAIS USADOS COMO EMISSOR	22
5.1 - COBALTO	22
5.2 - PLATINA	23
5.3 - VANÁDIO	23
5.4 - RÓDIO	24
5.5 - PRATA	25
6 - MECANISMOS QUE INFLUENCIAM NA RESPOSTA DO DETETOR	26
6.1 - EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS ESPACIAIS	26
6.2 - EFEITO DE BATERIA	27
6.3 - EFEITO DA TEMPERATURA.....	29
7 - PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	30
7.1 - DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE GAMA.....	32
7.2 - IRRADIAÇÃO NO REATOR IEA-RI	37
7.2.1 - DESCRIÇÃO DO REATOR	37
7.2.2 - DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO DE IRRADIAÇÃO	39
7.2.3 - DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE AOS NEUTRONS TÉRMICOS E EPITÉRMICOS	41
8 - RESULTADOS.....	52
8.1 - SENSIBILIDADE GAMA	52
8.2 - SENSIBILIDADE AOS NEUTRONS TÉRMICOS E EPITÉRMICOS	53
8.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	54

8.3.1 - SENSIBILIDADE GAMA	55
8.3.2 - SENSIBILIDADE AOS NEUTRONS TÉRMICOS E EPITÉRMICOS	56
9 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	59
9.1 - CONCLUSÕES	59
9.2 - RECOMENDAÇÕES	60
10 - ANEXOS	61
ANEXO 1 - DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE NEUTRONS TÉRMICO E EPITÉRMICO	61
ANEXO 2 - ANÁLISE DE ERROS E IMPRECISÕES CONSIDERADAS PARA O CÁLCULO DO ERRO	63
ANEXO 3 - VALORES DA SENSIBILIDADE DOS SPDs CITADOS NA LITERATURA	71
11 - REFERÊNCIAS	77

1 - INTRODUÇÃO

De acordo com a sua definição, os sistemas de monitoração "in-core" são sistemas compostos de detetores distribuídos dentro do núcleo de um reator e que visam permitir que os operadores conheçam o nível de fluxo neutrônico e conseqüentemente a densidade de potência em qualquer ponto do núcleo.

Os sistemas de monitoração "in-core" podem ser de dois tipos: sistemas móveis que estão associados a tubos-guia secos por onde penetram detetores que fazem uma espécie de varredura azimutal e sistemas fixos onde vários detetores permanecem no interior do núcleo do reator cobrindo a região ativa e proporcionando medidas instantâneas de vários pontos do mesmo.

Os sistemas móveis se caracterizam por uma série de tubos que penetram no núcleo do reator, associados a motores, válvulas de isolamento e dispositivos mecânicos para selecionar o elemento combustível que será "monitorado". Os principais detetores utilizados são a mini-câmara de fissão e os detetores de ativação (esferas de aço com vanádio em sistemas "Aero-balls").

Os sistemas fixos se caracterizam por "penetrações eletrônicas" que ligam detetores colocados dentro do núcleo à eletrônica onde seus sinais são processados. Neste caso, dois tipos de detetores são utilizados, o Self Powered Detector e o termômetro gama (calorímetro).

As vantagens dos sistemas fixos são evidentes pois além de permitir uma monitoração contínua, minimizam a possibilidade de vazamentos do reator uma vez que as "penetrações eletrônicas" dificilmente resultam em vazamento, ao contrário das penetrações de tubos secos necessários aos sistemas móveis.

Os sistemas de monitoração "in-core" fixos começaram a ser utilizados na década de 60 com ênfase nos reatores tipo CANDU, onde inclusive faziam parte do sistema de proteção dos mesmos ^{15/}, sendo aos poucos incorporados em outros tipos de reatores e atualmente todos os novos projetos de reatores prevêem a sua existência. O principal componente destes sistemas é o chamado Self Powered Detector (SPD).

O SPD é um tipo de detetor que é utilizado inserido dentro do núcleo do reator à semelhança das câmaras de fissão. Seu sinal é utilizado para medidas de fluxo, determinação da densidade de potência local, gerenciamento do combustível e em alguns casos como sinal de segurança para ações de proteção do reator. Como principais características este tipo de detetor apresenta: pequeno tamanho (diâmetro externo mínimo de até 1,4 mm), robustez, baixo custo, não necessidade de fonte de alimentação, princípio de construção simples e possibilidade de permanecer no núcleo por um longo período (dependendo do material utilizado como emissor - compromisso entre sinal e "queima" do detetor-).

A configuração típica do SPD, conforme mostra a figura 1.1, é coaxial consistindo de um fio central chamado de emissor, um material isolante e de um coletor (o próprio revestimento do detetor). O seu princípio de funcionamento baseia-se no fato do emissor, através de reações (n, γ, e) , (γ, e) ou (n, β) , ejetar elétrons (ou partículas beta) que atingirão o coletor gerando assim uma corrente. O capítulo 3 apresenta uma descrição mais detalhada de um detetor do tipo SPD.

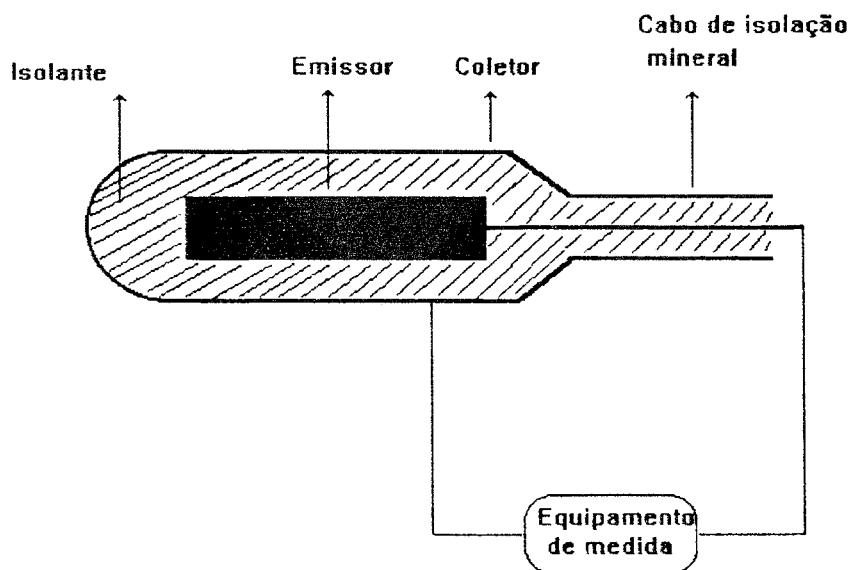


Figura 1.1 - Vista esquemática de um SPD

A primeira descrição de um SPD foi feita por M. G. Mitelman ^{/43/}, em 1961, que estudou um detetor experimental que possuía o ródio como material emissor, polietileno como isolante e alumínio como coletor. Em 1964, J. W. Hilborn ^{/35/} descreveu o que pode ser considerado o primeiro protótipo de um SPD comercial. Este detetor, que foi irradiado no reator NRX, possuía o vanádio como emissor, óxido de alumínio como isolante, aço inox como coletor e um cabo de isolação mineral para a condução do sinal.

Após os resultados satisfatórios registrados por J. W. Hilborn e durante toda a "história" deste detetor, vários tipos de SPDs foram propostos com ênfase nos emissores (dois materiais num mesmo detetor, recobrimento do emissor e/ou coletor com outro material) ^{/30,34/} e, principalmente, nos quais se variava os materiais e suas dimensões.

Paralelamente aos trabalhos experimentais, modelos teóricos foram desenvolvidos para uma melhor compreensão dos fenômenos físicos responsáveis pela resposta do detetor ^{/10,26,28,32,33,36,39,40,50,54,55/} comparando, na medida do possível, os resultados teóricos com os dados experimentais.

Assim, tendo por objetivo a caracterização deste tipo de detetor e dando prosseguimento ao programa de desenvolvimento de SPDs do IPEN, propõe-se neste trabalho o estudo dos vários tipos de SPDs existentes na literatura e a determinação experimental da sensibilidade aos neutrons térmicos, epitérmicos e à radiação gama de vários SPDs, comparando sempre que possível, os valores obtidos com os dados fornecidos pela literatura.

2 - MECANISMOS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM O SPD

2.1 - INTERAÇÃO COM NEUTRONS

A interação de neutrons com o SPD depende não só da energia dos neutrons mas também das propriedades nucleares dos materiais que compõem o detector. Dentro de um reator, os neutrons são gerados no processo de fissão com energia média de 2 MeV e são moderados por colisões com os átomos do moderador (isto é, perdem energia à medida que sofrem colisões de espalhamento) até atingir o equilíbrio térmico (aproximadamente 0,025 eV) com o meio ambiente.

Dentro dos grupos de energia dos neutrons (térmico, epitérmico e rápido) as reações são caracterizadas pela densidade do fluxo de neutrons e pelas seções eficazes. Como as seções de choque para neutrons rápidos são bastante pequenas, são consideradas para o SPD apenas as reações induzidas por neutrons térmicos e epitérmicos. Assim, para os materiais com número atômico entre 25 e 80 (limites normalmente utilizados para os materiais emissores), as reações preponderantes com neutrons térmicos e epitérmicos são a captura radioativa e o espalhamento elástico.

Na captura radioativa, o núcleo de um material (núcleo alvo) absorve um neutron formando um núcleo composto que emite um ou mais fótons de raios gama. O núcleo final deste material é um isótopo do núcleo alvo com um número de massa uma unidade maior. Já no espalhamento elástico, a interação do neutron com um núcleo é considerada como uma colisão do tipo "bola de bilhar" isto é, o neutron transmite parte da sua energia cinética para o núcleo (em geral, a direção do neutron é diferente da que teria antes da interação).

2.2 - INTERAÇÃO COM A RADIAÇÃO GAMA

Há vários processos que caracterizam a interação do fóton com a matéria dependendo essencialmente da sua energia e do meio material que ele atravessa. A energia dos fótons é transferida para o meio material através dos seguintes processos:

- Efeito fotoelétrico
- Efeito Compton
- Produção de pares

2.2.1 - EFEITO FOTOELÉTRICO

O efeito fotoelétrico é caracterizado pela transferência total da energia do fóton a um único elétron orbital, que é expulso do átomo absorvedor. A figura 2.1 apresenta, esquematicamente, o efeito fotoelétrico.

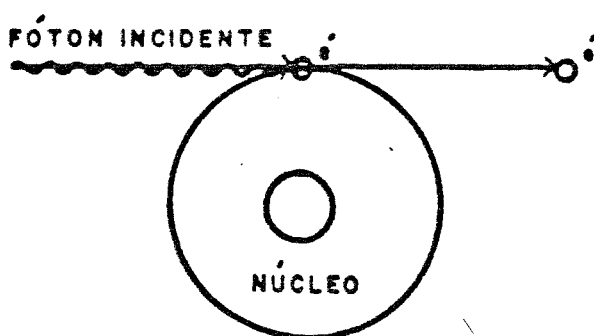


Figura 2.1 - Representação esquemática do efeito fotoelétrico

Neste efeito, toda a energia é transferida ao elétron que é expelido com energia cinética (T) dada por:

$$T = h\nu - B_e$$

sendo $h\nu$ a energia do fóton e B_e a energia de ligação do elétron ao seu orbital (energia que foi dissipada para desfazer a ligação do elétron ao átomo). O elétron expelido do átomo, denominado fotoelétron, pode perder a energia recebida do fóton através do processo de ionização de outros átomos. O efeito fotoelétrico é predominante com gamas de baixa energia (com energias $E < 0,6$ MeV para o chumbo e $E < 0,06$ MeV para o alumínio) e para elementos de elevado número atômico (Z) pois a taxa de reação por efeito fotoelétrico é proporcional a Z^5 [27].

2.2.2 - ESPALHAMENTO COMPTON

No efeito Compton o fóton incidente cede apenas parte de sua energia para um elétron periférico, resultando num outro fóton com uma energia menor e que é emitido numa direção diferente da incidente. A figura 2.2 apresenta, esquematicamente, o efeito Compton.

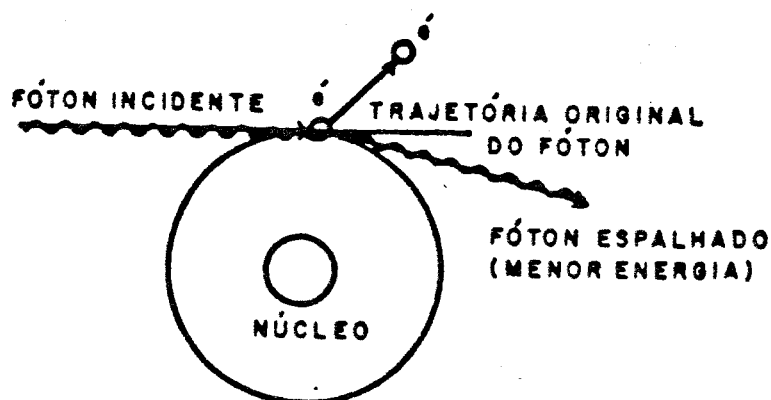


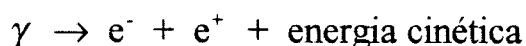
Figura 2.2 - Representação esquemática do efeito Compton

O efeito Compton é predominante com fótons de energias intermediárias (da ordem de 50 keV a 15 MeV para o alumínio e de 500keV a 4 MeV para o chumbo), faixa em que a energia de ligação (B_e) é desprezível quando comparada com a energia do fóton. Dessa forma, esta interação é descrita como um espalhamento por um elétron livre, inicialmente em repouso.

O efeito Compton é inversamente proporcional à energia do fóton e proporcional ao número atômico (Z) do material.

2.2.3 - FORMAÇÃO DE PARES

A produção de pares ocorre somente quando fótons de energia igual ou superior a 1,02 MeV passam próximos a núcleos de elevado número atômico. Neste caso, o fóton interage com o núcleo e desaparece dando origem a um par elétron-pósitron ($2 * m_e * c^2 = 1,02 \text{ MeV}$) através da reação:



O pósitron, após transmitir, por colisões, sua energia cinética ao meio ambiente, volta a se combinar com um elétron e dá origem a 2 fótons, cada um com uma energia de 0,511 MeV (energia equivalente à massa de repouso do elétron: $E = m_e * c^2 = 0,511 \text{ MeV}$).

A produção de pares é predominante para energias elevadas e para elementos de elevado número atômico (aumenta com Z^2).

A figura 2.3 ^{/37/}, a seguir, mostra a interação predominante em função do número atômico do núcleo e da energia do fóton:

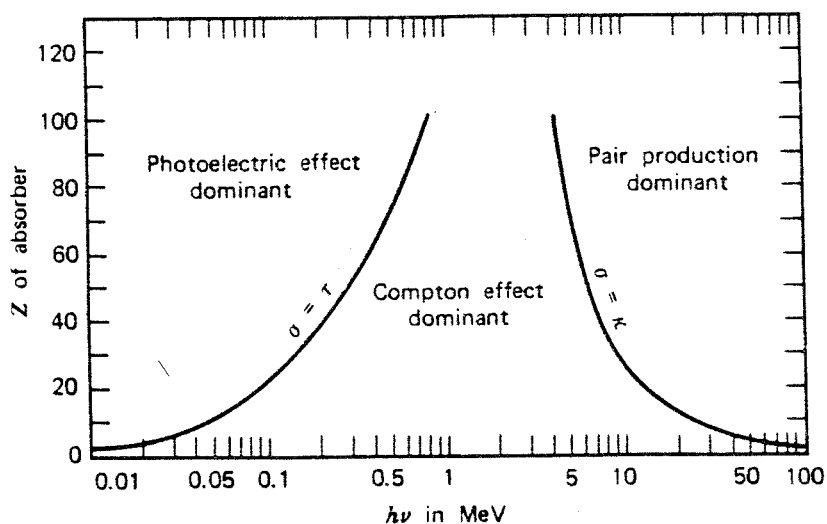


Figura 2.3 - Interação predominante em função da energia do fóton e número atômico

3 - DESCRIÇÃO DO SPD

Como pode ser visto na figura 3.1, a configuração típica do SPD é coaxial consistindo de um emissor, um material isolante e de um coletor (o próprio revestimento do detetor).

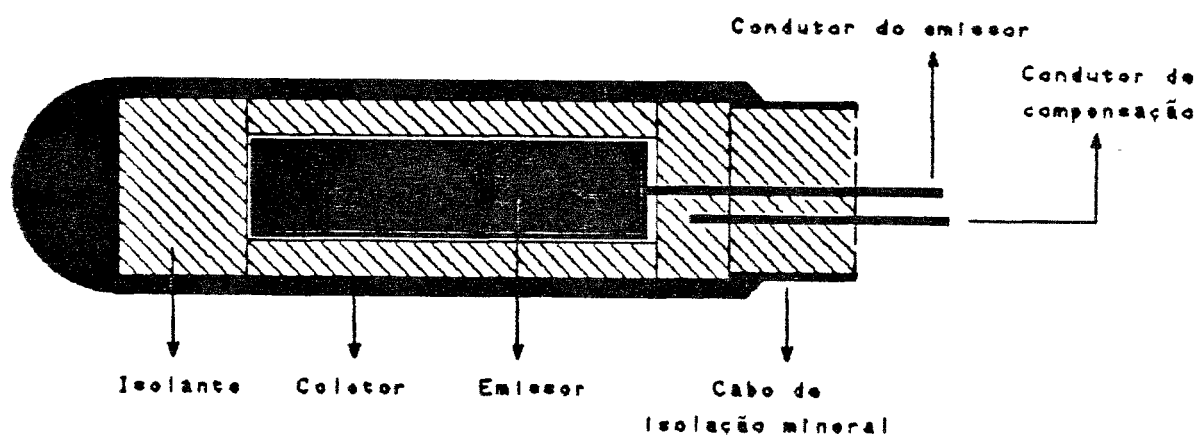


Figura 3.1 - Vista esquemática de um SPD

O seu princípio de funcionamento baseia-se no fato do emissor, através de reações com neutrons e raios gama, ejetar elétrons (ou partículas beta) que devem atravessar o isolante e atingir o coletor, gerando assim uma corrente convencionalmente chamada de positiva. Para o coletor, as mesmas reações podem ocorrer liberando elétrons que indo em direção ao emissor geram uma corrente negativa.

3.1 - EMISSOR

O emissor é composto de um material metálico que, através de reações (n, γ, e) , (γ, e) ou (n, β) , é responsável pela corrente principal do SPD. Como características principais, este material deve possuir alto ponto de fusão para poder ser utilizado dentro do núcleo do reator, facilidade de soldagem com o condutor para o envio do sinal e razoável seção de choque de absorção de neutrons para a otimização do compromisso entre a perda de sensibilidade ("queima") e o sinal fornecido. A superfície do fio emissor não deve ser áspera (facilitando assim a montagem) e o comprimento, diâmetro e peso devem ser controlados para a obtenção de SPDs com uma faixa estreita de variação na sua sensibilidade. A pureza do material deve ser maior ou igual a 99,7 % .

As tabelas 3.1 e 3.2 fornecem algumas características dos materiais mais utilizados como emissor, cujas características serão discutidas com mais detalhes no Capítulo 5:

Tabela 3.1 - Tipo de resposta, queima e característica do sinal de emissores mais comuns

Material emissor	Tipo de resposta	Característica do sinal e queima
Vanádio	Resposta lenta (99% da resposta em 25 minutos /13/)	Sinal devido à radiação gama ⇒ negativo Sinal devido a neutrons ⇒ positivo QUEIMA ⇒ 0,013 % ao mês /9,31,49,53/
Cobalto	Resposta rápida. Forma-se uma corrente de "Background" devido ao Co-61 que aumenta com o tempo de exposição	Sinal devido à radiação gama ⇒ negativo Sinal devido a neutrons ⇒ positivo QUEIMA ⇒ 0,1 % ao mês /15,31,47,49,53/
Ródio	Resposta lenta (99 % da resposta em 12,6 minutos /13/)	Sinal devido à gama ⇒ positivo Sinal devido a neutrons ⇒ positivo QUEIMA ⇒ 0,23 % ao mês /15,31,49,53/
Prata	Resposta lenta (99% da resposta em 11,3 minutos /13/). Possui dois isótopos com aproximadamente mesma abundância.	Sinal devido à radiação gama ⇒ positivo Sinal devido a neutrons ⇒ positivo QUEIMA ⇒ 0,2% ao mês /53/
Háfnio	Resposta rápida. Possui vários isótopos.	Sinal devido à radiação gama ⇒ positivo Sinal devido a neutrons ⇒ positivo QUEIMA ⇒ 0,5% ao mês /44/
Platina	Resposta rápida. Possui vários isótopos.	Sinal devido à radiação gama ⇒ positivo Sinal devido a neutrons ⇒ positivo QUEIMA ⇒ 0,01% ao mês /31,49/

Nota: A queima refere-se ao consumo do material emissor em virtude da absorção de neutrons (considerado um fluxo de neutrons térmicos de $1 \cdot 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).

Tabela 3.2 - Abundância isotópica, seção de choque, meia-vida e ressonâncias de materiais usados como emissores de SPDs

Material emissor	Abundância isotópica (%)	Seção de choque de absorção (barns) para neutrons térmicos	Meia-vida	Ressonâncias principais
Vanádio	V-51 \Rightarrow 99,75	5,06 \pm 0,06	3,75 minutos	167 eV
Cobalto	Co-59 \Rightarrow 100	19 \Rightarrow Co-60 18 \Rightarrow Co-60m 2 \Rightarrow Co-61	5,26 anos 10,47 minutos 99 minutos	132 eV
Ródio	Rh-103 \Rightarrow 100	139 \Rightarrow Rh-104 11 \Rightarrow Rh-104m	42 segundos 4,4 minutos	1,257 eV
Prata	Ag-107 \Rightarrow 51,35 Ag-109 \Rightarrow 48,65	35 89 \Rightarrow Ag-110 3 \Rightarrow Ag-110m	2,42 minutos 24,4 segundos	16,5; 41,5; 44,8; e 51,3 eV 5,19; 30,4; 40,1 e 55,6 eV
Háfio	Hf-174 \Rightarrow 0,17 Hf-176 \Rightarrow 5,2 Hf-177 \Rightarrow 18,5 Hf-178 \Rightarrow 27,2 Hf-179 \Rightarrow 13,8 Hf-180 \Rightarrow 35,1	390 38 \Rightarrow Hf-177 38 \Rightarrow Hf-177m 365 \Rightarrow Hf-178 1,1 \Rightarrow Hf-178m 33 \Rightarrow Hf-179 53 \Rightarrow Hf-179m 45 \Rightarrow Hf-180 0,34 \Rightarrow Hf-180m 12,6 \Rightarrow Hf-181	70 dias ----- 1,1 segundos ----- 4,3 segundos ----- 18,6 segundos ----- 5,5 horas 42,4 dias	30 eV ----- ----- 1,098 e 2,38 eV 7,78 e 104,5 eV ----- 5,68 e 17,62 eV ----- 72,6 eV
Platina	Pt-192 \Rightarrow 0,78 Pt-194 \Rightarrow 32,8 Pt-195 \Rightarrow 33,7 Pt-196 \Rightarrow 25,4 Pt-198 \Rightarrow 7,2	8 1,2 27 0,9 \Rightarrow Pt-197 0,05 \Rightarrow Pt-197m 4 \Rightarrow Pt-199 0,03 \Rightarrow Pt-199m	----- ----- ----- 18 horas 78 minutos 31 minutos 14,1 segundos	----- ----- ----- 11,9; 19,6 e 66,9 eV ----- 95,8 eV

3.2 - ISOLANTE

O isolante é composto de um material cerâmico que possui como funções isolar eletricamente o coletor do emissor, servir de suporte para o emissor e, na região do cabo, isolar cada um dos condutores do encamisamento e entre si.

Como características este material não deve sofrer grande degradação sob radiação nem com a alta temperatura, possuir alta resistência de isolação, baixa seção de choque de absorção de neutrons e uma espessura suficientemente fina (geralmente 0,25 mm) para permitir a passagem dos elétrons até o coletor. Normalmente é utilizado como isolante o óxido de alumínio (Al_2O_3) ou óxido de magnésio (MgO) com uma pureza igual ou maior a 99,7 %.

A comparação do desempenho destes dois óxidos, utilizados como isolante em SPDs, foi realizada por T.D. CURTIS ^{/21/} num reator PWR da Babcock & Wilcox onde foi constatada uma degradação da resistência de isolação nos SPDs que utilizavam o óxido de magnésio. Esta degradação, a despeito de várias técnicas de manufatura, geometrias e fornecedores do isolante, estava distribuída uniformemente na porção do SPD posicionada dentro da parte ativa do núcleo. A figura 3.2 e tabela 3.3 a seguir ^{/21/} apresentam, respectivamente, o número de falhas dos SPDs testados no reator OCONEE e a variação da resistência de isolação de SPDs, sob radiação, que utilizavam o óxido de alumínio e o óxido de magnésio.

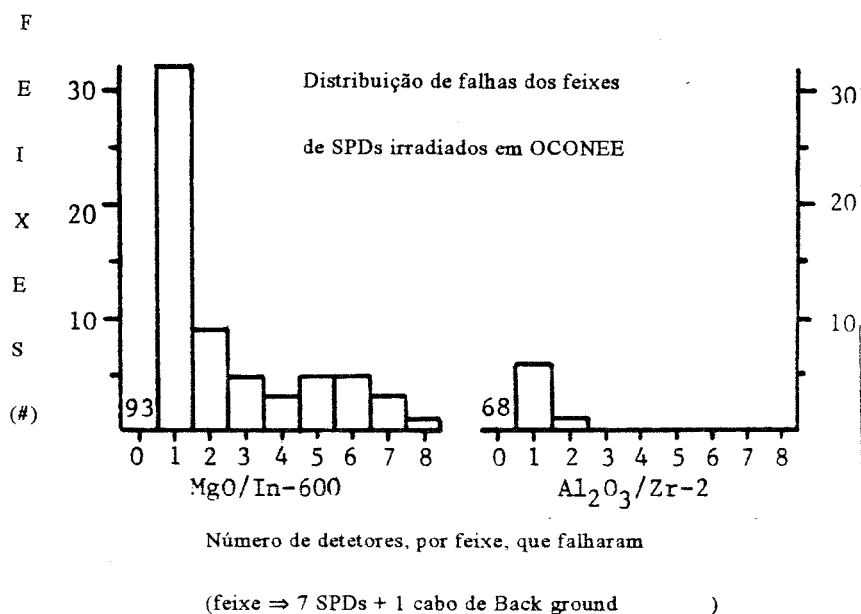


Figura 3.2 - Número de falhas de SPDs testados no reator OCONEE

Tabela 3.3 - Variação da resistência de isolamento utilizando-se óxido de alumínio e óxido de magnésio como isolante nos SPDs (sob radiação)

	Isolante	
	MgO	Al ₂ O ₃
F (fator multiplicativo para a correção da resistência de isolamento dos SPDs)	1,009	1,0000
	1,024	1,0000
	1,034	1,0000
	1,028	1,0000
	1,046	1,0000
	1,027	1,0000
	1,029	1,0000
Média	1,032	1,0000
Onde:	F = 1,032 corresponde ~ 6,25*10 ⁶ Ohms F = 1,0000 corresponde ~ 2*10 ⁸ Ohms	

Continuando a comparação entre os dois óxidos, utilizados como isolante em SPDs, temos que o óxido de magnésio apresenta as seguintes desvantagens:

- É mais higroscópico, /44/ dificultando o processo de desumidificação do cabo para a obtenção de um valor de resistência alto (quando da montagem do SPD) e pela tendência do cabo romper-se, em caso de penetração de água, devido ao processo de inchamento que ocorre com o mesmo /9,20,44/.

- Maior variação da resistência de isolamento quando combinando a radiação e temperatura como visto na figura 3.3 /19/, apesar de apresentar menor variação quando se considera apenas o aumento de temperatura como visto na figura 3.4 /20/:

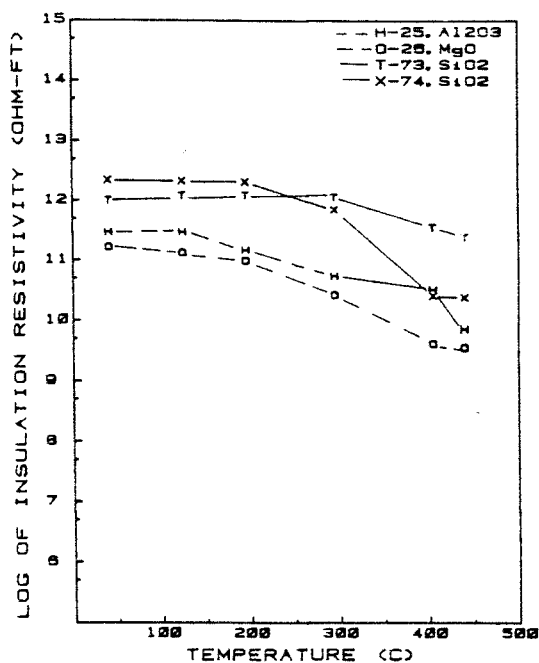


Figura 3.3 - Variação da resistência de isolamento do óxido de magnésio e óxido de alumínio quando combinando os efeitos de radiação (10^6 R/h) e temperatura

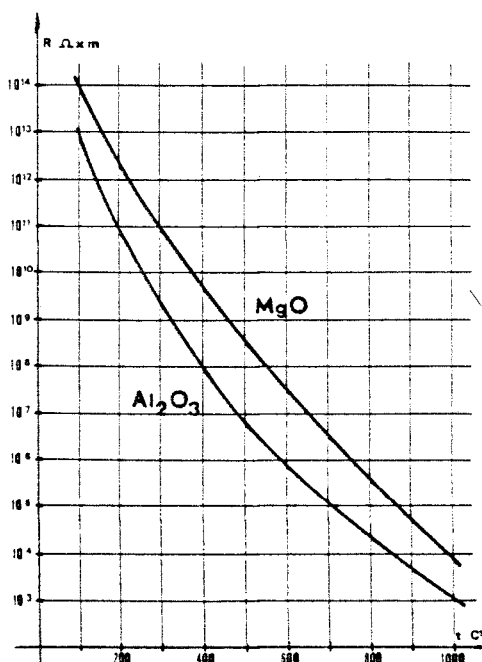


Figura 3.4 - Variação da resistência de isolamento do óxido de magnésio e óxido de alumínio com o aumento de temperatura

Como vantagens, o óxido de magnésio apresenta:

- Menor seção de choque de absorção e conseqüentemente menor corrente induzida por neutrons como mostrado na tabela 3.4 através das seções de choque do alumínio e magnésio ^{/27/} (pois a seção de choque de absorção do oxigênio é desprezível):

Tabela 3.4 - Seções de choque de absorção para o alumínio e magnésio

<i>Seção de choque</i>	<i>alumínio</i>	<i>magnésio</i>
Microscópica (10^{-24}cm^2)	0,241	0,069
Macroscópica (cm^{-1})	0,015	0,003

Nota: seção de choque macroscópica \Rightarrow seção de choque microscópica multiplicada pelo número de núcleos por unidade de volume.

3.3 - COLETOR

O coletor tem por função receber os elétrons (ou partículas beta) originados no emissor para a geração de corrente.

É composto por um material metálico que deve possuir baixa seção de choque de absorção de neutrons, alto ponto de fusão, facilidade de soldagem e boa resistência à corrosão. Os materiais mais utilizados são o inconel 600 com no máximo 0,3 % em peso de manganês ^{/7/} e o aço inox. O aço inox normalmente não é utilizado por causa da presença do manganês na sua composição (entre 1 e 2 % ^{/45/}) pois:

- o manganês possui uma seção de choque de absorção de neutrons relativamente alta (13,3 barns)
- o manganês emite uma partícula beta com uma energia de 2,86 MeV (após a captura de um neutron) que representa uma interferência no sinal medido, ou seja, partículas beta que, uma vez direcionadas para o emissor, geram uma corrente negativa.

3.4 - CABO DE LIGAÇÃO

Os materiais dos condutores e da capa externa do cabo de ligação devem, na medida do possível, possuir as mesmas propriedades do material do coletor para facilitar o processo de montagem, resistir as condições adversas (alta temperatura e radiação) dentro do núcleo do reator e influenciar o menos possível na corrente final.

Uma característica do cabo de ligação do SPD é que ele geralmente é bifilar pois o cabo sofre os efeitos (em menor escala) da radiação incidente provocando uma corrente que será sobreposta à corrente do emissor causando erros quando da sua interpretação. Para suprimir esta corrente, o cabo do SPD possui 2 condutores fornecendo dois sinais:

1. sinal gerado no emissor mais o sinal gerado no condutor de sinal
2. sinal gerado no condutor de compensação

O condutor de compensação possui aproximadamente o mesmo comprimento do condutor de sinal porém não é ligado ao emissor. Desta forma, o condutor de sinal envia a corrente gerada pelo emissor e por si próprio e o condutor de compensação (com as mesmas características e geometria do condutor de sinal) envia a corrente gerada apenas nele possibilitando a subtração destes dois sinais para a obtenção da corrente devido ao emissor.

4 - COMPOSIÇÃO DO SINAL DO SPD

Uma vez instalado no núcleo de um reator nuclear, a corrente induzida no SPD (porção do emissor ou do cabo) pode ser atribuída a quatro parcelas:

- 1- corrente devido à captura de neutrons
- 2- corrente devido aos raios gama de captura
- 3- corrente devido aos raios gama do reator
- 4- corrente devido a elétrons gerados nos materiais do reator

4.1 - CORRENTE DEVIDO À CAPTURA DE NEUTRONS

Dependendo dos materiais utilizados, a captura de neutrons no SPD (cabo e a porção que contem o emissor) resulta na formação de núcleos radioativos que decaem por emissão de partículas beta. Estas partículas beta de alta energia (por exemplo 2,47 MeV para o vanádio e 2,44 MeV para o ródio) emitidas são responsáveis pela corrente que fluirá entre coletor e emissor sendo chamada de interação (n, β) . A corrente é proporcional ao fluxo de neutrons e é atrasada pois segue as mudanças na intensidade de fluxo com uma constante de tempo determinada pela meia-vida do núcleo radioativo. Esta interação é o mecanismo preponderante na produção de corrente em detetores com emissores de vanádio, ródio e prata.

Para o cabo do SPD que utiliza o inconel 600, a corrente (n, β) resulta primariamente do decaimento beta do Ni-65 e Mn-56 produzido pela captura de neutrons no Ni-64 e Mn-55 respectivamente, sendo que esta corrente é atrasada e possui uma constante de tempo de aproximadamente 352 segundos. O manganês é considerado como uma impureza e em geral apresenta uma porcentagem máxima de 0,3 % em pêso ^{17/}. Ressalte-se que dependendo da sua quantidade relativa presente nos fios do cabo e no encamisamento, a corrente do cabo pode ser positiva ou negativa.

4.2 - CORRENTE DEVIDO AOS RAIOS GAMA DE CAPTURA

A captura de neutrons nos materiais é normalmente acompanhada pela emissão de raios gama de captura. Estes fótons interagem com o material liberando elétrons, via efeitos Compton e fotoelétrico, causando assim uma corrente. Este processo é chamado de interação (n, γ , e) que inclui, também, os possíveis elétrons resultantes de processos de conversão interna. Esta corrente é proporcional ao fluxo de neutrons e é instantânea, isto é, a corrente segue as mudanças de fluxo instantaneamente. Este é o mecanismo principal de produção de corrente em detetores com emissor de cobalto (no início de vida) e um importante mecanismo produtor de corrente em detetores com emissor de platina. No cabo, os mesmos mecanismos podem ocorrer em maior ou menor intensidade, dependendo dos materiais utilizados, produzindo um sinal que é proporcional ao fluxo de neutrons.

4.3 - CORRENTE DEVIDO AOS RAIOS GAMA DO REATOR

Da mesma maneira como ocorre com os raios gama de captura, os raios gama do reator também interagem com o SPD, podendo liberar elétrons no detetor e cabo produzindo assim uma corrente. Este processo é chamado de interação (γ , e) e pode ser separado em uma componente imediata e outra atrasada.

A componente imediata da corrente tem origem nos raios gama de captura e de fissão associados com a captura de neutrons no combustível e materiais do reator. Assim, esta componente do fluxo gama e a corrente (γ , e) resultante é proporcional ao fluxo de neutrons.

A componente atrasada surge do decaimento dos produtos de fissão e ativação fazendo com que a corrente (γ , e) total não siga as mudanças de fluxo instantaneamente, mas tenha uma componente atrasada. Esta interação (γ , e) é um importante mecanismo de produção de corrente em detetores com emissor de platina (pois a sua seção de choque de absorção de neutrons é relativamente baixa) e em detetores em que o número atômico do emissor é significativamente maior que o do coletor.

4.4 - CORRENTE DEVIDO AOS ELÉTRONS GERADOS NOS MATERIAIS DO REATOR

Os elétrons gerados nos materiais do reator também podem contribuir para a corrente de saída ^{/7/} sendo este processo chamado de interação (e). Estas interações, entretanto são consideradas parasitas, e usualmente são minimizadas podendo ser desprezadas.

4.5 - SINAL DO SPD

No SPD ou cabo, todas as quatro interações ocorrem em maior ou menor grau, dependendo dos materiais utilizados. Assim, a corrente líquida é a soma algébrica das correntes individuais devido às diferentes interações, ou seja, a corrente total de um SPD é dada por:

$$I_T = I_{n, \beta} + I_{n, \gamma, e} + I_{\gamma, e} + I(e)$$

onde :

I_T = corrente total do SPD

$I_{n, \beta}$ = componente lenta da corrente devido ao decaimento beta no emissor

$I_{n, \gamma, e}$ = componente rápida da corrente devido aos raios gama de captura de neutrons no emissor

$I_{\gamma, e}$ = componente rápida da corrente devido aos raios gama externos. Esta componente pode ser positiva ou negativa

$I(e)$ = componente rápida da corrente devido aos elétrons gerados na estrutura do reator.(desprezível)

Devemos observar que a corrente do SPD devido aos raios gama externos pode ser positiva ou negativa por ser função dos números atômicos do emissor e encamisamento -para uma dada geometria- pois os efeitos preponderantes para a geração de corrente são o efeito fotoelétrico e Compton, que são função do número atômico (a corrente medida é a diferença entre as correntes "saindo" do emissor e coletor). A figura 4.1, a seguir ^{/51/}, apresenta os valores médios das correntes devido aos gamas externos para SPDs com a mesma geometria e materiais em função do número atômico do material emissor:

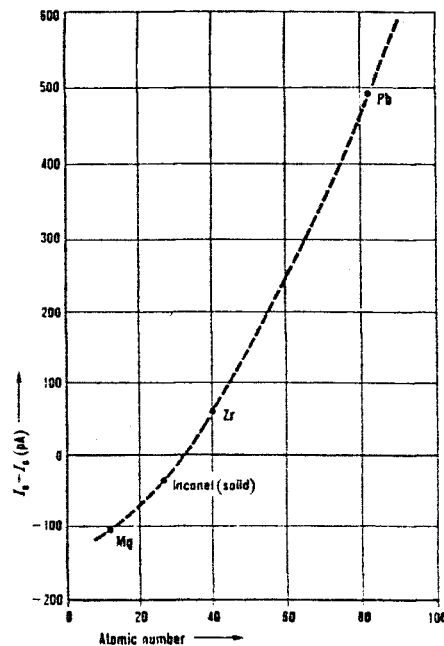


Figura 4.1 - Corrente do SPD devido aos gamas externos em função do número atômico do emissor

Assim, materiais emissores que possuam número atômico menor que o do coletor (25,6 para o aço inox e 27,2 para o inconel 600) terão uma corrente coletor-emissor maior que a corrente emissor-coletor implicando numa sensibilidade gama negativa para SPDs. Este, por exemplo, é o caso do vanádio ($Z = 23$) e do cobalto ($Z = 27$).

Em geral, as dimensões do cabo são escolhidas de forma que a contribuição devido aos raios gama externos, na corrente total, seja a menor possível. Já no caso do emissor, as dimensões e materiais são escolhidos para que uma ou duas interações predominem e produzam uma corrente total relativamente grande caracterizando dois grupos de SPDs, os chamados SPDs "rápidos" e os SPDs "lentos".

Nos SPDs rápidos predominam reações do tipo (n, γ, e) ou (γ, e) nas quais os raios gama de captura ou reações com os raios gama externos produzem corrente imediatamente, proporcionando indicação rápida da mudança do fluxo, possibilitando a tomada de ações de segurança. Os principais materiais emissores utilizados neste tipo de detetor são o cobalto, o háfnio e a platina. Já nos SPDs lentos predomina a reação do tipo (n, β) onde a corrente gerada resulta do decaimento beta que por sua vez está ligado à meia vida do isótopo formado. Em geral os SPDs lentos são utilizados para a medida do fluxo de neutrons em regime estacionário e os principais materiais emissores são o vanádio, o ródio e a prata.

Em relação ao material emissor, para os SPDs de resposta rápida constatou-se um gradual abandono do cobalto devido a sua grande ativação sendo substituído pela platina que além de apresentar uma menor ativação possui uma baixíssima queima, possibilitando um maior tempo de permanência dentro do núcleo. Para os SPDs lentos a escolha normalmente recai sobre o ródio, por sua grande sensibilidade a neutrons térmicos, sendo utilizado para as medidas de fluxo ou calibração de detetores de resposta rápida.

5 - PRINCIPAIS MATERIAIS USADOS COMO EMISSOR

A princípio qualquer material suscetível às reações (n, β) , (n, γ, e) ou (γ, e) pode ser utilizado como emissor. Porém, tendo em vista os compromissos de pequena dimensão, sinal mensurável, etc. poucos são os materiais que na prática são utilizados destacando-se: o cobalto, a platina, o vanádio, o ródio e a prata cujas características são apresentadas a seguir.

5.1 - COBALTO

O SPD com emissor de cobalto possui como característica a de apresentar inicialmente uma resposta imediata [100% da corrente devido à reação (n, γ, e)] mas após longo tempo de irradiação (aproximadamente dois anos sob fluxo de $10^{13} \text{ n*cm}^{-2}\text{*s}^{-1}$ /31/) o sinal imediato diminui para 85 % , passando o sinal total a possuir duas componentes lentas :

- componente (γ, e) devido ao decaimento gama do Co-60. Este sinal não responde à mudança do nível de fluxo e pode ser usado como uma "indicação" do fluxo integrado.
- componente (n, β) devido ao decaimento beta do Co-61. Responde à mudança do nível de fluxo com uma constante de tempo correspondente à meia vida do Co-61 (1,65 horas).

Este material foi um dos primeiros a ser utilizado como emissor em SPDs para reatores comerciais, porém, devido ao fato de gerar Co-60 (material com alto nível de radiação, prejudicial às operações de recarga e manutenção) sua utilização tem diminuído. O esquema de decaimento do cobalto é apresentado na figura 5.1 a seguir.

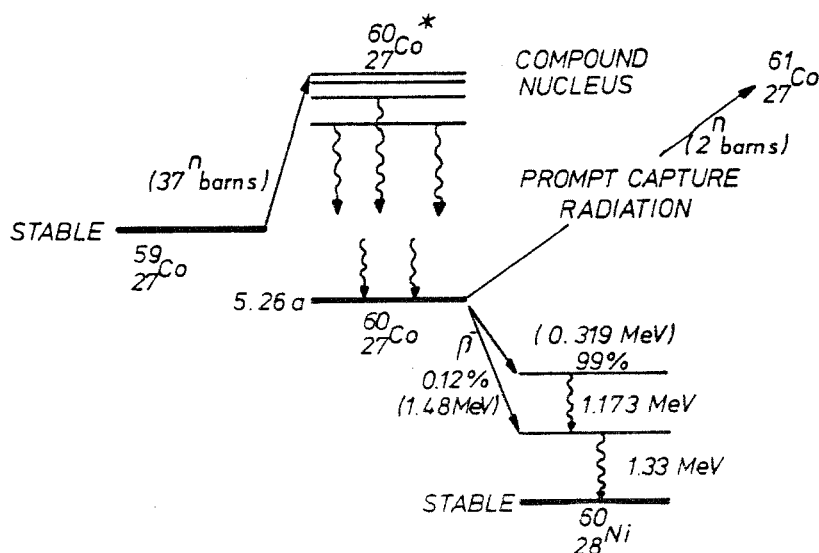


Figura 5.1 - esquema de decaimento do cobalto

5.2 - PLATINA

Nos detetores com emissor de platina a resposta é caracterizada por uma relativamente alta fração rápida (aproximadamente 80% ^{/46/}) e um número de termos de ação lenta. Uma fração dos sinais lentos é devida aos raios gama atrasados do reator e à captura de nêutrons na Pt-198 que possui uma seção de choque de 4 barns com uma abundância isotópica de $7,2\%$. A taxa de queima deste material é baixa (90% devido à Pt-195 - abundância isotópica de $33,7\%$ e com seção de 27 barns). Em termos de sinal, um detetor com emissor de platina produz uma corrente num reator PWR aproximadamente 10 vezes maior que a de um SPD com emissor de cobalto e 10 vezes menor que um SPD com emissor de ródio ^{/30/}.

5.3 - VANÁDIO

No caso do vanádio como material emissor, por apresentar alto percentual de abundância isotópica ($99,75\%$), a reação V-51 (n, β) Cr-52 é o mecanismo dominante para a produção de corrente.

A resposta do detetor pode ser representada por uma componente imediata devido as reações (n, γ, e) e (γ, e) de 5 a 8% ^{/55/} e uma componente de ação lenta (93%) devido a reação (n, β) no vanádio com uma meia-vida de $3,76$ minutos.

O Cr-52 possui uma seção de choque de 0,8 barns e dá origem a reação (n, γ, e). O esquema de decaimento do vanádio é apresentado na figura 5.2.

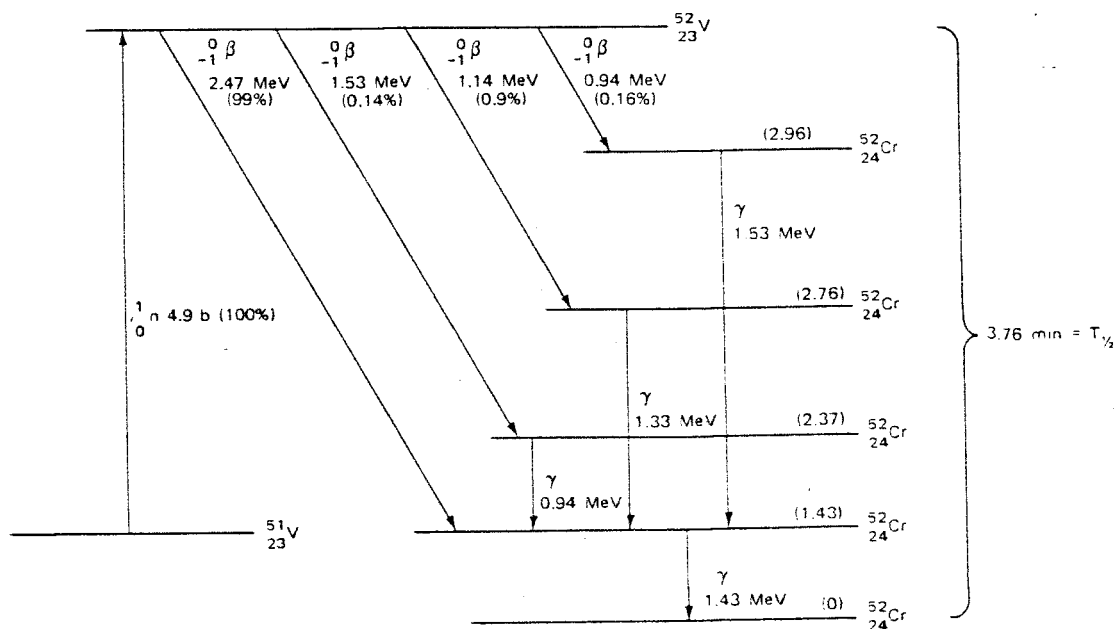


Figura 5.2 - esquema de decaimento do vanádio

5.4 - RÓDIO

O ródio é um dos materiais mais utilizados em SPDs para sistemas de monitoração "in-core" pela alta corrente fornecida e esquema de decaimento razoavelmente simples. Possui como desvantagem uma resposta lenta porém, a quantidade de estudos feito com ele permitem sua utilização como elemento de calibração, ou seja, a partir de uma calibração inicial, é possível, a qualquer instante determinar o fluxo neutronic real a partir do sinal do detetor.

O Ródio-103, tendo absorvido neutrons, pode resultar no Ródio-104 em dois estados diferentes, ou seja, o Rh-104 no estado fundamental (probabilidade de 92 %) e o Rh-104 num estado excitado (probabilidade de 7 %) conforme apresentado na figura 5.3:

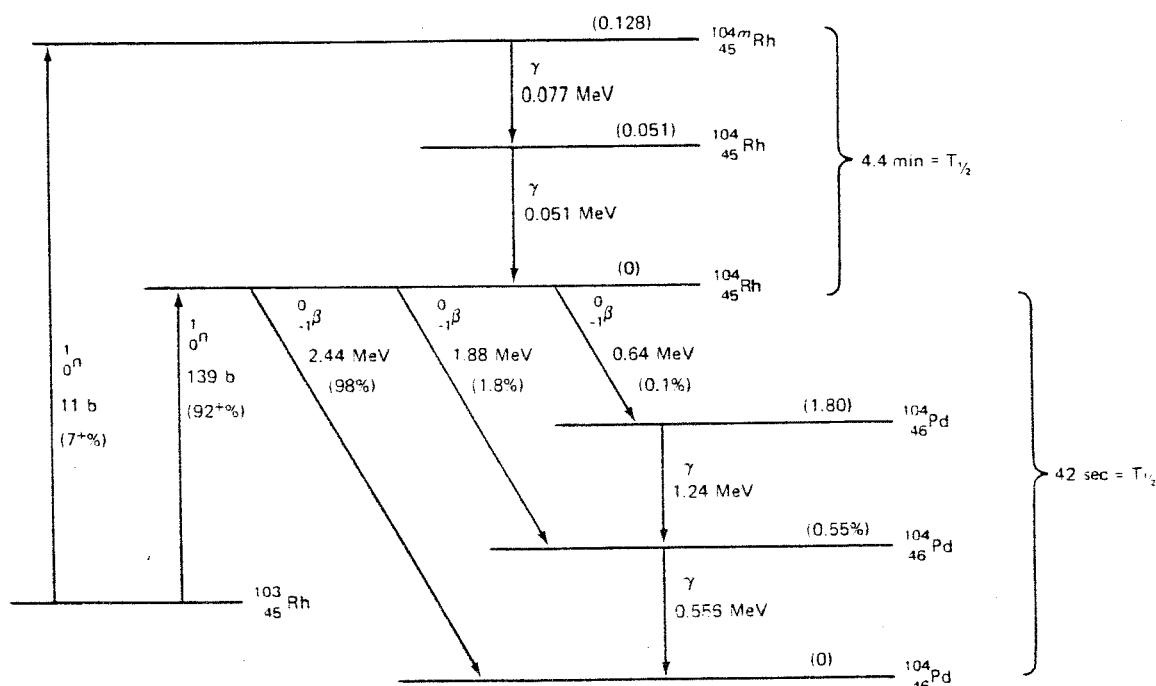


Figura 5.3 - esquema de decaimento do ródio

O Rh-104 (seção de choque de 139 barns) decai por emissão de partícula beta para o Pd-104 com uma meia-vida de 42 segundos e o Rh-104 metaestável (seção de choque de 11 barns) decai por emissão gama com uma meia-vida de 4,4 minutos para o Rh-104 após o que, decai por emissão de partícula beta para o Pd-104.

5.5 - PRATA

A prata é composta por dois isótopos com aproximadamente mesma abundância (Ag-107 com 51,35 % e Ag-109 com 48,65 %) gerando duas componentes de ação lenta:

Ag-107 com uma meia-vida de 2,42 minutos e seção de choque de absorção para neutrons térmicos de 35 barns. A sua parcela na contribuição da corrente é de 15,6 % ^{/22/} e queima (sob fluxo de $10^{13} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) de 0,092 % ao mês ^{/22/}

Ag-109 com meia-vida de 24,4 segundos e seção de choque de absorção para neutrons térmicos de 89 barns para a formação do Ag-110 e 3 barns para a formação do Ag-110 metaestável. A sua parcela na contribuição da corrente é de 78,2 % ^{/22/} e queima (sob fluxo de $10^{13} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) de 0,24 % ao mês ^{/22/}.

6 - MECANISMOS QUE INFLUENCIAM NA RESPOSTA DO DETETOR

6.1 - EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS ESPACIAIS

Quando dois eletrodos são separados por um material isolante, como no caso do SPD, o isolante atua como um depósito de elétrons (ou "dielétrico"). Estes elétrons aumentam até atingir o equilíbrio entre a sua saída e entrada. O potencial, quase estático, constitui assim uma barreira de potencial exigindo do elétron uma energia cinética E superior a um certo valor E_{\min} . Assim, os elétrons que possuem uma energia $E > E_{\min}$ atravessam o isolante e contribuem para a corrente do SPD enquanto que aqueles que possuem uma energia $E < E_{\min}$ são repelidos na direção de sua emissão. Através deste efeito, a resposta do SPD principalmente radiação gama (que deveria ser imediata utilizando-se, por exemplo, fontes de Co-60) torna-se função do tempo justificando a necessidade de um certo tempo de irradiação para se atingir a corrente de equilíbrio. Este efeito foi comprovado durante a irradiação de um SPD de prata numa fonte de Co-60 (taxa de exposição de $28,01 \cdot 10^4$ R/h, na posição de irradiação, com medidas da corrente realizadas a cada 30 segundos) como visto na figura 6.1 onde podemos notar uma tendência estabilização da corrente do detetor após aproximadamente 8 minutos:

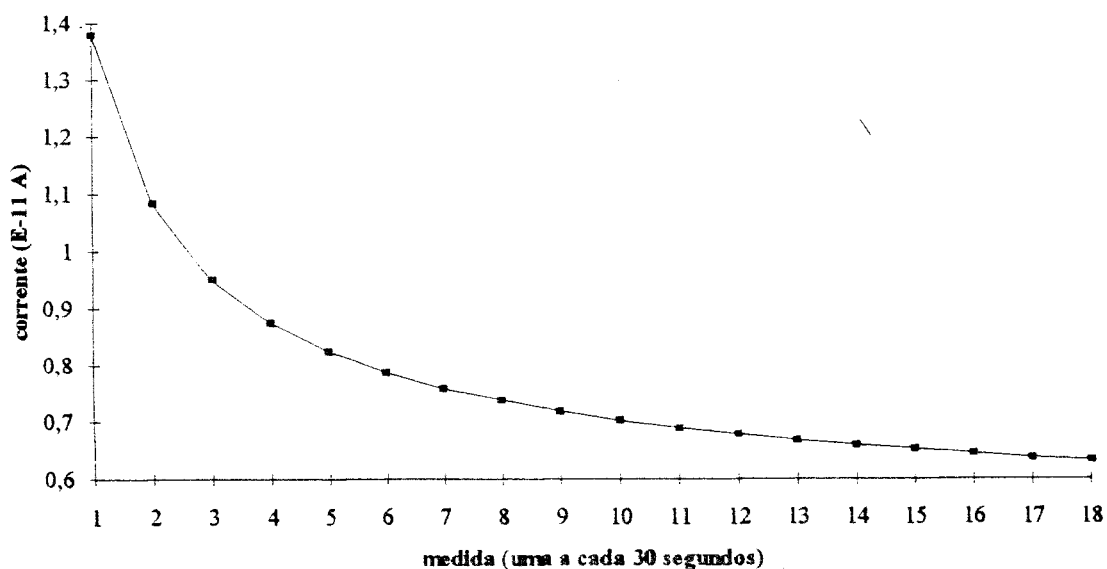


Figura 6.1 - Sinal do SPD de prata sob irradiação no campo gama

6.2 - EFEITO DE BATERIA

Como o óxido de magnésio é um material alcalino terroso (composto iônico) uma reação eletroquímica aparece entre isolante, material do encamisamento e condutores de sinal e compensação /12,42/, quando o grau de umidade é significativo, resultando numa relativamente grande corrente de "BG" (correntes que os detetores forneciam sem radiação). Para a comprovação deste efeito, também presente se utilizarmos a alumina, foi montada uma bancada experimental onde o SPD era conectado à entrada de um eletrômetro cuja saída analógica (0 a 2 Volts) estava conectada a um registrador x-t. As figuras 6.2 e 6.3 mostram os resultados obtidos para um SPD de Platina-04 (resistência de isolamento de $0,3 \cdot 10^9$ Ohms) e o eletrômetro com fundo de escala em 20 nA e para um SPD de Platina-05 (resistência de isolamento acima de $200 \cdot 10^9$ Ohms) e o eletrômetro com fundo de escala em 20 pA respectivamente (podemos notar, através das figuras, que uma elevada corrente de "BG" está associada ao SPD que possui baixa resistência de isolamento).

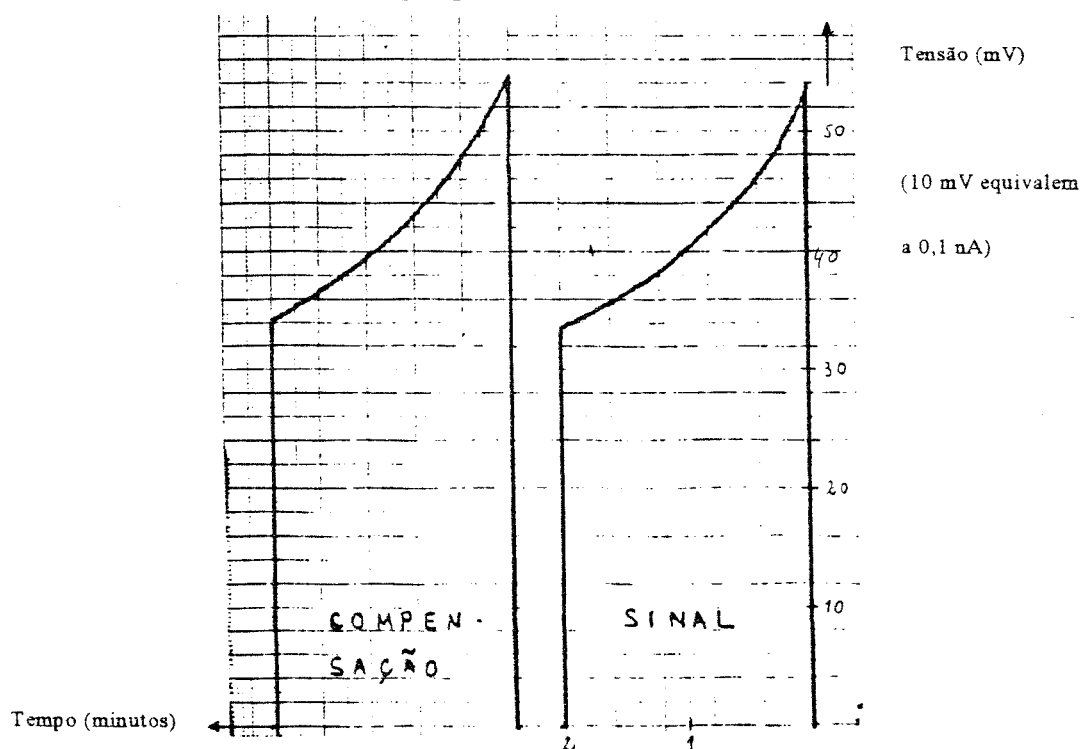


Figura 6.2 - Corrente de "BG" do SPD de Platina-04 (resistência de isolamento de $0,3 \cdot 10^9$ Ohms)

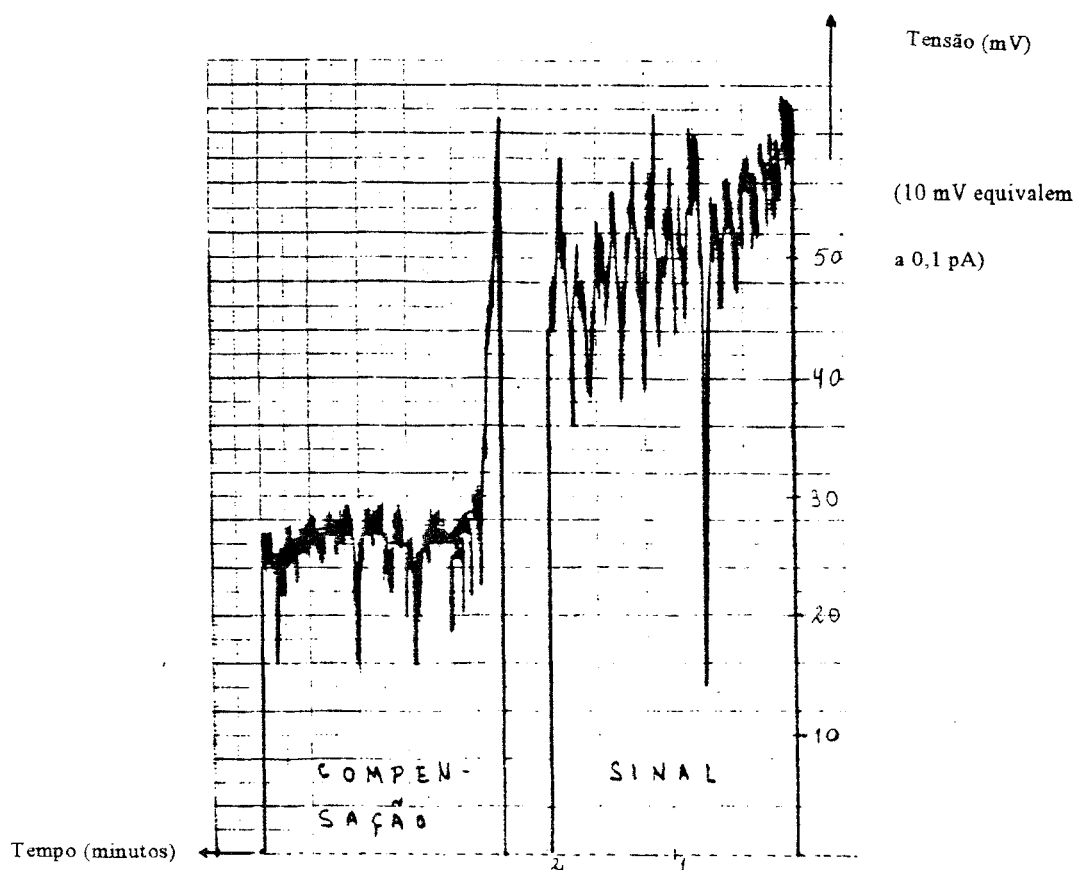


Figura 6.3 - Corrente de "BG" do SPD Platina-05 (resistência de isolamento acima de $200 \cdot 10^9$ Ohm)

Também, através de um dano ocorrido durante as irradiações no reator IEA-R1 com um SPD com emissor de platina, pode ser constatado mais claramente o efeito de bateria. Para este SPD que possuía inicialmente uma resistência de isolamento superior a $200 \cdot 10^9$ Ohms e corrente de "BG" da ordem de 10^{-12} A, após o dano, passou a apresentar uma resistência de isolamento de $1 \cdot 10^9$ Ohms e corrente de "BG" da ordem de 10^{-9} A (ressalte-se que antes do dano e sob fluxo de neutrons térmicos da ordem de 10^{11} $n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{seg}^{-1}$ este SPD fornecia uma corrente de $4,5 \cdot 10^{-10}$ A).

Podemos assim notar, através destes valores das correntes de "BG", a evidente necessidade de uma cuidadosa desumidificação do cabo do detetor (e do SPD como um todo) para a obtenção de uma resistência de isolamento elevada (preferencialmente acima de $1 \cdot 10^{12}$ Ohms) com a consequente diminuição do efeito "bateria".

6.3 - EFEITO DA TEMPERATURA

A influência que a temperatura causa no sinal do SPD (e portanto na sua sensibilidade) foi objeto de estudos teóricos e experimentais /6,8,23,24/. Através destes estudos ficou evidente a impossibilidade de se utilizar os valores de sensibilidade obtidos, por exemplo em reator do tipo piscina, como sendo a sensibilidade do SPD quando este é utilizado em reatores de potência sem incorrer em erros. Allan e Fehrenbach /6/ apresentaram os resultados de testes com vários SPDs, em diversas temperaturas, como visto nas figuras 6.4 e 6.5:

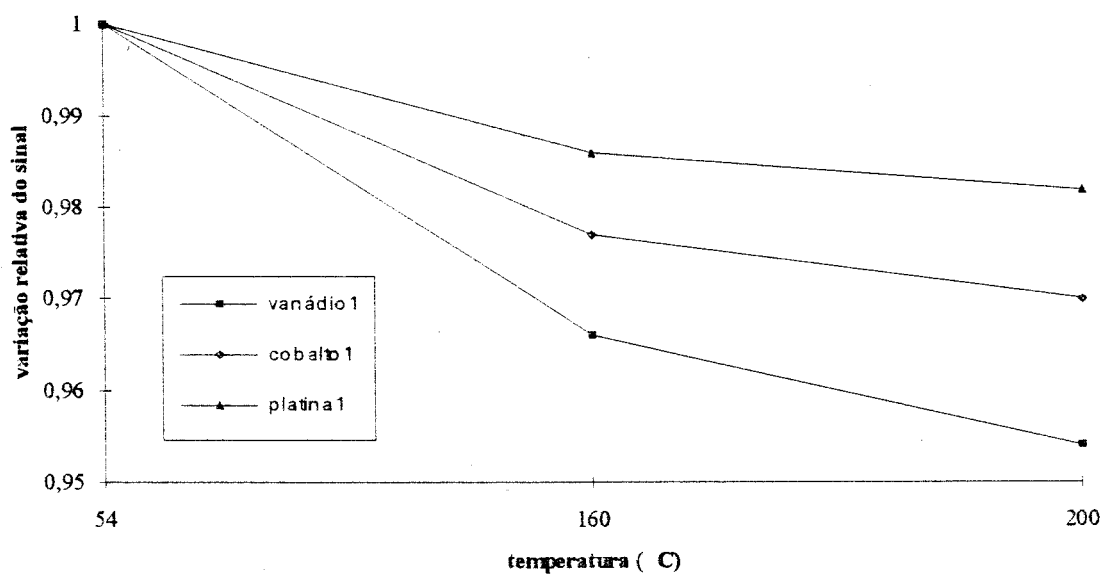


Figura 6.4 - Variação relativa dos sinais dos SPDs em função da temperatura

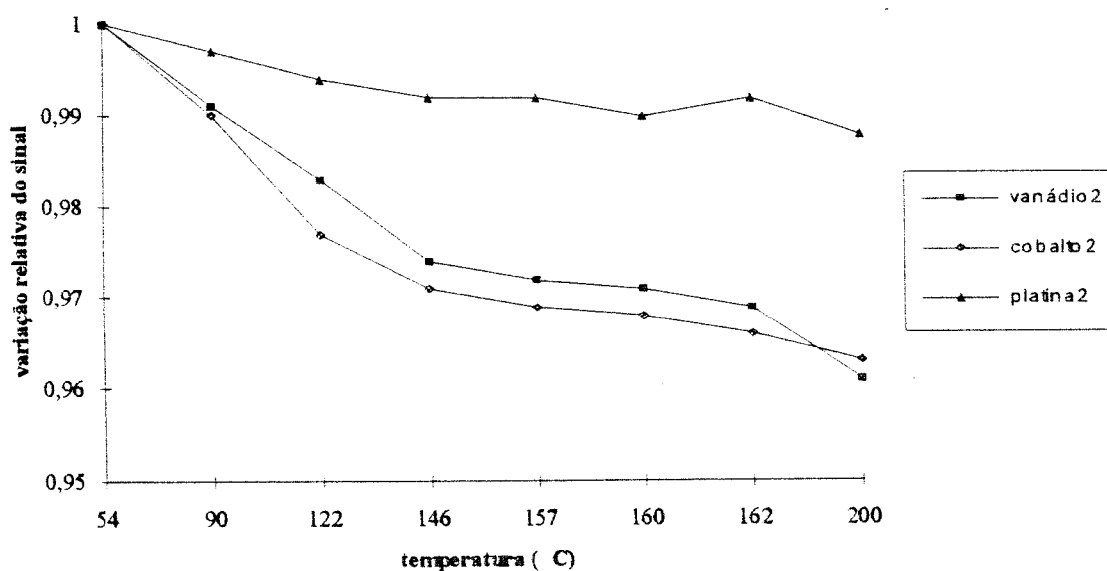


Figura 6.5 - Variação relativa dos sinais dos SPDs em função da temperatura

7 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a realização da parte experimental, várias etapas foram estabelecidas, a saber:

- obtenção de vários SPDs
- projeto de um dispositivo de irradiação de SPDs para ser utilizado no reator IEA-R1
- medidas da resistência de isolamento dos SPDs para selecionar os detetores com os melhores valores
- determinação da sensibilidade dos SPDs à radiação gama utilizando uma fonte de Co-60
- irradiação dos SPDs no reator IEA-R1 para a determinação das sensibilidades aos neutrons térmicos e epitérmicos

Para viabilizar o programa experimental, foram aproveitados alguns detetores já construídos pelo TE-IPEN que possuem as seguintes características:

diâmetro do emissor \Rightarrow 1,0 mm

comprimento do emissor \Rightarrow 100 mm

espessura do isolante (alumina) \Rightarrow 0,25 mm

espessura do coletor (aço inox) \Rightarrow 0,25 mm

diâmetro externo do coletor \Rightarrow 2,0 mm

Inicialmente foram obtidos 10 SPDs porém, na fase de medidas da resistência de isolamento, constatou-se que apenas 5 detetores podiam ser utilizados pois os demais não apresentavam a resistência necessária (aproximadamente $10 \cdot 10^9$ Ohms) como pode ser visto na tabela 7.1. Deve se observar que dos 5 SPDs utilizados nos testes, apenas 2 apresentavam a resistência mínima recomendada para uso em reatores de potência (acima de $200 \cdot 10^9$ Ohms).

Tabela 7.1 - Resistência de isolamento dos SPDs

SPD	Pontos das medidas	Resistência (10^9 Ohms)
Háfênio-01	entre os dois condutores	1,2
	entre condutor sinal e encamisamento	2,0
	entre condutor de comp. e encamisamento	1,0
Háfênio-02	entre os dois condutores	0,02
	entre condutor sinal e encamisamento	1,3
	entre condutor de comp. e encamisamento	1,6
Platina-04	entre os dois condutores	0,3
	entre condutor sinal e encamisamento	0,3
	entre condutor de comp. e encamisamento	0,5
Platina-05 *	entre os dois condutores	> 200
	entre condutor sinal e encamisamento	> 200
	entre condutor de comp. e encamisamento	> 200
Prata-02 *	entre os dois condutores	> 200
	entre condutor sinal e encamisamento	> 200
	entre condutor de comp. e encamisamento	> 200
Prata-03	entre os dois condutores	1,0
	entre condutor sinal e encamisamento	3,3
	entre condutor de comp. e encamisamento	4,3
Ródio-01 *	entre os dois condutores	22,0
	entre condutor sinal e encamisamento	7,5
	entre condutor de comp. e encamisamento	13,0
Ródio-02	entre os dois condutores	0,2
	entre condutor sinal e encamisamento	1,5
	entre condutor de comp. e encamisamento	1,8
Cobalto-03 *	entre os dois condutores	75,0
	entre condutor sinal e encamisamento	55,0
	entre condutor de comp. e encamisamento	60,0
Vanádio-01 *	entre os dois condutores	12,0
	entre condutor sinal e encamisamento	22,0
	entre condutor de comp. e encamisamento	24,0

Obs.: * \Rightarrow Detetor selecionado para irradiação

7.1 - DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE GAMA

Para avaliação da sensibilidade à radiação gama, os detetores foram irradiados numa fonte de Co-60 de $1,85 \cdot 10^{14}$ Becquerels (5000 Curies), disponível no TE-IPEN, utilizado-se um eletrômetro digital acoplado a uma impressora para o registro dos valores como mostrado na figura 7.1:

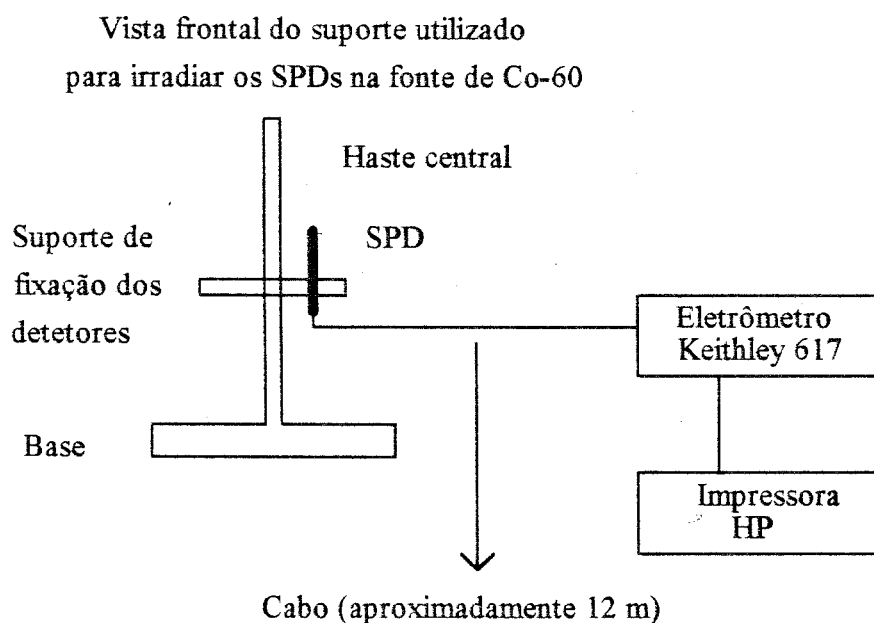


Figura 7.1 - Esquema do arranjo experimental utilizado na irradiação dos SPDs

Antes de se iniciar a irradiação foram medidas as correntes de "BG" nos condutores de sinal e compensação de cada SPD. Estas medidas foram realizadas tomando-se uma leitura por segundo durante, no mínimo, 8 minutos pois determinou-se experimentalmente, após várias medidas, que este é um tempo razoável para a corrente tender à estabilização (durante as irradiações) como mostrado na figura 7.2 a seguir:

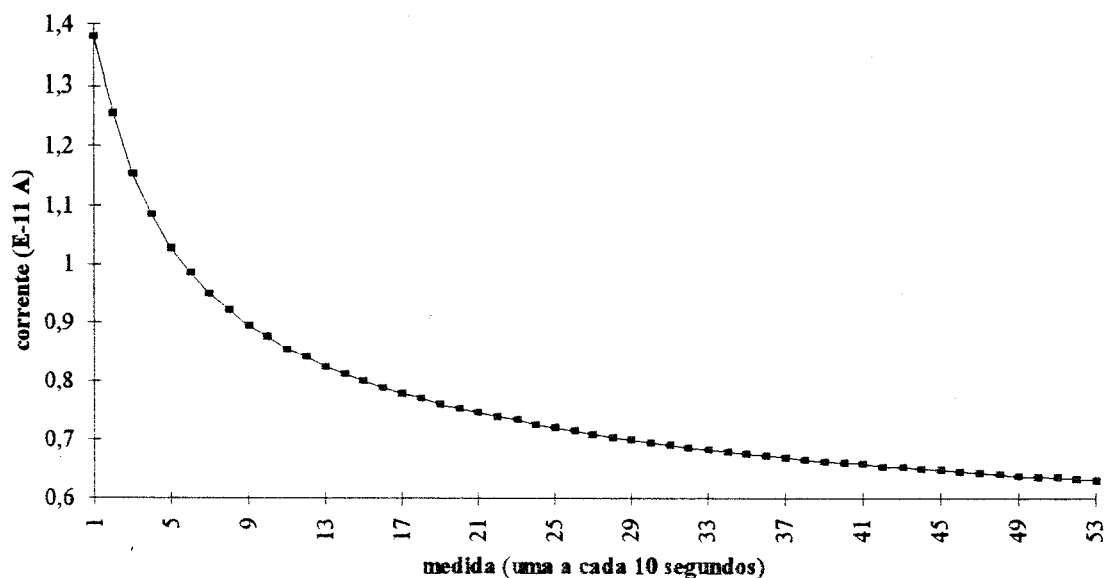


Figura 7.2 - Corrente do condutor de sinal do SPD com emissor de prata sob irradiação

A sensibilidade à radiação gama dos 5 SPDs foi determinada medindo-se a corrente durante um mínimo de 8 minutos (uma medida por segundo) e realizada uma média dos valores do último minuto (oitavo). A tabela 7.2 mostra os valores médios das correntes de "BG" (corrente que o detetor fornece mesmo sem radiação) e das correntes obtidas sob irradiação.

Tabela 7.2 - Valores médios das correntes de "BG" e sob irradiação, na fonte de Co-60, dos SPDs em estudo

SPD	I_{sBG} (10^{-12} A)	I_{cBG} (10^{-12} A)	I_s (10^{-12} A)	I_c (10^{-12} A)
Vanádio	0,02	0,06	- 5,91	- 3,53
Cobalto	- 0,62	- 1,27	- 8,68	- 7,05
Ródio	-0,87	- 0,86	5,02	- 1,36
Prata	0,83	0,73	4,99	- 0,88
Platina	0,57	0,55	54,11	1,29

Onde:

I_{sBG} = corrente média de "BG" do condutor de sinal

I_{cBG} = corrente média de "BG" do condutor de compensação

I_s = corrente média do condutor de sinal

I_c = corrente média do condutor de compensação

As figuras 7.3 a 7.7 mostram o comportamento das correntes medidas dos SPDs (condutor de sinal e compensação) durante o último minuto de irradiação (oitavo) com medidas realizadas a cada segundo:

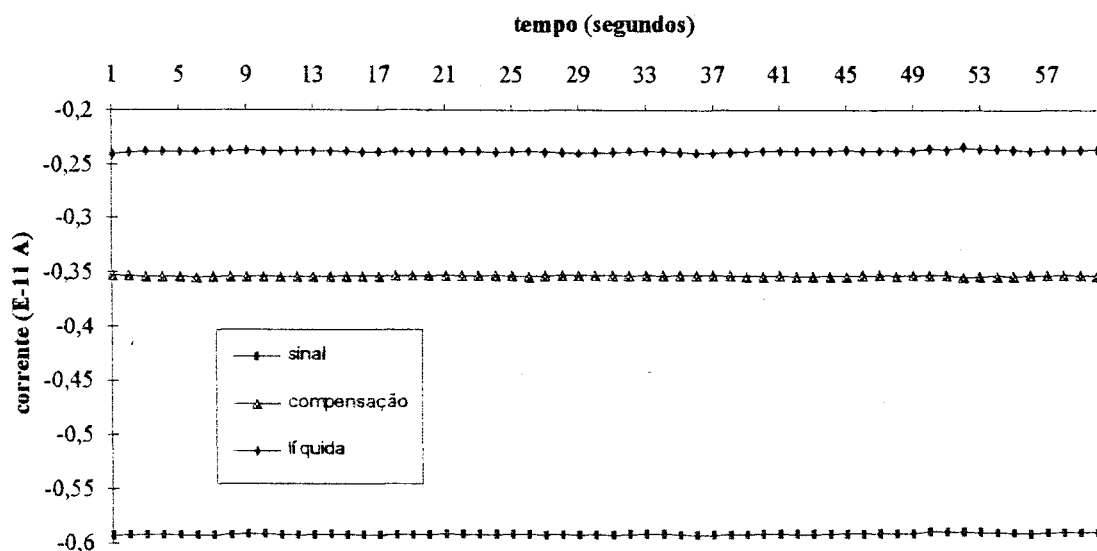


Figura 7.3 - Corrente do condutor de sinal, compensação e líquida do SPD de vanádio (uma medida por segundo) no campo gama

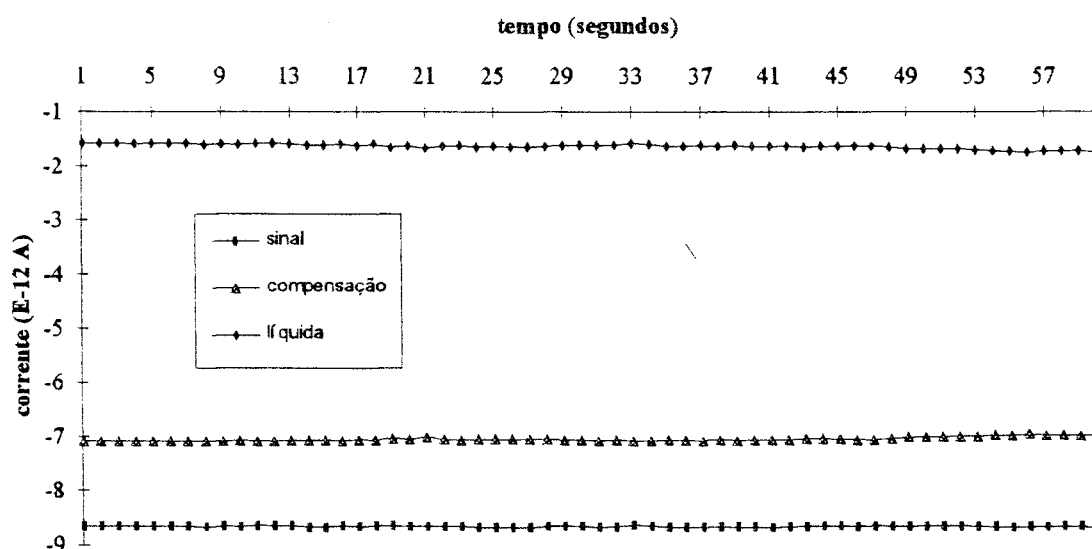


Figura 7.4 - Corrente do condutor de sinal, compensação e líquida do SPD de cobalto (uma medida por segundo) no campo gama

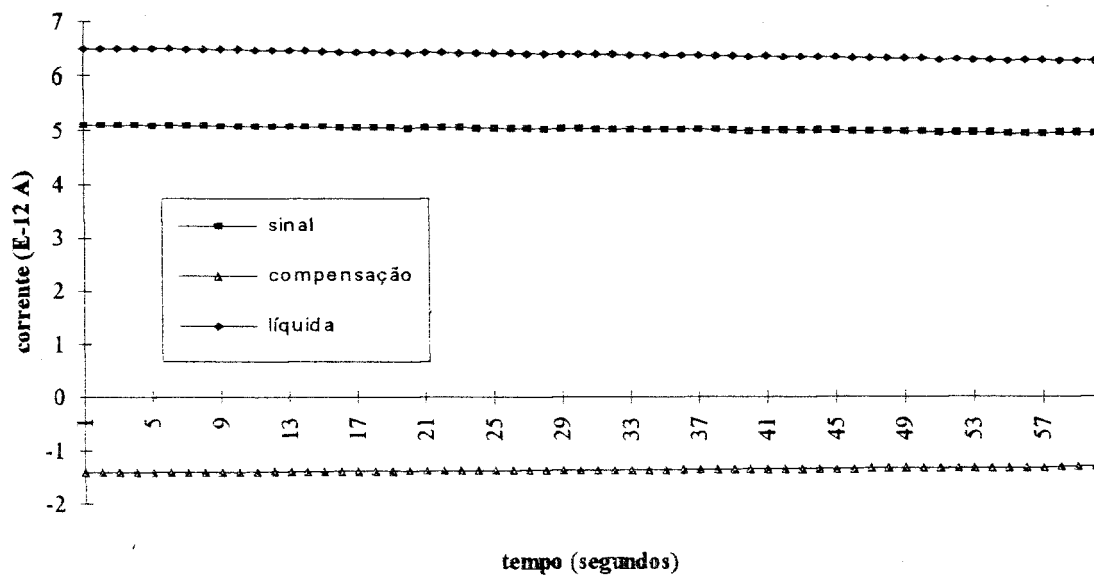


Figura 7.5 - Corrente do condutor de sinal, compensação e líquida do SPD de ródio (uma medida por segundo) no campo gama

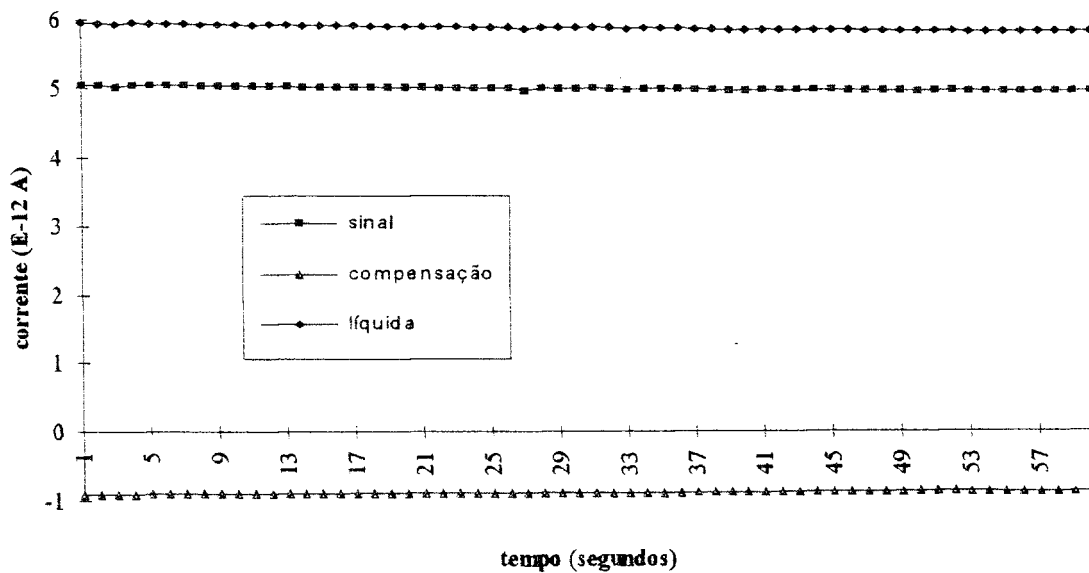


Figura 7.6 - Corrente do condutor de sinal, compensação e líquida do SPD de prata (uma medida por segundo) no campo gama

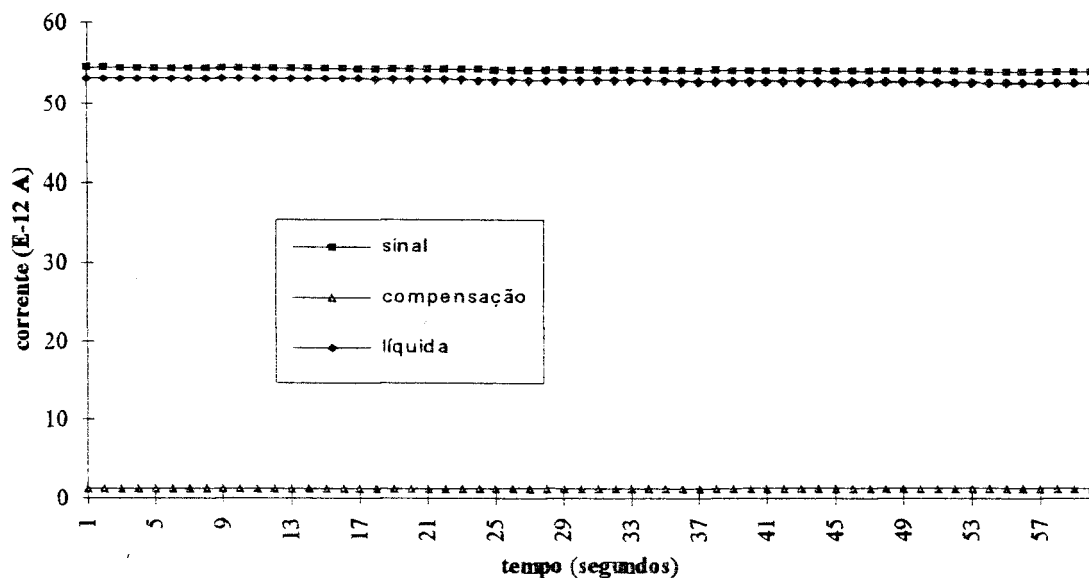


Figura 7.7 - Corrente do condutor de sinal, compensação e líquida do SPD de platina (uma medida por segundo) no campo gama

Os valores médios das correntes líquidas isto é, descontadas as correntes de "BG" e compensação, com as respectivas taxas de exposição na posição de irradiação, para os SPDs sob estudo são apresentados na tabela 7.3:

Tabela 7.3 - Valores médios das correntes dos SPDs devido à radiação gama

SPD	I_t (10^{-12} A)	Taxa de exposição (R/h)
Vanádio	- 2,34	$25,13 \cdot 10^4$
Cobalto	- 2,29	$27,91 \cdot 10^4$
Ródio	6,39	$25,13 \cdot 10^4$
Prata	5,77	$25,13 \cdot 10^4$
Platina	52,79	$27,91 \cdot 10^4$

Onde:

$$I_t = [(I_s - I_{sBG}) - (I_c - I_{cBG})]$$

7.2 - IRRADIAÇÃO NO REATOR IEA-R1

7.2.1 - DESCRIÇÃO DO REATOR

O reator IEA-R1 é um reator do tipo piscina construído e projetado pela firma Babcox & Wilcox operando oito horas por dia útil a uma potência de 2 MW sendo utilizado na produção de radioisótopos, análise por ativação radioquímica, treinamento de operadores e experiências de Física Nuclear.

Basicamente, o núcleo do reator tem a forma de um paralelepípedo, composto por elementos combustíveis, elementos de controle e elementos refletores encaixados verticalmente em furos da placa matriz que está suspensa em balanço por uma estrutura de alumínio (treliça) que a mantém ligada à ponte móvel do topo da piscina.

O elemento combustível do reator IEA-R1 é do tipo MTR ("Material Testing Reactor") sendo formado por 18 placas combustíveis de espessura média de 1,52 mm com uma distância externa entre placas de 2,89 mm dispostas num "estojo" de alumínio com seção horizontal de 7,61 por 8,00 cm.

O reator possui alguns recursos para a irradiação de amostras e experimentos. Para irradiação de amostras existem tubos de irradiação ("beam holes") como também tubos pneumáticos que permitem a irradiação de amostras em recipientes de polietileno, introduzidos no sistema de tubos à baixa pressão e enviados numa das quatro posições externas ao núcleo. Uma vista geral do reator é apresentada na figura 7.8.

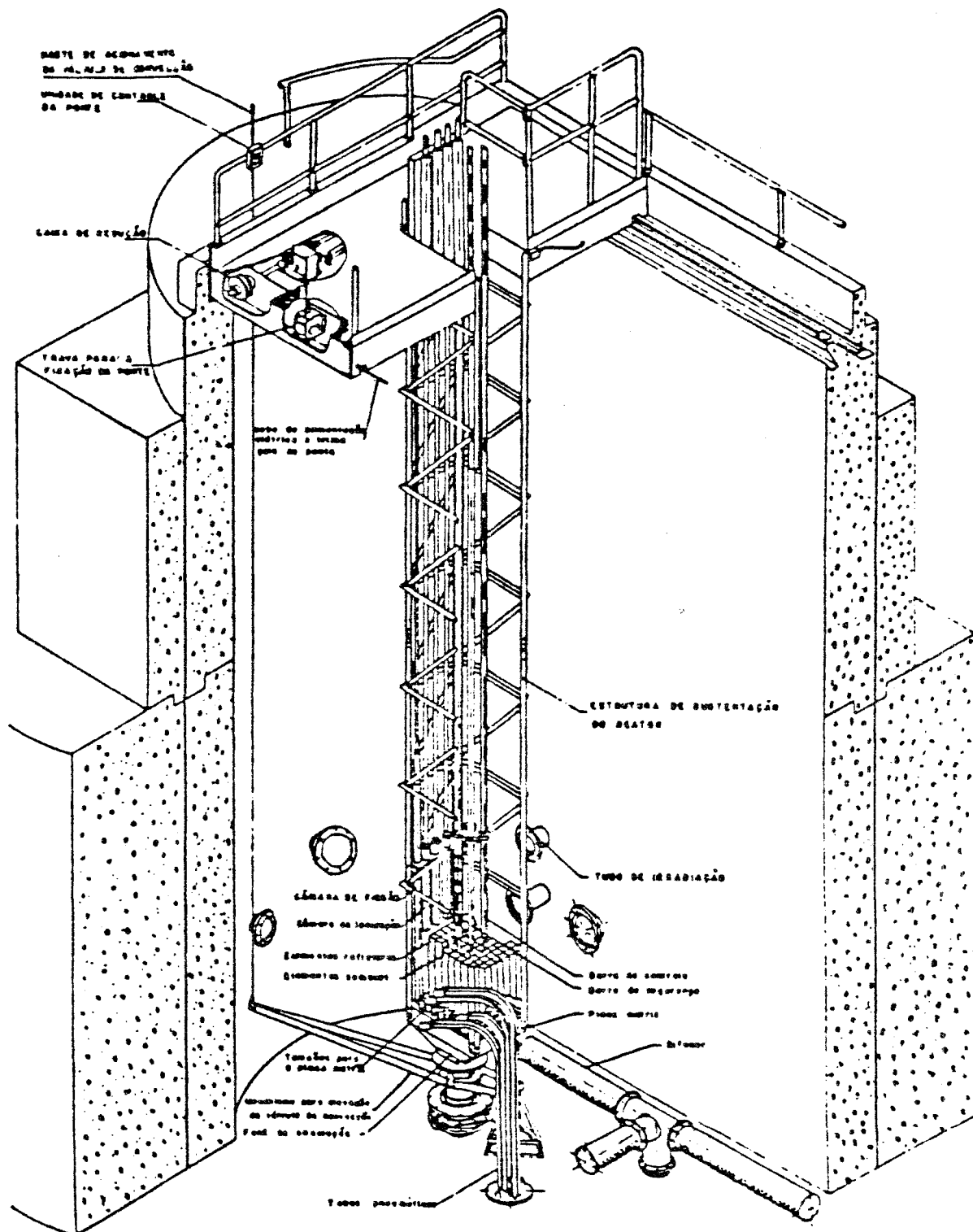


Figura 7.8 - Vista geral do reator IEA-R1

7.2.2 - DESCRIÇÃO DO DISPOSITIVO DE IRRADIAÇÃO

Um dispositivo de irradiação, projetado para realizar testes de irradiação de longa duração, foi utilizado para a caracterização dos SPDs. Este dispositivo é composto por 3 tubos de alumínio, em linha, com um diâmetro interno de 15,8 mm soldados ao plug de um elemento combustível (para encaixe na placa matriz do reator IEA-R1) com comprimento suficiente para ficar acima do nível da água da piscina do reator. As funções destes tubos são:

- servir de fixação dos cabos dos SPDs quando da irradiação de longa duração
- serem utilizados como guias para inserir, através de varetas também de alumínio, na posição desejada (tanto na altura como na direção), outros detetores (mini-câmara de fissão, folhas de ouro, TLDs etc.) possibilitando assim, o acesso à região de irradiação para realizar a calibração dos SPDs quando da realização de testes de longa duração.

Na região de irradiação (parte frontal) este dispositivo possui 12 pequenos tubos que possibilitam a fixação dos SPDs para testes de longa duração e na sua parte posterior um bloco de grafite com a função de refletor pois este dispositivo foi projetado para ser posicionado na primeira periferia do núcleo. A figura 7.9 mostra este dispositivo.

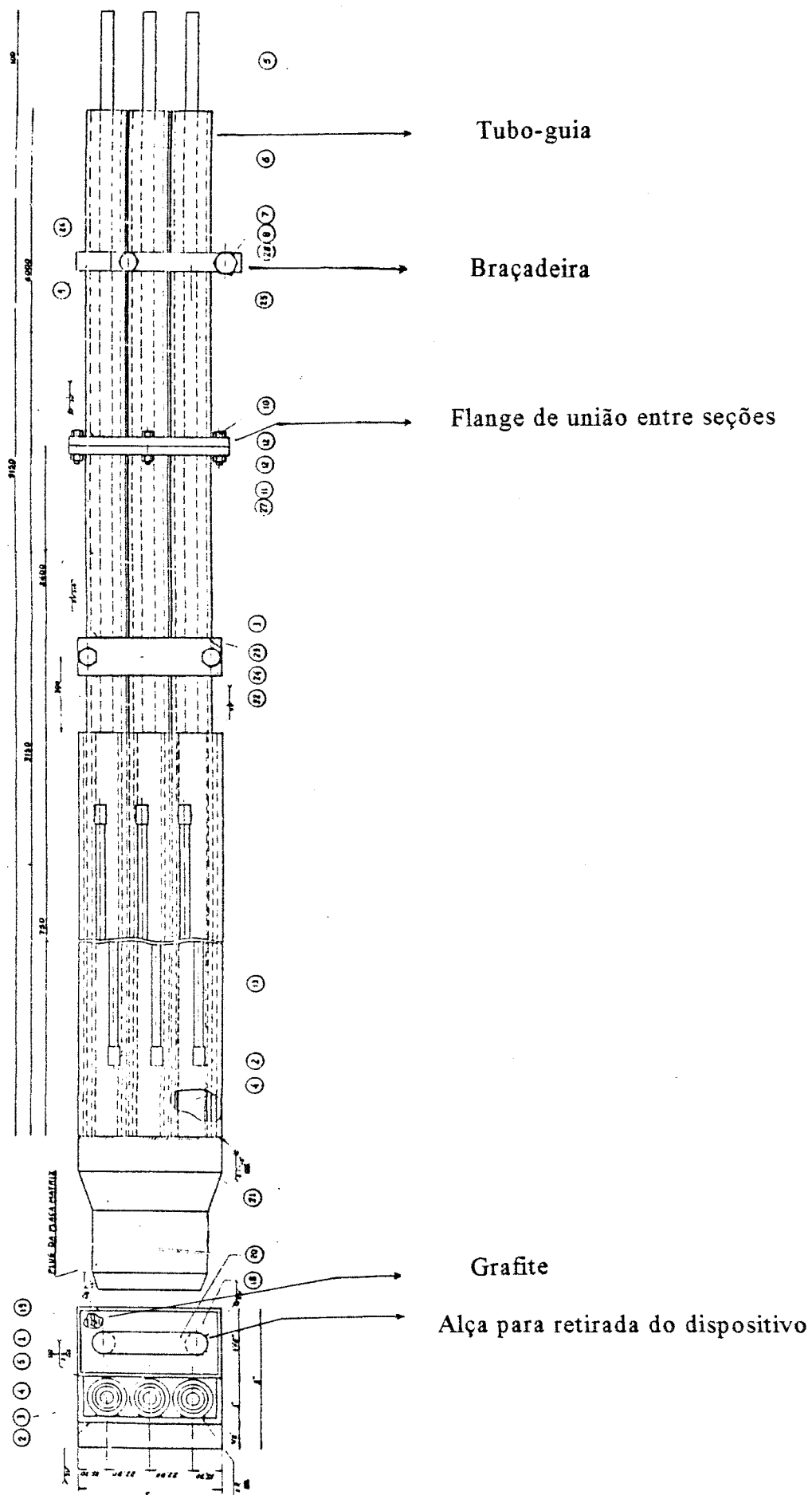


Figura 7.9 - Vista do dispositivo de irradiação

7.2.3 - DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE AOS NEUTRONS TÉRMICOS E EPITÉRMICOS

Para a determinação da sensibilidade aos neutrons térmicos e epitérmicos os detetores foram irradiados com e sem cobertura de cádmio (com uma espessura de 0,5 mm) no tubo central do dispositivo de irradiação, a uma potência de 100 KW (valor obtido na mesa de controle do reator). A escolha da potência na qual foram irradiados os SPDs foi determinada por ser a máxima utilizável pelo Grupo de Operação do Reator (por medida de segurança) com o núcleo sendo resfriado por convecção natural, eliminando assim vibrações (e portanto mais uma fonte de ruído nos detetores) causadas pela circulação forçada de água quando da operação das bombas.

O dispositivo de irradiação foi inserido na posição 68 da placa matriz do reator e o fluxo de neutrons térmicos e epitérmicos nesta posição foi determinado irradiando-se folhas de ouro nuas e cobertas com cádmio (tempo de cada irradiação \Rightarrow 30 minutos) que possuíam as seguintes características básicas: diâmetro de 8 mm e espessura de 0,0125 mm. A figura 7.10 mostra a placa matriz e a posição de irradiação dos detetores.

IEA-R1 - Configuracao_169

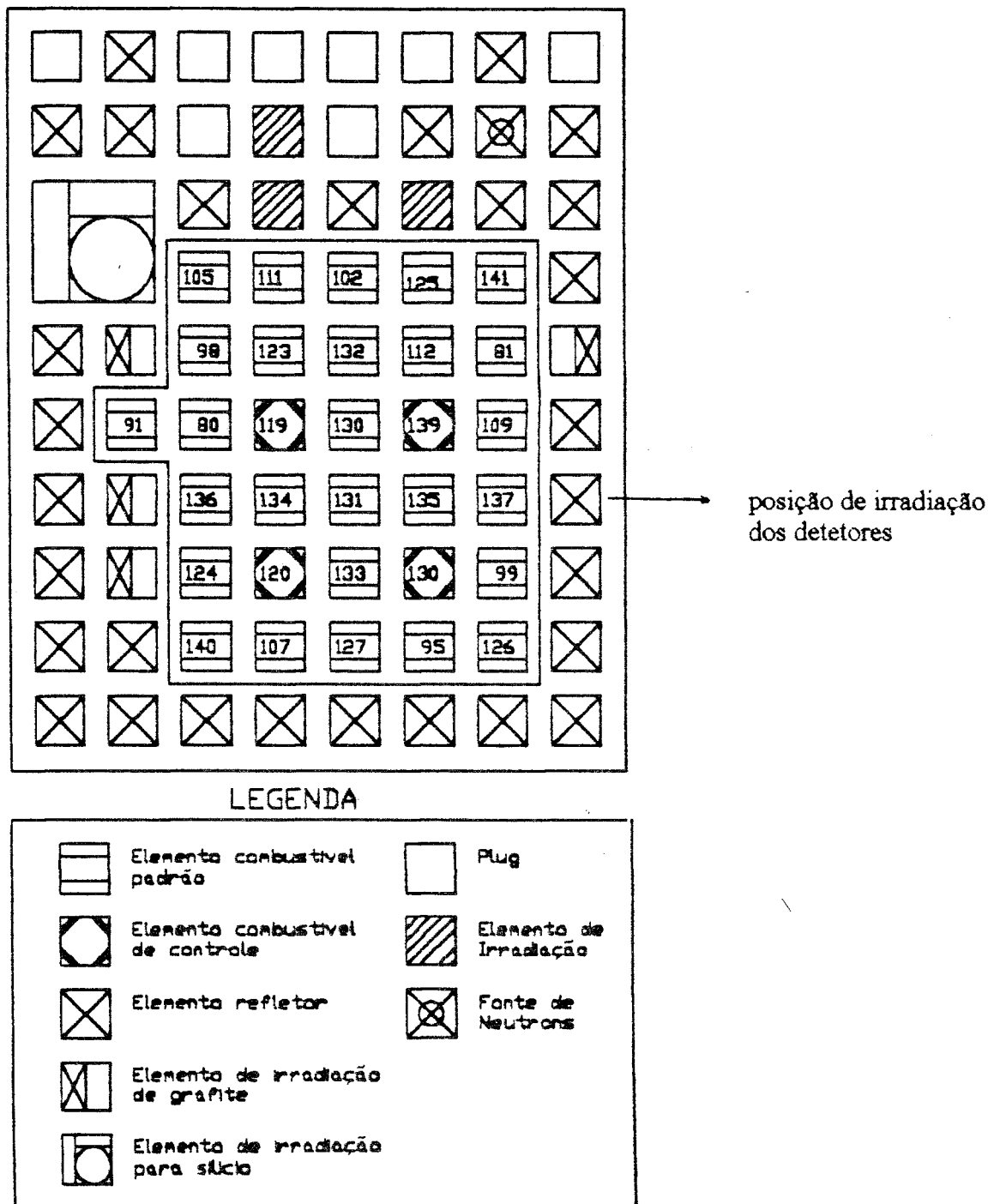


Figura 7.10 - Placa matriz e posição de irradiação dos detetores

Novamente, antes de se iniciar a irradiação no reator, foram medidas as correntes de "BG" de cada detetor em laboratório (mínimo de 8 minutos para cada condutor) para verificar se não ocorreu um aumento desta corrente, indicando possível dano, não sendo constatada variação significativa nestes valores. Sob irradiação, SPD coberto ou não com cádmio, os tempos de medida mínimos foram:

- detetores rápidos (com emissores de cobalto e platina) : 8 minutos para cada um dos dois condutores (condutor de sinal e condutor de compensação)
- detetores de resposta lenta (com emissores de vanádio, ródio e prata) : o tempo de medida foi relacionado com o tempo necessário para o detetor atingir 99% da sua resposta. Assim, adotou-se como tempo mínimo de irradiação cinco meia-vidas do isótopo formado no emissor.

Com os valores de tempo mínimo obtidos para cada detetor e estabelecendo-se que as medidas seriam realizadas inicialmente com o condutor de compensação (para possibilitar o detetor atingir a sua corrente de equilíbrio) foram utilizados os seguintes tempos totais de irradiação:

- tempo total de irradiação para o SPD com emissor de ródio \Rightarrow 16 minutos.
- tempo total de irradiação para o SPD com emissor de prata \Rightarrow 16 minutos.
- tempo total de irradiação para o SPD com emissor de vanádio \Rightarrow 26 minutos.

Para a determinação do campo gama no reator IEA-R1 foram utilizados TLDs (dosímetros termo-luminescentes) inseridos no tubo-guia central do dispositivo de irradiação através de varetas (ver figura 7.11) sendo realizadas irradiações distintas (TLDs cobertos e não com cádmio). Assim, para a determinação do fluxo de radiação gama externo foram utilizadas as leituras dos TLDs nus e para a avaliação de possível acréscimo de fluxo devido aos gamas de captura do cádmio (e atenuação do fluxo gama do reator) foram utilizados os TLDs cobertos com cádmio, relacionando estes valores com, respectivamente, fluxo gama para os SPDs nus e cobertos com cádmio.

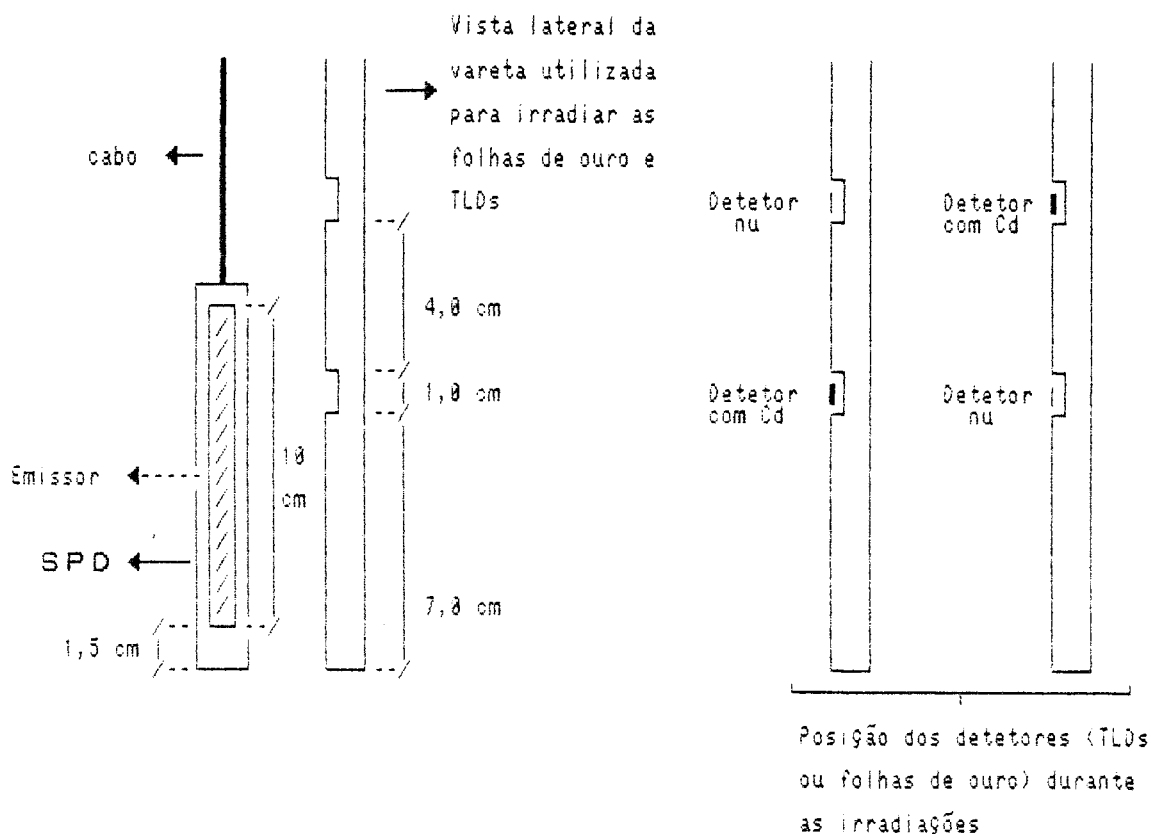


Figura 7.11 - Vista esquemática da vareta utilizada para a fixação de TLDs ou folhas de ouro com as respectivas posições relativas aos SPDs

NOTA: cabe ressaltar que a sensibilidade gama de SPDs, determinada com o uso de fontes de Co-60, é diferente da sensibilidade do detetor no reator pela própria diferença existente nos espectros gama porém, utilizando-se o dispositivo de irradiação não é possível a realização de uma blindagem eficiente para esta radiação. Assim, por não ser possível sanar esta dificuldade, assumiu-se o valor da sensibilidade gama obtida numa fonte de Co-60 como sendo a sensibilidade gama no reator e também por ser de mais fácil comparação com dados de literatura que normalmente utilizam fontes de cobalto para esta determinação.

A tabela 7.4 apresenta os valores médios das correntes de "BG" e as correntes obtidas sob irradiação para os SPDs:

Tabela 7.4 - Valores médios das correntes de "BG" e sob irradiação dos SPDs em estudo

SPD	I_{sBG} (10 ⁻¹² A)	I_{cBG} (10 ⁻¹² A)	I_{snu} (10 ⁻¹² A)	I_{cnu} (10 ⁻¹² A)	I_{sCd} (10 ⁻¹² A)	I_{cCd} (10 ⁻¹² A)
Vanádio	0,02	0,01	185,10	1,82	- 42,99	- 42,05
Cobalto	- 0,18	- 0,04	193,06	- 50,29	- 106,27	- 74,11
Ródio	- 0,87	- 0,86	8762,08	15,94	887,30	- 49,2
Prata	0,83	0,73	3909,67	225,02	582,85	34,85
Platina	0,57	0,55	453,45	1,72	427,02	- 1,79

Onde:

I_{sBG} ⇒ corrente média de "BG" do condutor de sinal

I_{cBG} ⇒ corrente média de "BG" do condutor de compensação

I_{snu} ⇒ corrente média do condutor de sinal do SPD nu

I_{cnu} ⇒ corrente média do condutor de compensação do SPD nu

I_{sCd} ⇒ corrente média do condutor de sinal do SPD coberto com Cádmi

I_{cCd} ⇒ corrente média do condutor de compensação do SPD com Cádmi

Os gráficos das correntes obtidas durante o último minuto de irradiação no reator IEA-R1 (uma medida por segundo) para os SPDs cobertos ou não com cádmio são apresentados a seguir:

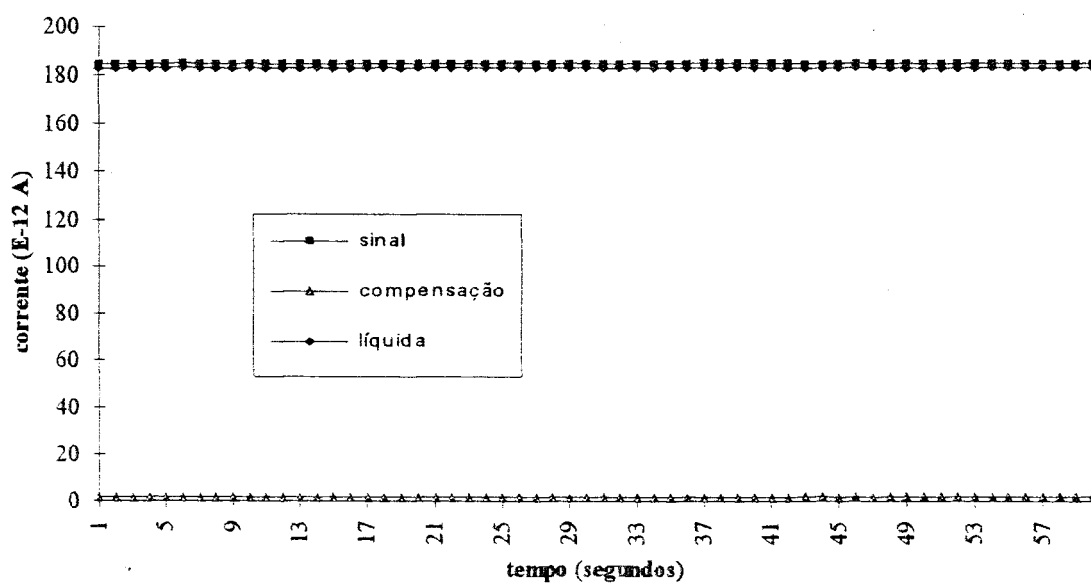


Figura 7.12 - Corrente do condutor de sinal, compensação e líquida do SPD de vanádio (uma medida por segundo). Detetor nu.

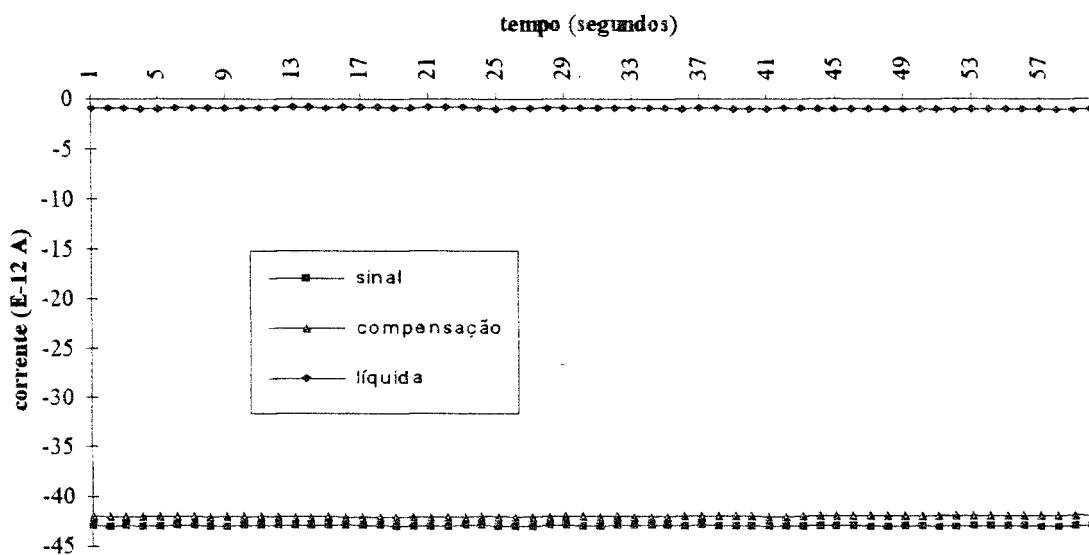


Figura 7.13 - Corrente do condutor de sinal, compensação e líquida do SPD de vanádio (uma medida por segundo). Detetor com cádmio.

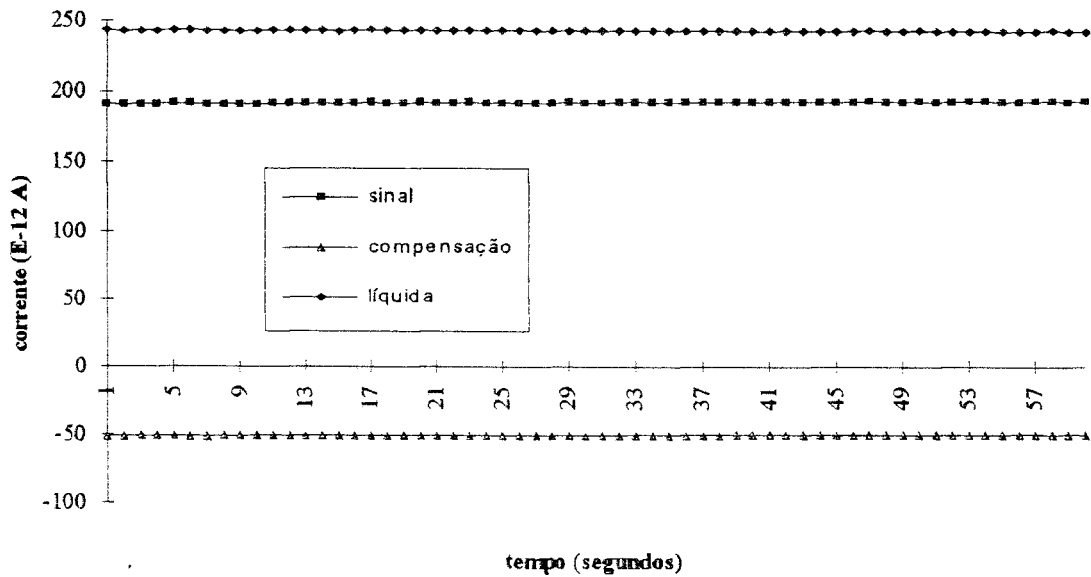


Figura 7.14 - Corrente do condutor de sinal, compensação e líquida do SPD de cobalto (uma medida por segundo). Detetor nu.

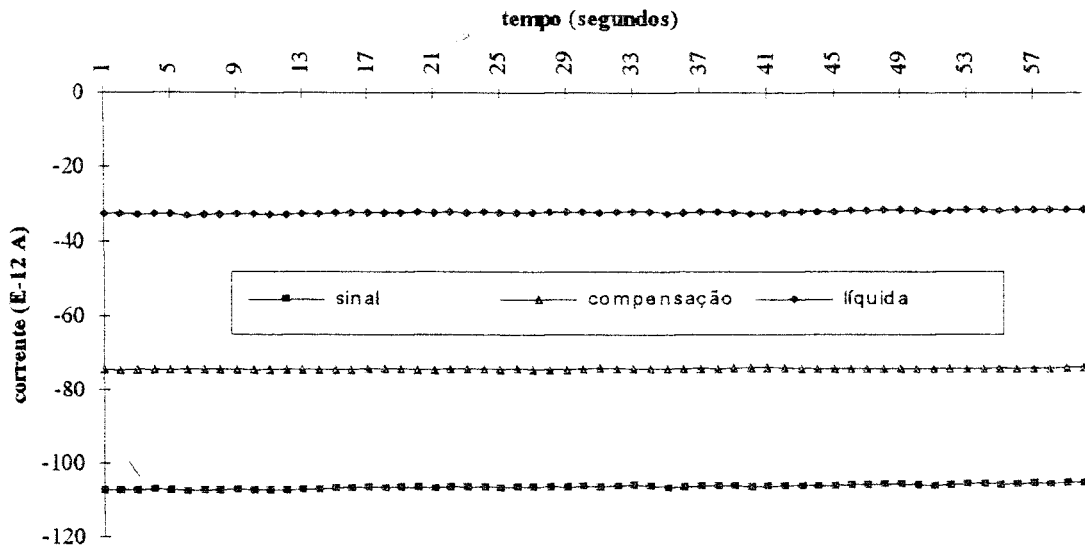


Figura 7.15 - Corrente do condutor de sinal, compensação e líquida do SPD de cobalto (uma medida por segundo). Detetor com cádmio.

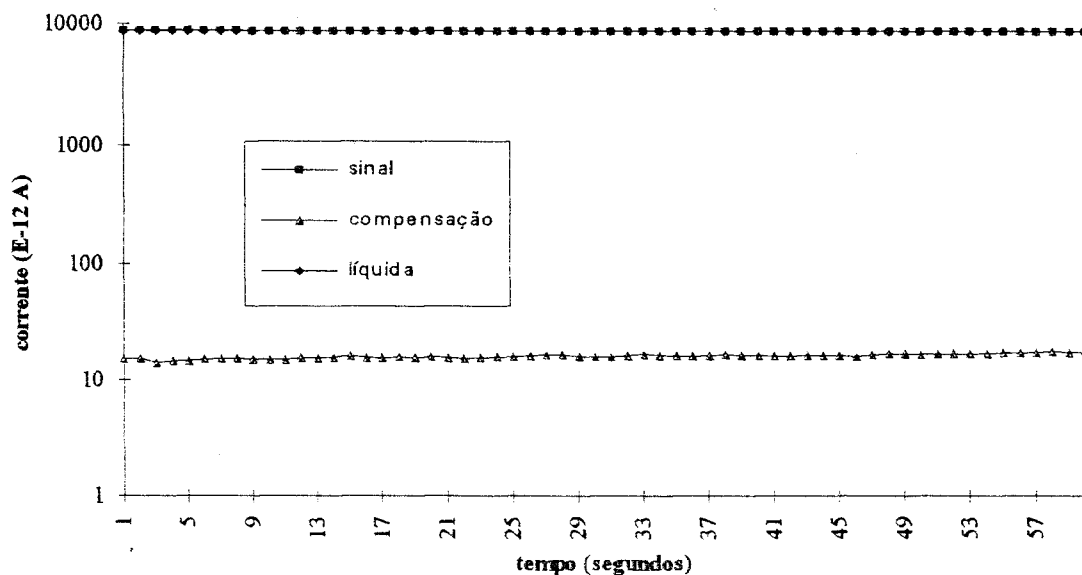


Figura 7.16 - Corrente do condutor de sinal, compensação e líquida do SPD de ródio (uma medida por segundo). Detetor nu.

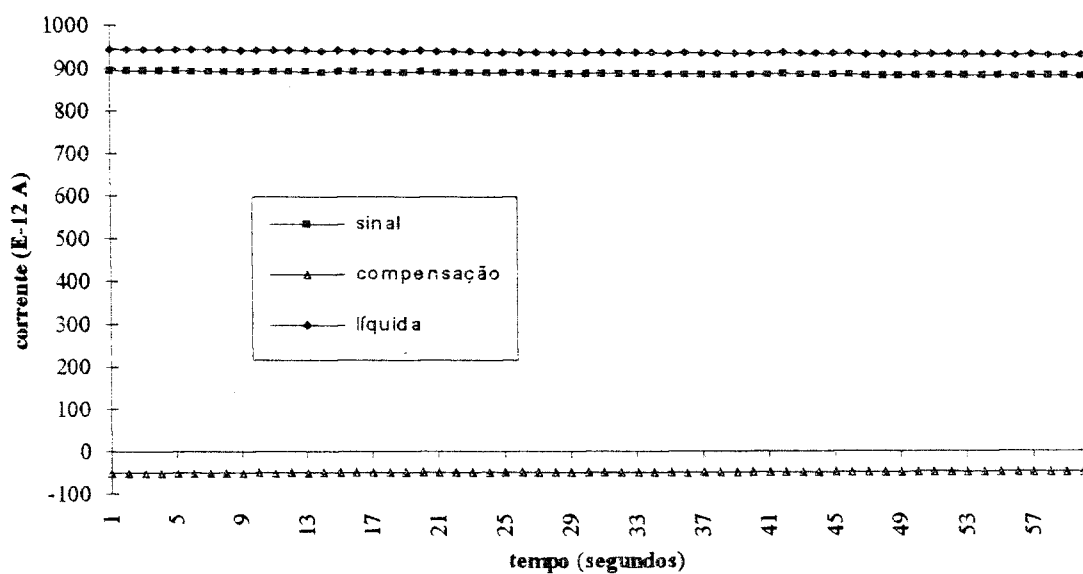


Figura 7.17 - Corrente do condutor de sinal, compensação e líquida do SPD de ródio (uma medida por segundo). Detetor com cádmio.

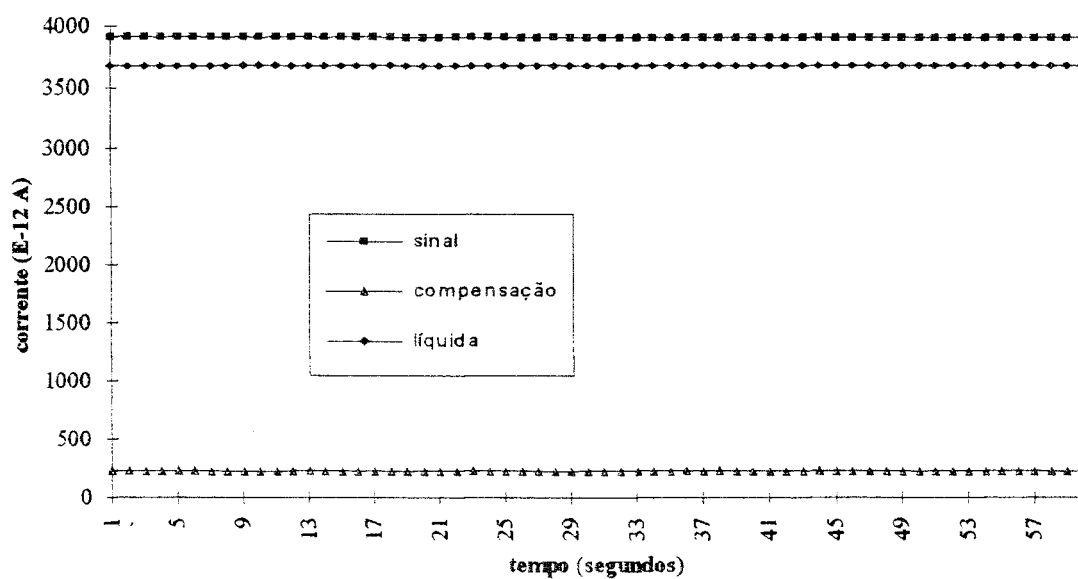


Figura 7.18 - Corrente do condutor de sinal, compensação e líquida do SPD de prata (uma medida por segundo). Detetor nu.

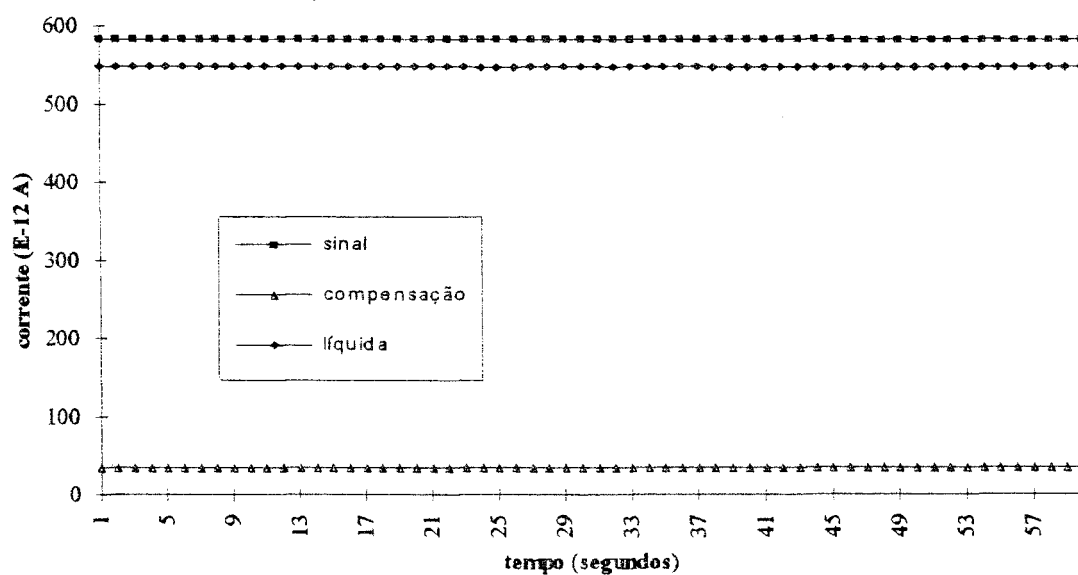


Figura 7.19 - Corrente do condutor de sinal, compensação e líquida do SPD de prata (uma medida por segundo). Detetor com cádmio.

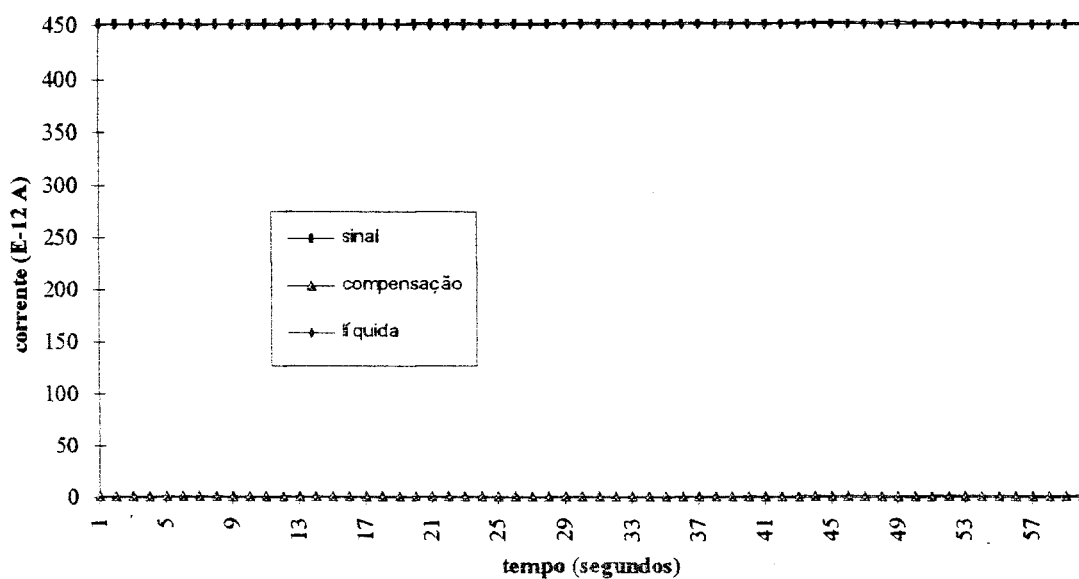


Figura 7.20 - Corrente do condutor de sinal, compensação e líquida do SPD de platina (uma medida por segundo). Detetor nu.

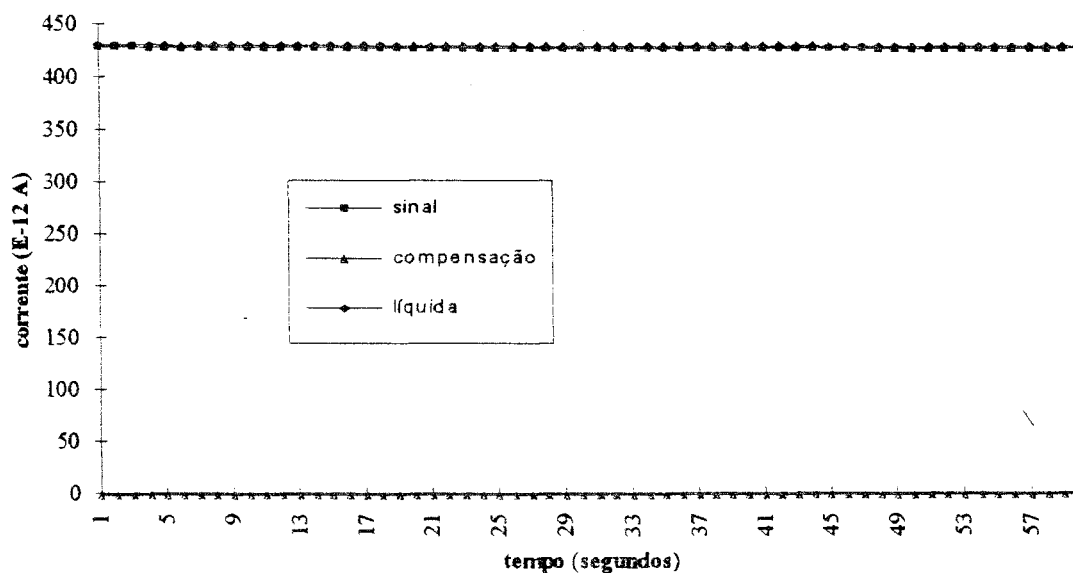


Figura 7.21 - Corrente do condutor de sinal, compensação e líquida do SPD de platina (uma medida por segundo). Detetor com cádmio.

Os valores das correntes líquidas dos SPDs nus e cobertos com cádmio e os respectivos fluxos de neutrons térmicos e epitérmicos obtidos são apresentados na tabela 7.5 e a taxa de exposição devido à radiação gama na tabela 7.6:

Tabela 7.5 - Correntes médias para os SPDs, nus e cobertos com cádmio, com os respectivos fluxos

SPD	I_{t1} (10^{-12} A)	I_{t2} (10^{-12} A)	Fluxo de neutrons térmicos para uma potência de 100 kW (10^{11} n*cm ⁻² *s ⁻¹)	Fluxo de neutrons epitérmicos para uma potência de 100 kW (10^{10} n*cm ⁻² *s ⁻¹)
Vanádio	183,28	- 0,95	3,72	2,00
Cobalto	243,21	- 32,30	5,01	3,17
Ródio	8746,15	936,53	6,11	4,32
Prata	3684,55	547,89	5,01	3,17
Platina	451,71	428,80	6,11	4,32

Onde:

$$I_{t1} = [(I_{snu} - I_{sBG}) - (I_{cnu} - I_{cBG})]$$

$$I_{t2} = [(I_{sCd} - I_{sBG}) - (I_{cCd} - I_{cBG})]$$

Tabela 7.6 - Taxa de exposição devido à radiação gama no reator IEA-R1

Taxa de exposição (R/h) via TLDs
sem cádmio $\Rightarrow 1,84 * 10^6$
com cádmio $\Rightarrow 2,25 * 10^6$

Obs.: valores obtidos da última irradiação e assumidos para irradiações anteriores

8 - RESULTADOS

8.1 - SENSIBILIDADE GAMA

Com os valores da tabela 7.3 foi calculada a sensibilidade gama (equação 8 do Anexo 2) para os detetores em estudo obtendo-se os seguintes resultados:

Tabela 8.1 - Valores da sensibilidade à radiação gama dos SPDs

SPD	I_t (10^{-12} A)	Taxa de exposição (R/h)	Sensibilidade [10^{-17} A/(R/h)*cm]
Vanádio	- 2,34	$25,13 \cdot 10^4$	$- 0,09 \pm 0,01$
Cobalto	- 2,29	$27,91 \cdot 10^4$	$- 0,08 \pm 0,01$
Ródio	6,39	$25,13 \cdot 10^4$	$0,25 \pm 0,01$
Prata	5,77	$25,13 \cdot 10^4$	$0,23 \pm 0,01$
Platina	52,79	$27,91 \cdot 10^4$	$1,89 \pm 0,05$

Onde:

$$I_t = [(I_s - I_{sBG}) - (I_c - I_{cBG})]$$

Com o resultado do cálculo da sensibilidade, os valores obtidos foram comparados com os existentes na literatura consultada sendo apresentados na tabela 8.2:

Tabela 8.2 - Comparação das sensibilidades à radiação gama, obtidas para os SPDs, com os valores disponíveis na literatura consultada

SPD	Sensibilidade [10^{-17} A/(R/h)*cm]	Referência
Vanádio	- 0,09 -----	este trabalho dado de literatura não encontrado
Cobalto	- 0,08 - 0,012 - 0,2	este trabalho 15 44
Ródio	0,25 0,12	este trabalho 15
Prata	0,23 -----	este trabalho dado de literatura não encontrado
Platina	1,89 2,00	este trabalho 14

8.2 - SENSIBILIDADE AOS NEUTRONS TÉRMICOS E EPITÉRMICOS

Foram obtidos os seguintes valores de sensibilidade para os SPDs em estudo:

Tabela 8.3 - Valores da sensibilidade aos neutrons térmicos e epitérmicos dos SPDs

SPD	Sensibilidade aos neutrons térmicos { $10^{-22} \text{A}/[(n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{cm}]$ }	Sensibilidade aos neutrons epitérmicos { $10^{-22} \text{A}/[(n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{cm}]$ }
Vanádio	$0,48 \pm 0,02$	$1,00 \pm 0,09$
Cobalto	$0,54 \pm 0,02$	$- 0,44 \pm 0,09$
Ródio	$12,8 \pm 0,4$	$20,3 \pm 0,7$
Prata	$6,3 \pm 0,2$	$15,6 \pm 0,5$
Platina	$0,16 \pm 0,05$	$0,07 \pm 0,53$ *

Obs.:* \Rightarrow valor de sensibilidade referencial devido aos pontos apresentados na seção 8.3.2

Com o resultado do cálculo das sensibilidades, os valores obtidos foram comparados com os existentes na literatura consultada sendo apresentados na tabela 8.4:

Tabela 8.4 - Comparação das sensibilidades aos neutrons térmicos e epitérmicos, obtidas para os SPDs, com os valores disponíveis na literatura consultada

SPD	Sensibilidade aos neutrons térmicos { $10^{-22} \text{A}/[(n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{cm}]$ }	Sensibilidade aos neutrons epitérmicos { $10^{-22} \text{A}/[(n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{cm}]$ }	Referência
Vanádio	0,48	1,00	este trabalho 25
	1,8	1,74	
Cobalto	0,54	- 0,44	este trabalho 44 50
	0,60	0,059	
	0,48	-----	
Ródio	12,8	20,3	este trabalho 15
	14,23	32,47	
Prata	6,3	15,6	este trabalho 25
	7,72	23,88	
Platina	0,16 neutrons (total) = 0,298	0,07 -----	este trabalho 4

8.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os valores das sensibilidades obtidas neste trabalho são de difícil comparação com os dados de literatura pois:

- não são fornecidos pela literatura, na maioria das vezes, as características geométricas dos materiais que compõem os detetores (principalmente a espessura do isolante, por ser o caminho que o elétron ou partícula beta devem atravessar para atingir o coletor). Normalmente é fornecido só o diâmetro e o material do emissor.
- não é fornecido o valor da resistência de isolamento dos detetores.
- os valores das sensibilidades aos neutrons nem sempre são discriminados entre térmicos e epitérmicos
- normalmente não é explicitada o tipo de fonte gama onde é obtida a sensibilidade gama (utilização de fonte de Co-60, Cs-137 ou reator) pois espectros diferentes implicam em diferentes sensibilidades
- a técnica experimental utilizada para a obtenção das sensibilidades e dados como tempo de irradiação, recobrimento ou não do detetor, espessura do recobrimento normalmente não são fornecidos
- o erro associado às medidas normalmente não é fornecido

Nota: No Anexo 3 são apresentados os valores da sensibilidade dos SPDs citados na literatura consultada.

Apesar destes pontos podemos notar que excetuando-se os valores da sensibilidade gama para os SPDs com emissores de ródio e prata e para os valores da sensibilidade a neutrons epitérmicos para os SPDs com emissores de cobalto e de platina, os demais valores obtidos neste trabalho apresentam razoável coerência com os valores citados na literatura (as razões das discrepâncias destacadas são discutidas a seguir).

8.3.1 - SENSIBILIDADE GAMA

Como visto no Capítulo 4 a resposta do detetor à radiação gama é uma função dos números atômicos do emissor e coletor podendo, dependendo dos materiais utilizados, resultar numa sensibilidade negativa (isto é, a corrente coletor-emissor é maior que a corrente emissor-coletor). O referido é válido para SPDs que possuam material emissor com número atômico inferior ao número atômico do coletor como por exemplo, coletor de incoel 600 ($Z=27,2$) e emissor de vanádio ($Z=23$). Tendo em vista que, em geral, os coletores são de incoel 600 ou aço inox ($Z=25,6$) podemos dizer que o material cobalto ($Z=27$) é uma espécie de limiar. Assim, materiais emissores utilizados na construção de detetores (com mesma geometria e materiais) que possuam número atômico superior ao cobalto acarretarão num aumento da corrente emissor-coletor e portanto a sensibilidade passará a ser positiva como foi comprovado neste trabalho.

Com os valores das sensibilidades à radiação gama obtidos neste trabalho e apresentados na tabela 8.1, podemos notar uma discrepância entre os valores para os SPDs com emissores de ródio e prata (a sensibilidade gama para o SPD com emissor de prata deveria ser maior do que a obtida para o SPD com emissor de ródio) porém, durante todas as irradiações realizadas na fonte de Co-60, os valores obtidos apresentaram uma inversão sendo levantadas as seguintes hipóteses:

- influência dos valores da resistência de isolação (entre $7,5$ e $22 \cdot 10^9$ Ohms para o SPD com emissor de ródio e acima de $200 \cdot 10^9$ Ohms para o SPD com emissor de prata) influenciando nas medidas da corrente sob irradiação devido, principalmente, às baixas correntes envolvidas.

- variação no comprimento e diâmetro dos emissores

Mesmo assim, podemos notar que os valores das sensibilidades obtidas neste trabalho apresentam coerência entre si (exceto para os casos dos SPDs com emissores de ródio e prata) e se aproximam dos valores fornecidos pela literatura para o caso do SPD com emissor de platina como pode ser visto na tabela 8.2.

8.3.2 - SENSIBILIDADE AOS NEUTRONS TÉRMICOS E EPITÉRMICOS

A determinação da sensibilidade aos neutrons (térmicos e epitérmicos) apresenta como principal dificuldade a necessidade de se utilizar "filtros" para discriminar neutrons térmicos de neutrons epitérmicos. Assim, pelo próprio princípio de funcionamento destes filtros (neste trabalho foi utilizado o cádmio), neutrons de determinada energia são absorvidos e fazem com que o material do filtro emita raios gama de captura. Estes raios gama podem gerar elétrons (por efeito fotoelétrico e Compton), atingir o coletor do SPD, e alterar a resposta do detetor. Também, no caso específico deste trabalho, existe a possibilidade do tubo-guia de alumínio ter influenciado a resposta ^{/45/} (elétrons ou partículas beta gerados neste tubo por efeito fotoelétrico ou Compton, devido aos raios gama do reator ou do alumínio, afetando a resposta).

Assim, as diferenças apresentadas nos valores obtidos durante as irradiações dos detetores no reator com os obtidos da literatura, podem ser devido aos seguintes fatores:

- devido à dificuldade de se medir o fluxo gama no reator com TLDs os valores obtidos do campo gama são uma estimativa dos valores da taxa de exposição
- pelo próprio princípio de funcionamento do reator, a flutuação do fluxo de neutrons existente implica em possíveis erros. Assim, a folha de ouro nos fornece a atividade que é uma função da fluência (isto é, do tempo de irradiação no reator) de onde obtemos, através de cálculo, o fluxo de neutrons médio (o referido também é válido para a obtenção do campo gama). Já no caso do SPD, as medidas das correntes utilizadas para o cálculo da sensibilidade podem ter se realizado num "pico" ou num "vale" da flutuação. Esta flutuação do fluxo é demonstrada na figura 8.1 obtida durante uma das irradiações das folhas de ouro:

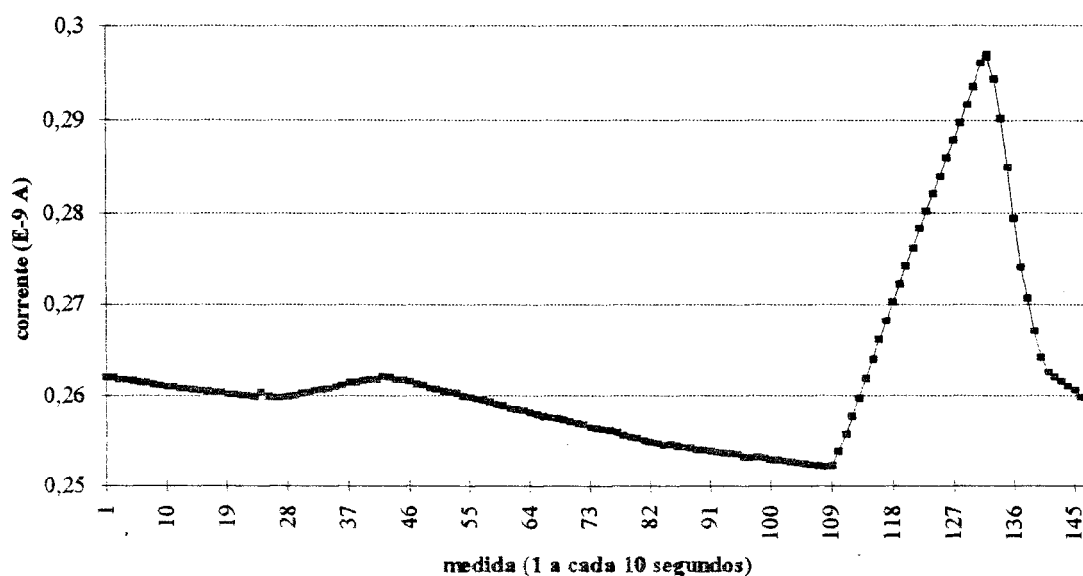


Figura 8.1 - Sinal do SPD com emissor de prata, durante uma das irradiações de folhas de ouro, no reator IEA-R1 a uma potência de 10 kW

Para o caso específico do SPD com emissor de cobalto, que apresentou um valor de sensibilidade aos neutrons epitérmicos negativo, podemos levantar as seguintes hipóteses:

- a sensibilidade à radiação gama é diferente da obtida, erro este, devido às baixas correntes envolvidas nas medidas durante irradiações na fonte de Co-60 e a pequena diferença apresentada entre os sinais dos condutores de sinal e compensação pois, o material cobalto, é uma espécie de limiar entre SPDs que possuem sensibilidade gama negativa e positiva.
- pela dificuldade de se utilizar TLDs para as medidas do campo gama, devido às altas taxas de dose envolvidas, várias medidas tiveram que ser refeitas. Foram utilizados os valores do campo gama do reator obtidos na última irradiação como sendo constantes para o cálculo das sensibilidades, afetando assim, os valores finais das sensibilidades.

Em relação ao SPD com emissor de platina podemos notar, através da tabela 8.3, que o erro associado ao valor da sensibilidade aos neutrons epitérmicos é muito elevado pois este valor é obtido através de operações aritméticas (da corrente do detetor coberto com cádmio subtrai-se a corrente devido à radiação gama) onde, o valor da corrente do detetor coberto com cádmio está dentro do limite de erro da corrente devido à radiação gama. Podemos notar, através das figuras 7.20 e 7.21, a pequena diferença apresentada entre as correntes deste detetor (nu e coberto com cádmio) evidenciando a alta sensibilidade à radiação gama deste detetor. Desta maneira, o valor da sensibilidade aos neutrons epitérmicos obtido para o SPD com emissor de platina é meramente referencial.

Cabe ressaltar também que, pelas próprias características dos emissores, uma componente da corrente do SPD predomina sobre as demais (corrente devido aos neutrons ou à radiação gama) dificultando a discriminação das demais componentes.

Apesar destes pontos os valores das sensibilidades se apresentam coerentes entre si (excetuando-se naturalmente a sensibilidade aos neutrons epitérmicos para os SPDs com emissores de cobalto e platina) notando-se, por exemplo, que a sensibilidade para neutrons térmicos do SPD com emissor de ródio é a maior entre as obtidas para todos os SPDs (como visto na tabela 8.3).

9 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

9.1 - CONCLUSÕES

Neste trabalho procurou-se abordar os vários tipos de SPDs existentes na literatura e os mecanismos de interação da radiação responsáveis para a geração da corrente neste tipo de detetor. Além de se determinar a sensibilidade, procurou-se discutir também, os principais efeitos que podem afetar o sinal do SPD durante o processo de caracterização fornecendo uma contribuição para um melhor conhecimento deste tipo de detetor.

Ficou evidente que, para a construção do SPD ou de qualquer outro detetor, um criterioso controle elétrico medindo-se a resistência de isolamento após cada etapa executada na montagem (construção mecânica), deve caminhar juntamente com o controle mecânico (como soldas sem trincas e porosidades, perfeito ajuste das partes componentes e estanqueidade) com vistas à reproducibilidade das características do detetor.

Constatou-se a dificuldade de se determinar a sensibilidade à radiação gama para este tipo de detetor, devido às baixas correntes envolvidas nas medidas e a pequena diferença entre as correntes do condutor de sinal e compensação.

Para a irradiação no reator ficou evidente a dificuldade de se utilizar TLDs para as medidas do campo gama pois este tipo de detetor é muito sensível e possui dependência angular devendo, quando possível, utilizar-se o termômetro gama para a determinação desta radiação. Assim, os valores obtidos neste trabalho devem ser utilizados como uma estimativa dos valores da taxa de exposição.

Estabeleceu-se, através de várias irradiações, um tempo mínimo antes de se iniciar a coleta de dados para a determinação da sensibilidade gama para todos os SPDs e a neutrons para SPDs rápidos (8 minutos). A importância deste tempo mínimo deve-se ao fato de ser necessário retirar os detetores do dispositivo para a retirada do recobrimento de cádmio quando da irradiação no reator (os detetores após cada irradiação - nus ou cobertos com cádmio- eram retirados com, em média, 5 R/h medidos na superfície do SPD).

Em relação a um sistema de monitoração "in-core" constatou-se que as considerações primárias na escolha do SPD são a velocidade de resposta (lenta ou rápida), a componente do sinal do detetor que predomina (neutrons ou gama) e a taxa de queima. O tipo de aplicação também se impõe (mapeamento ou controle) como também o tipo de reator e a razão entre o fluxo de neutrons e gama.

9.2 - RECOMENDAÇÕES

Como ponto principal para se continuar o desenvolvimento dos SPDs pelo IPEN, propõe-se que seja realizada uma irradiação de longa duração no reator IEA-R1 para o estudo da variação da sensibilidade do detetor com a fluência, visando uma correta interpretação do sinal do detetor ao longo do tempo (determinação da "queima" do SPD).

Outro ponto a ser considerado é o estudo da viabilidade da construção e instalação no reator IEA-R1 de um dispositivo para a análise do comportamento do sinal do detetor com a variação da temperatura e radiação, visando a caracterização de SPDs em temperaturas próximas às de um reator de potência.

Recomenda-se, principalmente para os SPDs com emissores de vanádio e cobalto, quando da determinação da sensibilidade à radiação gama, utilizar-se as maiores taxas de exposição possíveis pois, como pode ser visto na tabela 7.2 e na figura 7.4, as correntes do condutor de sinal e compensação apresentam valores muito próximos (além de baixos) sendo difícil distinguir-se a parcela do sinal que é devido à radiação da parcela devido ao ruído.

Em relação às medidas ficou evidente, durante as irradiações dos SPDs no reator, a dificuldade de se utilizar TLDs e folhas de ouro para a obtenção do campo gama e do fluxo de neutrons. Recomenda-se, quando possível, utilizar um termômetro gama (calorímetro) ou uma mini-câmara de ionização e uma mini-câmara de fissão calibradas para as medidas do fluxo gama e de neutrons respectivamente (medidas dos fluxos "on-line") agilizando assim, o processo de análise dos resultados.

10 - ANEXOS

ANEXO 1 - Determinação do fluxo de neutrons térmicos e epitérmicos

Para a determinação do fluxo de neutrons térmicos e epitérmicos foi empregado o método de ativação de folhas. Por este método, folhas de materiais apropriados, colocadas na posição de irradiação, são ativadas com neutrons e o fluxo é determinado a partir da atividade induzida.

1.1 - Determinação do fluxo de neutrons térmicos

Para a determinação do fluxo de neutrons térmicos foram utilizadas as seguintes equações:

$$\text{fluxo1} = \frac{At}{\left[\frac{(m * N_o)}{P} * \sigma * f * [1 - \exp(-\lambda * t_i)] * \exp(-\lambda * t_e) \right]} \quad (1)$$

$$\text{fluxo2} = \frac{A_{Cd} * F_{Cd}}{\left[\frac{(m1 * N_o)}{P} * \sigma * f * [1 - \exp(-\lambda * t_i)] * \exp(-\lambda * t_{e1}) \right]} \quad (2)$$

Fluxo térmico = fluxo1 - fluxo2

onde:

At = atividade de saturação da folha nua

A_{Cd} = atividade da folha com cádmio

f = fator que inclui auto-blindagem e depressão de fluxo: 0,973

F_{Cd} = fração de neutrons epitérmicos absorvidos pelo cádmio: 1,098

m = massa da folha de ouro nua

m1 = massa da folha de ouro recoberta com cádmio

N_o = número de Avogadro: 6,0225*10²³

P = pêso atômico do ouro

t_e = tempo entre o fim da irradiação e começo da contagem

t_{e1} = tempo entre o fim da irradiação e começo da contagem

t_i = tempo de irradiação

$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} : 2,975 * 10^{-6} \text{ segundos}$

σ = seção de choque de absorção do ouro

Com a fórmula de propagação de erro associada:

$$\frac{\sigma\phi}{\phi} (\%) = \sqrt{\left(\frac{\sigma A_t}{A_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(\sigma_{act})}{\sigma_{act}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2} * 100 \quad (3)$$

Nota: o número de Avogadro, a fração isotópica e o peso atômico do material alvo são constantes físicas. Assim, o erro dependerá basicamente dos erros da atividade de saturação (A_t), seção de choque de ativação (σ_{act}) e da massa do detetor.

1.2 - Determinação do fluxo de neutrons epitérmicos

Para a determinação do fluxo de neutrons epitérmicos irradia-se, em idênticas condições num mesmo ponto, duas folhas de ouro, uma envolta em cádmio e outra sem cádmio por ser o cádmio um material que age como um filtro para neutrons térmicos (devido a sua alta seção de choque de absorção térmica). As equações utilizadas foram:

$$A_\infty = \frac{A * \exp(\lambda * t_e)}{[1 - \exp(-\lambda * t_i)]} \quad (4)$$

$$\text{fluxo} = \frac{A_\infty * F_{Cd}}{[N * I * R * K]} \quad (5)$$

onde:

A = atividade da folha de ouro nua

A_∞ = atividade de saturação

F_{Cd} = fração de neutrons epitérmicos absorvidos pelo cádmio

I = integral de ressonância ($1150 * 10^{-24} \text{ cm}^2$)

K = fator de perturbação epitérmico: 0,347 /16/

N = número de átomos da folha

R = razão de cádmio

t_e = tempo entre o fim da irradiação e começo da contagem

t_i = tempo de irradiação

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{\frac{T_1}{2}} : 2,975 * 10^{-6} \text{ segundos}$$

ANEXO 2 - Análise de erros e imprecisões consideradas para o cálculo do erro

2.1 - Análise de erros

A estimativa do erro na determinação da sensibilidade dos SPDs pode ser obtida a partir da aplicação da fórmula de propagação de erros que consiste em diferenciar as equações em relação a vários dos parâmetros que as compõe. As equações utilizadas para o cálculo das diversas sensibilidades com suas respectivas expressões para a avaliação dos erros foram:

a) Sensibilidade gama

$$I_{\text{gama}} = (I_{\text{sinal}} - I_{\text{sinalBG}}) - (I_{\text{comp}} - I_{\text{compBG}}) \quad (6)$$

onde:

I_{gama} = corrente total do SPD

I_{sinal} = corrente do condutor de sinal do SPD

I_{sinalBG} = corrente de "BG" do condutor de sinal do SPD

I_{comp} = corrente do condutor de compensação do SPD

I_{compBG} = corrente de "BG" do condutor de compensação do SPD

Assim, utilizando a fórmula de propagação de erros temos:

$$\sigma_I = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_{\text{sBG}}^2 + \sigma_c^2 + \sigma_{\text{cBG}}^2} \quad (7)$$

onde:

σ_I = desvio padrão total da corrente

σ_s = desvio padrão da medida do condutor de sinal sob radiação

σ_{sBG} = desvio padrão da medida do condutor de sinal sem radiação

σ_c = desvio padrão da medida do condutor de compensação sob radiação

σ_{cBG} = desvio padrão da medida do condutor de compensação sem radiação

Para a determinação da sensibilidade utilizamos:

$$S_{\text{gama}} = \frac{I_{\text{gama}}}{F * L} \quad (8)$$

onde:

S_{gama} = sensibilidade do SPD em A/[(R/h)*cm]

I_{gama} = corrente total do SPD

F = taxa de exposição em R/h

L = comprimento do emissor em cm

com a fórmula de propagação de erros associada:

$$\left(\frac{\sigma_S}{S_{\text{gama}}} \right) = \sqrt{\left(\frac{\sigma_I}{I_{\text{gama}}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_F}{F} \right)^2} \quad (9)$$

b) Sensibilidade aos neutrons epitérmicos

$$I_{\text{epit}} = [(I_{\text{sinal}} - I_{\text{sinalBG}}) - (I_{\text{comp}} - I_{\text{compBG}})] - I_{\text{gama1}} \quad (10)$$

onde:

I_{epit} = corrente devido ao fluxo de neutrons epitérmicos obtido através do SPD recoberto com cádmio

I_{sinal} = corrente do condutor de sinal do SPD

I_{sinalBG} = corrente de "BG" do condutor de sinal do SPD

I_{comp} = corrente do condutor de compensação do SPD

I_{compBG} = corrente de "BG" do condutor de compensação do SPD

I_{gama1} = corrente devido à radiação gama ($S_{\text{gama}} * L * F_1$)

F_1 = campo gama determinado com TLDs recobertos com cádmio

Com as fórmulas de propagação de erros associadas:

$$\left(\frac{\sigma_{I_{\text{gama1}}}}{I_{\text{gama1}}} \right) = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{S_{\text{gama}}}}{S_{\text{gama}}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{F_1}}{F_1} \right)^2} \quad (11)$$

e

$$\sigma_{I_{\text{epit}}} = \sqrt{\sigma_{I_{\text{sinal}}}^2 + \sigma_{I_{\text{sinalBG}}}^2 + \sigma_{I_{\text{comp}}}^2 + \sigma_{I_{\text{compBG}}}^2 + \sigma_{I_{\text{gama1}}}^2} \quad (12)$$

Para o cálculo da sensibilidade utilizamos a seguinte equação:

$$S_{\text{epit}} = \frac{I_{\text{epit}}}{F_{\text{epit}} * L} \quad (13)$$

onde:

S_{epit} = sensibilidade aos neutrons epitérmicos

I_{epit} = corrente devido aos neutrons epitérmicos

F_{epit} = fluxo de neutrons epitérmicos

L = comprimento do emissor em cm

com o erro associado:

$$\left(\frac{\sigma_{S_{\text{epit}}}}{S_{\text{epit}}} \right) = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{I_{\text{epit}}}}{I_{\text{epit}}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{F_{\text{epit}}}}{F_{\text{epit}}} \right)^2} \quad (14)$$

c) Sensibilidade aos neutrons térmicos

$$I_{\text{term}} = [(I_{\text{sinal}} - I_{\text{sinalBG}}) - (I_{\text{comp}} - I_{\text{compBG}})] - I_{\text{gama2}} - I_{\text{epit}} \quad (15)$$

onde:

I_{term} = corrente devido aos neutrons térmicos obtido através do SPD sem a cobertura de cádmio

I_{sinal} = corrente do condutor de sinal do SPD

I_{sinalBG} = corrente de "BG" do condutor de sinal do SPD

I_{comp} = corrente do condutor de compensação do SPD

I_{compBG} = corrente de "BG" do condutor de compensação do SPD

I_{gama2} = corrente devido à radiação gama ($S_{\text{gama}} * L * F_2$)

F_2 = campo gama determinado com TLDs sem a cobertura de cádmio

I_{epit} = corrente devido aos neutrons epitérmicos

Com as fórmulas de propagação de erros associadas:

$$\left(\frac{\sigma_{I_{\text{gama2}}}}{I_{\text{gama2}}} \right) = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{S_{\text{gama}}}}{S_{\text{gama}}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{F_2}}{F_2} \right)^2} \quad (16)$$

$$\sigma_{I_{\text{epit}}} = \sqrt{\sigma_{I_{\text{sinal}}}^2 + \sigma_{I_{\text{sinalBG}}}^2 + \sigma_{I_{\text{comp}}}^2 + \sigma_{I_{\text{compBG}}}^2 + \sigma_{I_{\text{gama2}}}^2 + \sigma_{I_{\text{epit}}}^2} \quad (17)$$

Para o cálculo da sensibilidade utilizamos a seguinte equação:

$$S_{\text{term}} = \frac{I_{\text{term}}}{F_{\text{term}} * L} \quad (18)$$

onde:

S_{term} = sensibilidade aos neutrons térmicos

I_{term} = corrente devido aos neutrons térmicos

F_{term} = fluxo de neutrons térmicos

L = comprimento do emissor em cm

com o erro associado:

$$\left(\frac{\sigma_{S_{\text{term}}}}{S_{\text{term}}} \right) = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{I_{\text{term}}}}{I_{\text{term}}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{F_{\text{term}}}}{F_{\text{term}}} \right)^2} \quad (19)$$

2.2 - Valores das imprecisões consideradas, para o cálculo do erro, na sensibilidade dos SPDs

2.2.1 - Vanádio

- Tabela 1 - Imprecisões consideradas, no cálculo do erro, para a sensibilidade à radiação gama

Itens	Imprecisões (%)
Eletrômetro	1,60 ; 1,60 ; 1,60 ; 1,60
Medidas	0,14 ; 0,13 ; 6,84 ; 4,37
Taxa de exposição	1,90
Erro na sensibilidade gama	5,10

- Tabela 2 - Imprecisões consideradas, no cálculo do erro, para a sensibilidade aos neutrons térmicos e epitérmicos

Itens	Imprecisões (%)
Eletrômetro	0,25 ; 0,25 ; 1,60 ; 1,60
Medidas (SPD nu)	6,84 ; 4,37 ; 0,15 ; 4,59
Medidas (SPD com cádmio)	6,84 ; 4,37 ; 0,12 ; 0,07
Fluxo gama (TLD sem cádmio)	5,00
Fluxo gama (TLD com cádmio)	5,00
Erro na sensibilidade gama	5,10
Fluxo de neutrons térmicos	2,80
Fluxo de neutrons epitérmicos	3,30
Erro na sensib. aos n. térmicos	3,04
Erro na sens. aos n. epitérmicos	8,86

2.2.2 - Cobalto

- Tabela 3 - Imprecisões consideradas, no cálculo do erro, para a sensibilidade à radiação gama

Itens	Imprecisões (%)
Eletrômetro	1,60 ; 1,60 ; 1,60 ; 1,60
medidas	0,22 ; 0,94 ; 0,57 ; 0,64
taxa de exposição	1,90
Erro na sensibilidade gama	8,28

- Tabela 4 - Imprecisões consideradas, no cálculo do erro, para a sensibilidade aos neutrons térmicos e epitérmicos

Itens	Imprecisões (%)
Eletrômetro	1,60 ; 1,60 ; 1,60 ; 1,60
Medidas (SPD nu)	0,57 ; 0,64 ; 0,29 ; 0,72
Medidas (SPD com cádmio)	0,57 ; 0,64 ; 0,52 ; 0,24
Fluxo gama (TLD sem cádmio)	5,00
Fluxo gama (TLD com cádmio)	5,00
Erro na sensibilidade gama	8,28
Fluxo de neutrons térmicos	2,80
Fluxo de neutrons epitérmicos	3,30
Erro na sensibilidade aos n. térmicos	3,26
Erro na sensibilidade aos n. epitérmicos	20,49

2.2.3 - Ródio

- Tabela 5 - Imprecisões consideradas, no cálculo do erro, para a sensibilidade à radiação gama

Itens	Imprecisões (%)
Eletrômetro	1,60 ; 1,60 ; 1,60 ; 1,60
Medidas	0,95 ; 2,02 ; 2,03 ; 2,65
Taxa de exposição	1,90
Erro na sensibilidade gama	2,52

- Tabela 6 - Imprecisões consideradas, no cálculo do erro, para a sensibilidade aos neutrons térmicos e epitérmicos

Itens	Imprecisões (%)
Eletrômetro	0,25 ; 0,25 ; 1,60 ; 1,60
Medidas (SPD nu)	2,03 ; 2,65 ; 0,30 ; 4,41
Medidas (SPD com cádmio)	2,03 ; 2,65 ; 0,45 ; 0,71
Fluxo gama (TLD sem cádmio)	5,00
Fluxo gama (TLD com cádmio)	5,00
Erro na sensibilidade gama	2,52
Fluxo de neutrons térmicos	2,80
Fluxo de neutrons epitérmicos	3,30
Erro na sensibilidade aos n. térmicos	2,83
Erro na sensibilidade aos n. epitérmicos	3,36

2.2.4 - Prata

- Tabela 7 - Imprecisões consideradas, no cálculo do erro, para a sensibilidade à radiação gama

Itens	Imprecisões (%)
Eletrômetro	1,60 ; 1,60 ; 1,60 ; 1,60
Medidas	0,68 ; 1,16 ; 0,58 ; 0,33
Taxa de exposição	1,90
Erro na sensibilidade gama	2,46

- Tabela 8 - Imprecisões consideradas, no cálculo do erro, para a sensibilidade aos neutrons térmicos e epitérmicos

Itens	Imprecisões (%)
Eletrômetro	0,25 ; 0,25 ; 0,25 ; 1,60
Medidas (SPD nu)	0,58 ; 0,33 ; 0,04 ; 0,52
Medidas (SPD com cádmio)	0,58 ; 0,33 ; 0,04 ; 0,18
Fluxo gama (TLD sem cádmio)	5,00
Fluxo gama (TLD com cádmio)	5,00
Erro na sensibilidade gama	2,46
Fluxo de neutrons térmicos	2,80
Fluxo de neutrons epitérmicos	3,30
Erro na sensibilidade aos n. térmicos	2,82
Erro na sensibilidade aos n. epitérmicos	3,36

2.2.5 - Platina

- Tabela 9 - Imprecisões consideradas, no cálculo do erro, para a sensibilidade à radiação gama

Itens	Imprecisões (%)
Eletrômetro	1,60 ; 1,60 ; 1,60 ; 1,60
Medidas	0,33 ; 0,59 ; 0,34 ; 0,22
Taxa de exposição	1,90
Erro na sensibilidade gama	2,53

- Tabela 10 - Imprecisões consideradas, no cálculo do erro, para a sensibilidade aos neutrons térmicos e epitérmicos

Itens	Imprecisões (%)
Eletrômetro	0,25 ; 0,25 ; 1,60 ; 1,60
Medidas (SPD nu)	0,18 ; 9,30 ; 0,34 ; 0,22
Medidas (SPD com cádmio)	0,34 ; 0,22 ; 0,16 ; 2,42
Fluxo gama (TLD sem cádmio)	5,00
Fluxo gama (TLD com cádmio)	5,00
Erro na sensibilidade gama	2,53
Fluxo de neutrons térmicos	2,80
Fluxo de neutrons epitérmicos	3,30
Erro na sensibilidade aos n. térmicos	763 *
Erro na sensibilidade aos n. epitérmicos	30,86

Obs.: * ⇒ valor meramente referencial pois a corrente do detetor coberto com cádmio está dentro do limite de erro da corrente devido à radiação gama.

ANEXO 3 - Valores da sensibilidade dos SPDs citados na literatura.

Tabela 11 - Valores de sensibilidade para SPDs com emissor de vanádio, citados na literatura consultada.

Diâmetro (mm)		Espessura (mm)		Material		Sensibilidade aos neutrons $10^{-22} \text{ A}/[(n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{cm}]$		Sensib. à radiação gama $\text{A}/(\text{R} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm})$	R E F
emissor	SPD	isolante	coletor	coletor	isolante	térmicos	epitérm.		
0,5	1,0	----	----	----	----	0,507	----	----	14
0,508	----	0,254	----	----	----	0,77 **	----	----	28
0,57	1,57	0,24	0,26	----	----	1,03 *	----	----	4
0,84	2,19	0,29	0,39	----	----	1,62 *	----	----	4
1,0	----	----	----	----	----	2 *	----	----	53
1,01	2,18	0,33	0,26	----	----	2,11 *	----	----	4
1,06	----	----	----	----	----	1,8	1,74	----	25
1,12	2,18	0,17	0,36	----	----	2,42 *	----	----	4
1,14	3	0,4	0,53	----	----	2,35 *	----	----	4
1,5	2,9	----	----	----	----	2	----	----	14
1,51	2,96	0,25	0,48	----	----	3,39 *	----	----	4
2,0	3,5	0,25	0,5	inox	Al_2O_3	----	----	$0,6 \cdot 10^{-17}$	26
2,0	----	----	----	----	Al_2O_3	----	----	$0,35 \cdot 10^{-17}$	26
2,0	3,5	----	----	inconel	Al_2O_3	3,43 *	----	----	18
2,0	3,5	0,35	0,25	inconel	Al_2O_3	4,19	----	----	9

Obs.: * \Rightarrow não discrimina neutrons térmicos e epitérmicos** \Rightarrow calculado

Tabela 12 - Valores de sensibilidade para SPDs com emissor de cobalto, citados na literatura consultada.

Diâmetro (mm)		Espessura (mm)		Material		Sensibilidade aos neutrons $10^{-22} A/[(n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{cm}]$		Sensib. à radiação gama $A/(R \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm})$	R E F
emissor	SPD	isolante	coletor	coletor	isolante	térmicos	epitérm.		
0,29	1,0	0,18	0,18	----	----	0,037 *	----	----	4
0,46	1,59	0,29	0,29	----	----	0,125 *	----	----	4
0,5	----	----	----	----	----	2,6	0,13	----	40
0,5	----	----	----	----	----	0,108 **	0,186 **	----	29
0,5	----	----	----	----	----	0,18 *	----	----	11
0,508	----	0,254	----	----	----	0,16 *	----	----	28
0,51	1,58	----	----	----	----	0,129 *	----	----	4
0,58	1,57	0,25	0,25	inconel	MgO	0,3	----	$0,144 \cdot 10^{-22} \diamond$	55
0,74	2,2	0,33	0,4	----	----	0,352 *	----	----	4
0,81	2,11	----	----	----	----	0,446 *	----	----	4
1,0	----	----	----	----	----	0,75 *	----	----	11
1,0	2,5	----	----	----	Al ₂ O ₃	0,44	----	$0,012 \cdot 10^{-17}$	15
1,0	----	----	----	----	----	0,7 *	----	----	53
1,0	----	----	----	----	----	0,6	0,059	$0,2 \cdot 10^{-17}$	44
1,13	2,98	0,45	0,48	----	----	0,889 *	----	----	4
1,4	----	0,5	0,25	inox	Al ₂ O ₃	1,05	----	----	3
1,5	----	----	----	----	----	1,25 *	----	----	11
1,5	2,9	----	----	----	----	1,6	----	----	14
1,9	3,5	----	0,24	inconel	Al ₂ O ₃	2,88 *	----	$0,436 \cdot 10^{-17}$	1
1,91	3,51	----	----	----	----	2,9 *	----	----	4
2,0	3,5	----	----	inconel	Al ₂ O ₃	2,24 *	----	----	18
2,0	----	----	----	----	----	2 *	----	----	11
2,0	----	0,5	----	----	Al ₂ O ₃	2,76 *	----	----	36
2,0	3,5	0,25	0,5	inox	Al ₂ O ₃	2,87 *	----	$0,035 \cdot 10^{-17}$	26
2,0	----	----	----	----	Al ₂ O ₃	2,68 *	----	$0,25 \cdot 10^{-17}$	26
2,0	3,4	----	----	----	----	2,66	----	----	14
2,0	3,5	----	----	----	Al ₂ O ₃	----	----	$0,38 \cdot 10^{-17}$	17
2,0	3,5	----	----	----	Al ₂ O ₃	2,66 *	----	$0,143 \cdot 10^{-17}$	17
2,0	3,5	----	----	inconel	Al ₂ O ₃	2,66	----	$0,24 \cdot 10^{-17}$	48

Obs.: * \Rightarrow não discrimina neutrons térmicos e epitérmicos

** \Rightarrow calculado

$\diamond \Rightarrow A/[(n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{cm}]$

Tabela 13 - Valores de sensibilidade para SPDs com emissor de rádio, citados na literatura consultada.

Diâmetro (mm)		Espessura (mm)		Material		Sensibilidade aos neutrons $10^{-22} A/[(n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{cm}]$		Sensib. à radiação gama $A/(R \cdot h^{-1} \cdot \text{cm})$	R E F
emissor	SPD	isolante	coletor	coletor	isolante	térmicos	epitérm.		
0,439	----	0,279	----	----	MgO	9,31	----	----	54
0,442	----	0,279	----	----	MgO	9,39	----	----	54
0,45	----	0,305	----	----	MgO	10,43	----	----	54
0,451	----	0,305	----	----	MgO	10,31	----	----	54
0,455	----	0,279	----	----	MgO	10,31	----	----	54
0,456	----	0,305	----	----	MgO	10,33	----	----	54
0,4572	----	----	----	----	----	9,1	----	----	38
0,461	----	0,305	----	----	MgO	9,64	----	----	54
0,466	----	0,259	----	----	MgO	10,57	----	----	54
0,469	----	0,279	----	----	MgO	10,88	----	----	54
0,471	----	0,305	----	----	MgO	10,55	----	----	54
0,477	----	0,305	----	----	MgO	10,82	----	----	54
0,48	----	0,293	----	----	MgO	10,15	----	----	54
0,5	1,6	----	----	----	Al ₂ O ₃	8,4 *	----	----	52
0,5	----	----	----	----	----	9,8 **	29,4 **	----	29
0,5	----	----	----	----	----	----	----	$0,18 \cdot 10^{-17}$	22
0,5	1,3	0,15	0,25	inox	Al ₂ O ₃	10,45	30,28	----	3
0,508	----	0,254	----	----	----	12 **	----	----	28
0,508	----	----	----	----	----	9,9	----	----	38
0,5588	----	----	----	----	----	11,5	----	----	38
0,7	----	----	----	----	----	----	----	$0,174 \cdot 10^{-17}$	26
1,0	2,5	----	----	----	Al ₂ O ₃	14	----	$0,12 \cdot 10^{-17}$	15
1,0	----	----	----	----	----	70 *	----	----	53
1,0	2,4	----	----	----	----	20	----	----	14
1,01	----	----	----	----	----	14,23	32,47	----	25

Obs.: * \Rightarrow não discrimina neutrons térmicos e epitérmicos

** \Rightarrow calculado

Tabela 14 - Valores de sensibilidade para SPDs com emissor de prata, citados na literatura consultada.

Diâmetro (mm)		Espessura (mm)		Material		Sensibilidade aos neutrons $10^{-22} \text{ A}/[(\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})\cdot\text{cm}]$		Sensib. à radiação gama $\text{A}/(\text{W}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{cm})$	R E F
emissor	SPD	isolante	coletor	coletor	isolante	térmicos	epitérm.		
0,21	1,07	0,35	0,081	inox	MgO	1,6 *	----	----	22
0,25	1,77	0,4	0,36	inox	MgO	2,1 *	----	----	22
0,27	1,07	0,31	0,094	inox	MgO	1,9 *	----	----	22
0,44	2,34	0,54	0,41	inox	MgO	3,6 *	----	----	22
0,5	----	----	----	----	----	5,52 *	----	----	13
0,5	1,3	0,15	0,25	inox	Al ₂ O ₃	4,33	22,49	$5,22\cdot 10^{-10}$	3
0,67	3,05	0,65	0,54	inox	MgO	6 *	----	----	22
0,75	4,37	1,0	0,81	inox	MgO	6,6 *	----	----	22
0,991	----	----	----	----	----	7,72	23,88	----	25
1,0	----	----	----	----	----	30 *	----	----	53

Obs.: * \Rightarrow não discrimina neutrons térmicos e epitérmicos

Tabela 15 - Valores de sensibilidade para SPDs com emissor de háfnio, citados na literatura consultada.

Diâmetro (mm)		Espessura (mm)		Material		Sensibilidade aos neutrons $10^{-22} A/[(n*cm^{-2}*s^{-1})*cm]$		Sensib. à radiação gama $A/(R*h^{-1}*cm)$	R E F
emissor	SPD	isolante	coletor	coletor	isolante	térmicos	epitérm.		
0,58	1,57	----	0,25	inconel	MgO	0,53	----	$0,468*10^{-22}$ ♦	55
0,75	----	0,6	----	----	Al ₂ O ₃	1,81 *	----	----	36
0,75	2,6	0,6	0,25	inconel	Al ₂ O ₃	2,38 *	----	$0,48*10^{-17}$	26
1,0	----	----	----	----	----	1,1	7,81	$3,73*10^{-9}$ ♦♦	2
1,0	----	----	----	----	----	0,94	0,73	$1,0*10^{-17}$	44
1,0 #	----	----	----	----	----	1,19	9,57	$1,19*10^{-9}$ ♦♦	2
1,19	3,43	----	0,38	inconel	Al ₂ O ₃	2,2	----	$0,333*10^{-22}$ ♦	55
1,45	----	----	----	----	----	2,2	1,5	$0,83*10^{-17}$	44

Obs.: * ⇒ não discrimina neutrons térmicos e epitérmicos

** ⇒ calculado

♦ ⇒ $A/[(n*cm^{-2}*s^{-1})*cm]$

♦♦ ⇒ $A/(W*g^{-1}*cm)$

⇒ aço inox + Hf

Tabela 16 - Valores de sensibilidade para SPDs com emissor de platina, citados na literatura consultada.

Diâmetro (mm)		Espessura (mm)		Material		Sensibilidade aos neutrons $10^{-22} A/[(n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{cm}]$		Sensib. à radiação gama $A/(R \cdot h^{-1} \cdot \text{cm})$	R E F
emissor	SPD	isolante	coletor	coletor	isolante	térmicos	epitérm.		
0,33	1,0	----	----	----	----	0,1	----	$0,41 \cdot 10^{-17}$ ②	41
0,33	1,0	----	----	----	----	0,1	----	$0,853 \cdot 10^{-17}$ ①	41
0,5 #	3,5	----	----	inconel	----	5,24	----	$1,52 \cdot 10^{-17}$	48
0,5	----	----	----	----	----	0,063 **	0,435 **	----	29
0,5	1,8	----	----	----	----	----	----	$1,6 \cdot 10^{-17}$	14
0,508	----	----	----	----	----	----	----	$1,027 \cdot 10^{-17}$ ①	30
0,51	1,57	----	----	----	----	0,18	----	$0,957 \cdot 10^{-17}$ ①	41
0,51	1,57	----	----	----	----	0,18	----	$0,618 \cdot 10^{-17}$ ②	41
0,56	1,57	----	0,25	inconel	MgO	0,14	----	$0,537 \cdot 10^{-22}$ ♦	55
0,59	1,56	0,27	0,22	----	----	0,102 *	----	$0,083 \cdot 10^{-22}$ ♦	4
0,97	2,18	0,34	0,27	----	----	0,245 *	----	$0,121 \cdot 10^{-22}$ ♦	4
1,0	2,4	----	----	----	----	----	----	$2 \cdot 10^{-17}$	14
1,08	3,0	0,43	0,53	----	----	0,298 *	----	$0,116 \cdot 10^{-22}$ ♦	4
1,44	3,0	0,33	0,45	----	----	0,435 *	----	$0,161 \cdot 10^{-17}$	4
1,91	3,48	----	----	----	----	1,4	----	$1,915 \cdot 10^{-17}$ ①	41
1,91	3,48	----	----	----	----	1,4	----	$2,419 \cdot 10^{-17}$ ②	41

Obs.: * \Rightarrow não discrimina neutrons térmicos e epitérmicos

** \Rightarrow calculado

♦ $\Rightarrow A/[(n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{cm}]$

\Rightarrow espiral

① \Rightarrow valor obtido numa fonte de Co-60

② \Rightarrow valor obtido no reator

12 - REFERÊNCIAS:

- 1- ADAMS, J.P. & BERTA, V.T. Monitoring reactor vessel liquid level with a vertical string of Self-Powered Neutron Detectors. *Nucl. Sci. Eng.*, 88:367-75, 1984.
- 2- AGU, M.N. *Etude théorique et expérimentale de collecteurs pour la mesure des flux de neutrons épithermiques en réacteurs*. Grenoble, France, 1986. (Thèse, Université scientifique et médicale de Grenoble).
- 3- AGU, M.N. & PETITCOLAS, H. Self-Powered Detector response to thermal and epithermal neutron flux. *Nucl. Sci. Eng.*, 107: 374-84, 1991.
- 4- ALLAN, C.J. Response characteristics of Self-Powered Flux Detectors in CANDU reactors. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Proceedings Of An International Symposium On Nuclear Power Plant Control and Instrumentation, held in Cannes, 24-28 April, 1978, v.2, p. 325-337.*
- 5- ALLAN, C.J.; DREWELL, N.H.; HALL, D.S. Recent advances in Self-Powered Flux Detector development for CANDU reactors. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Proceedings Of An International Symposium On Nuclear Power Plant Control and Instrumentation, held in Munich, 11-15 October, 1982, p. 505-520.*
- 6- ALLAN, C.J. & FEHRENBACH, P.J. *Operating characteristics of Vanadium, Platinum and Cobalt Self-Powered Flux Detectors on the X-6 pressure tube of the NRX reactor*. Ontario, Canada, Chalk River Nuclear Laboratories, 1980. (AECL-6957).
- 7- ALLAN, C.J. & LYNCH, G.F. *Signals produced by Inconel mineral insulated coaxial cables in neutron and gamma-ray fields*. Ontario, Canada, Chalk River Nuclear Laboratories, 1980. (AECL-6876).
- 8- ALLISON, C.M. & QUAPP, W.J. Temperature sensitivity of Cobalt Self-Powered Neutron Detectors under PWR conditions. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 26:524, 1977.
- 9- ANDERSON, I.O. & SODERLUNG, B. *Vanadium beta emission detectors for reactor in-core neutron monitoring*. Stockholm, Sweden, 1969. (AE-359).
- 10- ANTONOV, N. A. & YORDANOV, Y. D. Some theoretical investigations on prompt Self-Powered Neutron Detectors (Hafnium and Erbium emitters). *Nucl. Sci. Eng.*, 94:206-12, 1986.
- 11- BACCONNET, E. ; DAUPHIN, G. ; DUCHENE, J. ; VERDANT, R. *Mesure de flux de neutrons en réacteurs avec chambres à fission pour haute température et collecteurs de Cobalt*. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Proceedings Of An International Symposium On Nuclear Power Plant Control and Instrumentation, held in Prague, 22-26 January, 1973, p. 769-782.*
- 12- BANDA, L. A. Operational experience in Rhodium Self-Powered Detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 26(1): 910-15, 1979.
- 13- BAUDRY, R. *Mesure continue des flux de neutrons thermiques par sonde à émetteur beta*. Saclay, France, Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay. May 1972. (RAPPORT CEA-R-4312).

- 14- BEIJING NUCLEAR INSTRUMENT FACTORY Gas-filled nuclear radiation detectors and Self-Powered Detectors. (Catálogo comercial).
- 15- BELLMANN, D. & HAMIDIAN, R. Determination of the neutron- and gamma-sensitivity of a Rh-SPN-Detector. *Atomkernenergie*, 26(1):25-8, 1975.
- 16- BITELLI, U. **Medida e cálculo da distribuição espacial e energética de neutrons no núcleo do reator IEA-R1.** São Paulo, 1988. (Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).
- 17- BOCK, H.; STIMLER, H.; STRINDEHAG, O. Transient Response of Cobalt Self-Powered Neutron Detectors. *Nucl. Instrum. Methods*, 87:299-300, 1970.
- 18- BRABKAS, M. ; STRINDEHAG, O. ; SODERLUND, B. Long-term test of Self-Powered Neutron Detectors in HBWR. *Nucl. Eng. Int.* , p. 421-25, May 1973.
- 19- CANNON, C.P. High voltage instrument cables for 650°C, in-vessel Breeder Reactor service. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* , 27(1): 852-56, 1980.
- 20- COVILLE, P. & TIXIER, M. Les detecteurs a cables integres pour utilisation sous flux et/ou a temperature elevee. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Proceedings Of An International Symposium On Nuclear Power Plant Control and Instrumentation, held in Cannes, 24-28 April, 1978, v. 2.** p. 275-289.
- 21- CURTIS, T.D. SPND Operating Experience at Oconee Nuclear Station. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* , 26(1):944-48, 1979.
- 22- EMEL'YANOV, Ya. ; Yu. VOLOD'KO ; O. K. EGOROV ; L. V. KONSTANTINOV ; V. V. POSTNIKOV Some Characteristics of Electron-Emission Neutron Detectors with Ag, Ag-109, Rh, and Gd emitters. *At. Énerg.*, 34(3):203-05, 1973.
- 23- EMEL'YANOV, Ya. ; Yu. VOLOD'KO ; O. K. EGOROV ; S. B. ZLOKAZOV ; Yu. A. SAFIN ; V. I. UVAROV. Radiation testing and thermal testing of Compton-emission neutron detectors having a Hafnium -containing emitter-. *At. Énerg.* , 54(3):189-92, 1983.
- 24- EMEL'YANOV, I. Ya. Radiation and thermal tests of electron-emissive neutron detectors and cables with magnesia insulation. *At. Énerg.* , 37(1):72-76, 1974.
- 25- ERBEN, O. The determination of Self-Powered Neutron Detector sensitivity on thermal and epithermal neutron flux densities. *Jad. Energ.* , 26(2):47-52, 1980.
- 26- GEBURECK, P. ; HOFMANN, W. ; JASCHIK, W. ; SEIFRITZ, W. ; STEGEMANN, D. Development and in-core application of Self-Powered Neutron Detectors. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Proceedings Of An International Symposium On Nuclear Power Plant Control and Instrumentation, held in Prague, 22-26 January, 1973, p. 783-802.**
- 27- GLASTONE, S.; SESONSKE, A. - **Ingenieria de reactores nucleares.** Spain, Reverté, 1975. p. 880.
- 28- GOLDSTEIN, N.P. A Monte Carlo calculation of the neutron sensitivity of Self-Powered Detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* , 20(1):549-56, 1973.

- 29- GOLDSTEIN, N. P.; CHEN, C. L.; TODT, W.H. The epithermal component in the neutron response of various Self-Powered Detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* , 27(1):838-47, 1980.
- 30- GOLDSTEIN, N.P.; CHEN, C.L.; TODT, W.H. Gamma-sensitive Self-Powered Detectors and their use for in-core flux-mapping. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* , 28(1):752-57, 1981.
- 31- GOLDSTEIN, N.P. & TODT, W.H. A survey of Self-Powered Detectors - present and future. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* , 26(1):916-23, 1979.
- 32- GRIN, M. **Colletrons, Self-Powered Neutron Flux Detectors. Part 1: Theoretical considerations.** Euratom, 1972. (EUR 4775 e)
- 33- HALL, D. S. Monte Carlo simulation of Self-Powered Flux Detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* , 29(1):646-50, 1982.
- 34- HECKER, R. ; AL DABAGH, D. ; BRIXY, H.; MEIER, B. Numerical and experimental investigations of large-area Self-Powered Neutron Detectors. In: **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Proceedings Of An International Symposium On Nuclear Power Plant Control and Instrumentation, held in Munich, 11-15 October, 1982, p. 521-533.**
- 35- HILBORN, J.W. Self Powered Neutron Detectors for reactor flux monitoring. *Nucleonics*, 22(2): 69-74, 1964.
- 36- JASCHIK, W. & SEIFRITZ, W. Model for calculating prompt-response Self-Powered Neutron Detectors. *Nucl. Sci. Eng.* , 53:61-78, 1974.
- 37- KNOLL, G. F. **Radiation detection and measurement.** 2.ed. New York, Wiley, 1988. p. 54.
- 38- KROON, J. **Initial absolute calibration factors of some neutrons sensitive Self Powered Detectors.** Ontario, Canada, Chalk River Nuclear Laboratories. (AECL 5124.1.10), p. 135-57.
- 39- LOPES, M. C. & AVILA, J. M. Prompt response Self-Powered Neutron Detectors I: The Effective Charge per Neutron Captured. *Nucl. Sci. Eng.* , 96:303-09, 1987.
- 40- LOPES, M. C. & AVILA, J. M. Prompt response Self-Powered Neutron Detectors II: Thermal and Epithermal Sensitivities. *Nucl. Sci. Eng.* , 96:310-17, 1987.
- 41- LYNCH, G.F.; SHIELDS, R.B.; COULTER, P.G. Characterization of Platinum Self-Powered Detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* , 24(1):692-95, 1977.
- 42- LYNCH, G.F. & SHIELDS, R.B. **On the use of MgO as insulation for coaxial signal cables in a reactor environment.** Ontario, Canada, Chalk River Nuclear Laboratories, 1974. (AECL-4827).
- 43- MITELMAN, M.G. ; EROFEEV, R.S.; ROZENBLYUM, N.D. Transformation of the energy of short-lived radioactive isotopes. *At. Ehnerg.* , 10(1):70-1, 1961.
- 44- NOISE ANALYSIS Process Datatec, Edition 1989, p. 3.9-3.26. (Apostila de curso)

- 45- REUTER-STOKES - SELF-POWERED FLUX DETECTORS. (Catálogo comercial).
- 46- REUTER STOKES - SELF-POWERED IN-CORE DETECTORS, 1972. (Catálogo comercial).
- 47- SEIFRITZ, W. An analysis of space dependent neutron flux density fluctuations at Lingen Boiling Water Reator (KWL) by methods of stochastic processes. *Atomkernenergie*, 19(4):271-79, 1972.
- 48- SEIFRITZ, W. & GEBURECK, P. Using a Self-Powered Platinum Flux Detector for in-core measurements in a BWR. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 17:449-50, 1973.
- 49- SHIELDS, R.B. A Platinum in-core Flux Detector. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 20(1):603-08, 1973.
- 50- SILVA, M. M. **Cálculo da sensibilidade térmica de detectores auto-energizáveis de Cobalto utilizando o método de Monte-Carlo.** São Paulo, 1991. (Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares).
- 51- STRINDEHAG, O. Response of Self-Powered Gamma Detectors. *Atomkernenergie*, 17(4):267-70, 1971.
- 52- STRINDEHAG, O. & SODERLUNG, B. Differential Sensitivity of Long Self-Powered Neutron Detector. *Nucl. Instrum. Methods*, 78:173-74, 1970.
- 53- VERDANT, R. Les collectrons. *Bull. Inf. Sci. Tech.*, 195: 3-6, Septembre 1974.
- 54- WARREN, H. D. Calculational model for Self-Powered Neutron Detector. *Nucl. Sci. Eng.*, 48(3):331-42, 1972.
- 55- WARREN, H. D. & SHAH, N. H. Neutron and gamma-ray effects on Self-Powered in-core Radiation Detectors. *Nucl. Sci. Eng.*, 54(4):395-15, 1974.

Cidade Universitária - "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
Travessa R nº 400 - Caixa Postal 11049 - Pinheiros
Telefone (PABX) 211-6011 - End. Telefónico IPENUCLEAR
Telex (11) 83592 - IPEN - BR
SÃO PAULO - Brasil

