

## DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE DE DETETORES AUTO-ENERGIZADOS

Vadim Surkov - EMPRESA GERENCIAL DE PROJETOS NAVAIS (EMGEPRON) - Av. Prof. Lineu Prestes, Nº 2242, Cid. Universitária, CEP 05508-900, São Paulo, S.P.  
Adalberto José Soares - INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES (IPEN) - Rua do Matão, Travessa R, Nº 400, Cid. Universitária, São Paulo, S.P.

### RESUMO

Este trabalho teve por objetivo determinar a sensibilidade inicial de Detetores do tipo Auto-Energizados (SPDs). Foram determinadas as sensibilidades a neutrons térmicos, epitérmicos e ao fluxo gama para SPDs de Vanádio, Cobalto, Ródio, Prata e Platina e quando possível estes valores são comparados com dados da literatura. Para a determinação da sensibilidade a neutrons térmicos e epitérmicos os SPDs foram irradiados no Reator IEA-R1 do IPEN. O fluxo de neutrons térmicos e epitérmicos foi determinado com detetores de ativação (Ouro) nus e cobertos com Cádmio.

### INTRODUÇÃO

Sistemas de monitoração "in-core" são sistemas compostos de detetores distribuídos dentro do núcleo de um reator e visam permitir que os operadores conheçam o nível de fluxo neutrônico e consequentemente a densidade de potência em qualquer ponto do núcleo. Estes sistemas podem ser de dois tipos: sistemas móveis onde detetores fazem uma espécie de varredura azimutal e sistemas fixos, onde vários detetores permanecem no interior do núcleo do reator cobrindo a região ativa proporcionando medidas instantâneas de vários pontos do mesmo.

Os sistemas móveis se caracterizam por uma série de tubos secos (por onde passam os detetores) 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 em sistemas "Aero-balls".

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

As vantagens dos sistemas fixos são evidentes pois permitem monitoração contínua e minimizam a possibilidade de vazamentos do reator (as "penetrações eletrônicas" dificilmente resultam em vazamento), ao contrário das penetrações de tubos secos necessárias aos sistemas móveis. Estes sistemas 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 [1] sendo, aos poucos, incorporados em outros tipos de reatores e atualmente todos os novos projetos de reatores prevêem a sua existência. O principal componente deste sistema é o SPD cuja configuração típica é coaxial consistindo de um emissor central, um material isolante e de um coletor (o próprio revestimento do detetor) como visto na Figura 1.

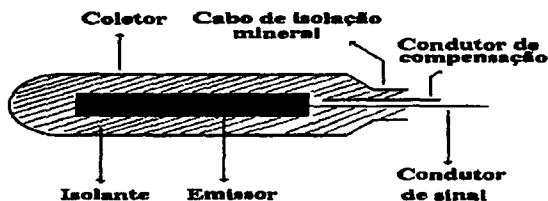


Figura 1 - Vista esquemática de um SPD

Como principais características o SPD apresenta: pequeno tamanho (diâmetro externo 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-).

Assim, tendo por objetivo a caracterização deste tipo de detetor e dando prosseguimento ao programa de desenvolvimento de SPDs do IPEN, realizou-se a determinação experimental da sensibilidade, comparando, sempre que possível, os valores obtidos com os dados fornecidos pela literatura.

Nota:

- 1) Características dos SPDs fabricados pelo IPEN:  
emissor  $\Rightarrow$  diâmetro = 1 mm ; comprimento = 100 mm  
isolante (óxido de alumínio)  $\Rightarrow$  espessura = 0,25 mm  
coletor (aço inox)  $\Rightarrow$  espessura = 0,25mm ; diâmetro externo = 2mm

### COMPOSIÇÃO DO SINAL DO SPD

Uma vez instalado no núcleo de um reator nuclear, a corrente induzida no SPD 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 externos dos materiais do reator

**Corrente Devido À Captura de Neutrons.** Dependendo dos materiais utilizados, a captura de neutrons no SPD resulta na formação de núcleos radioativos que decaem por emissão  $\beta$  gerando uma corrente que é proporcional ao fluxo de neutrons. Esta corrente é chamada de "atrasada" pois segue as mudanças na intensidade de fluxo com uma constante de tempo determinada pela meia-vida do núcleo radioativo. Este é o mecanismo preponderante na produção de corrente em SPDs com emissores de Vanádio, Ródio e Prata.

**Corrente Devido Aos Raios Gama De Captura.** A captura de neutrons nos materiais é normalmente acompanhada pela emissão de raios gama de captura que interagem com o material liberando elétrons, via efeitos Compton e fotoelétrico, causando assim uma corrente. Este processo é chamado de interação  $(n, \gamma, e)$  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 SPDs de Platina.

**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 e produzir uma corrente. Este processo é chamado de interação ( $\gamma$ , e) e possui uma componente imediata e outra atrasada.

A componente imediata da corrente tem origem nos raios gama de captura e de fissão associados à captura de neutrons no combustível e materiais do reator e a componente atrasada surge do decaimento dos produtos de fissão e ativação.

A interação ( $\gamma$ , e) é um importante mecanismo de produção de corrente em SPDs de Platina e em detectores em que o número atômico do emissor é significativamente maior que o do coletor.

**Corrente Devido A Elétrons Externos Dos Materiais Do Reator.** Os elétrons gerados pelos materiais do reator (devido às interações com neutrons e raios gama) também podem contribuir para a corrente de saída [2] sendo este processo chamado de interação (e). Estas interações, entretanto são consideradas parasitas, e usualmente são minimizadas podendo ser desprezadas.

Assim, a corrente total de um SPD é a soma algébrica das correntes individuais devido às diferentes interações, ou seja:

$$I_T = I_{\beta} + I_{n, \gamma, e} + I_{\gamma, e} \quad (1)$$

Onde:

$I_T \Rightarrow$  corrente total do SPD

$I_{\beta} \Rightarrow$  componente atrasada devido ao decaimento beta no emissor

$I_{n, \gamma, e} \Rightarrow$  componente rápida devido aos gamas de captura de neutrons no emissor

$I_{\gamma, e} \Rightarrow$  componente rápida devido aos gamas externos

Devemos observar que a corrente do SPD devido aos gamas externos pode ser positiva ou negativa por ser função dos números atômicos do emissor e coletor -para uma dada geometria- pois os efeitos fotoelétrico e Compton (que são função do número atômico), são preponderantes para a geração desta corrente (a corrente medida é a diferença entre as correntes "saindo" do emissor e coletor). Assim, materiais emissores com número atômico inferior ao 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, por exemplo, SPDs de Vanádio ( $Z = 23$ ) e de Cobalto ( $Z = 27$ ).

Em geral, as dimensões do cabo são escolhidas de forma que a sua contribuição 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".

No SPD rápido predominam reações do tipo ( $n, \gamma, e$ ) ou ( $\gamma, e$ ) que produzem corrente imediatamente, proporcionando indicação rápida da mudança do fluxo e possibilitam a tomada de ações de segurança. Os principais materiais emissores utilizados são o Cobalto, o Háfio e a Platina. Já no SPD lento predomina a reação do tipo ( $n, \beta$ ) onde a corrente gerada resulta do decaimento beta que por sua vez está ligado à meia vida do isótopo formado sendo, em geral, utilizados para a medida do fluxo de neutrons em regime estacionário. Neste caso os principais materiais emissores são o Vanádio, o Ródio e a Prata.

## DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE GAMA

Para avaliação da sensibilidade à radiação gama, os SPDs foram irradiados numa fonte de Co-60 de  $1,85 \cdot 10^{14}$  Becquerels (5000 Curies) disponível no TE-IPEN utilizando-se um

eletrômetro digital acoplado a uma impressora para o registro da corrente.

Os valores médios das correntes de "BG" (corrente que o SPD fornece mesmo sem radiação) e sob irradiação com a respectiva taxa de exposição são apresentados a seguir:

Tabela 1 - Valores médios das correntes de "BG" e sob irradiação, na fonte de Cobalto-60, dos SPDs em estudo

SPD	$I_{sBG}$ (10 <sup>-12</sup> A)	$I_{cBG}$ (10 <sup>-12</sup> A)	$I_s$ (10 <sup>-12</sup> A)	$I_c$ (10 <sup>-12</sup> A)	Taxa de expos. (R/h)
Vanádio	0,02	0,06	- 5,91	- 3,53	251301
Cobalto	- 0,62	- 1,27	- 8,68	- 7,05	279077
Ródio	-0,87	- 0,86	5,02	- 1,36	251301
Prata	0,83	0,73	4,99	- 0,88	251301
Platina	0,57	0,55	54,1	1,29	279077

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 do SPD

$I_c$  = corrente média do condutor de compensação do SPD

Os resultados obtidos foram comparados com os existentes na literatura consultada e estão apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 - Comparação das sensibilidades à radiação gama obtidas para os SPDs com os valores disponíveis na literatura consultada

SPD	Sensibilidade [10 <sup>-17</sup> A/(R/h)*cm]	Referência
Vanádio	- 0,093 ± 0,005 -----	este trabalho dado de literatura não encontrado
Cobalto	- 0,082 ± 0,007 -0,012 -0,2	este trabalho [3] [4]
Ródio	0,25 ± 0,006 0,12	este trabalho [3]
Prata	0,23 ± 0,006 -----	este trabalho dado de literatura não encontrado
Platina	1,89 ± 0,05 2,00	este trabalho [5]

## DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE AOS NEUTRONS TÉRMICOS E EPITÉRMICOS

**Descrição Do Dispositivo De Irradiação.** Um dispositivo, 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 soldados ao plug de um elemento combustível (para encaixe na placa matriz do Reator IEA-R1) tendo por funções: servir de fixação dos cabos dos SPDs quando da irradiação de longa duração e serem utilizados como guias para inserir, na posição desejada, outros detectores (mini-câmara de fissão, folhas de Ouro, TLDs etc.) possibilitando assim, a calibração dos SPDs. Na região de irradiação (parte frontal), o dispositivo possui 12 tubos que possibilitam a fixação dos SPDs e na sua parte posterior um bloco de grafite com a função de refletor. A Figura 2 mostra a posição de irradiação (68 da placa matriz do reator) e esquematicamente uma vista do dispositivo:

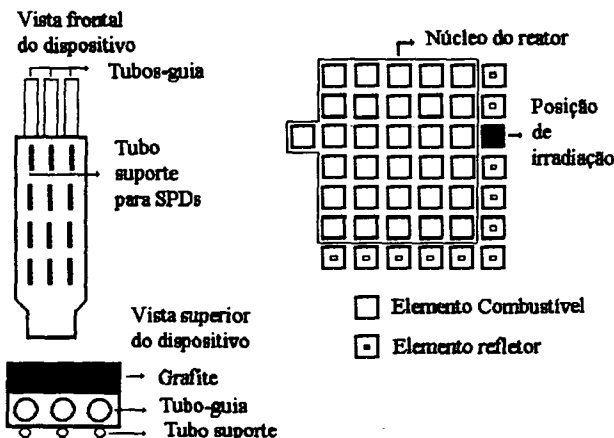


Figura 2 - Vista esquemática do dispositivo de irradiação e posição de irradiação dos detetores na placa matriz

Para a determinação da sensibilidade a neutrons térmicos e epitérmicos, os SPDs foram irradiados com e sem cobertura de Cádmio (espessura de 0,5 mm) no tubo central do dispositivo de irradiação a uma potência de 100 KW e o fluxo de neutrons térmicos e epitérmicos foi determinado utilizando-se folhas de Ouro.

Sob irradiação, SPD coberto ou não com Cádmio, adotou-se como tempo mínimo, cinco meia-vidas do isótopo formado no emissor para os SPDs de resposta lenta (Vanádio, Ródio e Prata). Assim, os tempos utilizados foram:

- SPDs de resposta rápida (Cobalto e Platina)  $\Rightarrow$  16 minutos
- SPDs de Ródio e Prata  $\Rightarrow$  16 minutos
- SPD de Vanádio  $\Rightarrow$  26 minutos

Na determinação do campo gama no Reator IEA-R1 foram utilizados TLDs (dosímetros termo-luminescentes) inseridos no tubo-guia central do dispositivo de irradiação sendo realizadas irradiações com TLDs cobertos e não com Cádmio. Assim, para a determinação do fluxo de radiação gama externo foram utilizados 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. Os valores médios das correntes líquidas dos SPDs (descontadas as correntes de compensação e "BG") com os respectivos fluxos sob irradiação são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 - Valores das correntes dos SPDs nus e cobertos com Cádmio e respectivos fluxos

SPD	$I_{t1}$ ( $10^{-12}A$ )	$I_{t2}$ ( $10^{-12}A$ )	Fluxo de n. térmicos ( $10^{11}nv$ )	Fluxo de n. epitérm. ( $10^{10}nv$ )	Taxa de exp. via TLDs (R/h)
Vanádio	183,3	- 0,95	3,72	2,00	sem Cádmio $1,84 \cdot 10^6$
Cobalto	243,2	- 32,30	5,01	3,17	
Ródio	8746	936,5	6,11	4,32	com Cádmio $2,25 \cdot 10^6$
Prata	3685	547,9	5,01	3,17	
Platina	451,7	428,8	6,11	4,32	

Onde:

$I_{t1} \Rightarrow$  corrente do SPD sem cobertura de Cádmio

$I_{t2} \Rightarrow$  corrente do SPD com cobertura de Cádmio

Os valores obtidos para a sensibilidade a neutrons foram comparados com os existentes na literatura consultada sendo apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 - Valores da sensibilidade aos neutrons térmicos e epitérmicos dos SPDs comparados com os existentes na literatura consultada

SPD	Sensibilidade aos neutrons térmicos ( $10^{-22}A/nv \cdot cm$ )	Sensibilidade aos neutrons epitérm. ( $10^{-22}A/nv \cdot cm$ )	Referência
Vanádio	$0,48 \pm 0,02$ 1,8	$1,00 \pm 0,09$ 1,74	este trabalho [6]
Cobalto	$0,54 \pm 0,02$ 0,60 0,48	$- 0,44 \pm 0,09$ 0,059 -----	este trabalho [4] [7]
Ródio	$12,8 \pm 0,04$ 14,23	$20,35 \pm 0,07$ 32,47	este trabalho [3]
Prata	$6,28 \pm 0,18$ 7,72	$15,65 \pm 0,53$ 23,88	este trabalho [2]
Platina	$0,16 \pm 0,05$ n. total = 0,298	$0,07 \pm *$ -----	este trabalho [8]

Obs.: \*  $\Rightarrow$  valor de sensibilidade referencial. Não calculado o erro devido aos pontos apresentados na seção Análise de Resultados.

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

**Sensibilidade Gama.** A resposta do SPD à radiação gama é uma função dos números atômicos do emissor e coletor -para uma mesma geometria- podendo, dependendo dos materiais, resultar numa sensibilidade negativa (corrente coletor-emissor maior que a corrente emissor-coletor). Tendo em vista que, em geral, os coletores são de Inconel ( $Z=27,2$ ) ou Aço Inox ( $Z=25,6$ ) podemos dizer que o material Cobalto ( $Z=27$ ) é uma espécie de limiar, ou seja, materiais emissores com número atômico superior ao Cobalto acarretarão num aumento da corrente emissor-coletor e portanto a sensibilidade passará a ser positiva (comprovado neste trabalho).

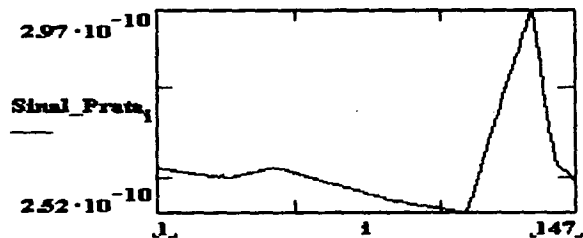
Podemos também notar (Tabela 2), uma discrepância entre os valores da sensibilidade gama para os SPDs de Ródio e Prata (a sensibilidade do SPD de Prata deveria ser maior do que a obtida para o SPD de Ródio) sendo levantadas as seguintes hipóteses:

- diferentes valores da resistência de isolamento ( $7,5 \cdot 10^9$  Ohms para o Ródio e acima de  $200 \cdot 10^9$  Ohms para a Prata) influenciando nas medidas da corrente sob irradiação devido, principalmente, às baixas correntes envolvidas
- variação no comprimento e diâmetro dos emissores

**Sensibilidade Aos Neutrons Térmicos E Epitérmicos.** A determinação da sensibilidade aos neutrons apresenta como principal dificuldade a necessidade de se utilizar "filtros" para discriminar neutrons térmicos de epitérmicos pois, 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 gamas de captura que podem gerar elétrons (por efeito fotoelétrico e Compton) e atingir o coletor do SPD alterando sua resposta.

As diferenças apresentadas nos valores obtidos com os dados de literatura podem ser devido aos seguintes fatores:

- devido à dificuldade de se medir o campo gama no reator com TLDs, os valores obtidos são uma estimativa dos valores da taxa de exposição, ou seja, apresentam uma grande incerteza.
- pelo próprio princípio de funcionamento do reator, a flutuação do fluxo de neutrons implica em possíveis erros pois através de folhas de Ouro obtemos o fluxo de neutrons médio. Já no caso do SPD, as medidas das correntes utilizadas para o cálculo da sensibilidade podem ter se realizado num "pico" ou "vale" desta flutuação como é demonstrado na Figura 3 obtida durante uma das irradiações das folhas de Ouro a uma potência de 10 kW:



Onde  $i \Rightarrow$  uma medida a cada 10 segundos

Figura 3 - Sinal do SPD de Prata durante uma das irradiações de folhas de Ouro no Reator IEA-R1 a uma potência de 10 kW

Para o caso do SPD de Cobalto (sensibilidade aos neutrons epitérmicos negativa), 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 as correntes 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, várias medidas tiveram que ser refeitas (devido às altas taxas de dose envolvidas), afetando assim, os valores finais obtidos.

Em relação ao SPD de Platina, o erro associado ao valor da sensibilidade epitérmica não foi calculado pois a corrente do SPD coberto com Cádmio está dentro do limite de erro da corrente devido à radiação gama. Assim, o valor da sensibilidade aos neutrons epitérmicos obtido para este SPD é meramente referencial.

Ressalte-se 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.

## CONCLUSÕES

Constatou-se a dificuldade de se determinar a sensibilidade à radiação gama para este tipo de detector, devido às baixas correntes envolvidas nas medidas e 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 detector 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.

Notou-se que 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 detectores (principalmente a espessura do isolante por ser o caminho que o elétron ou beta deve atravessar para atingir o coletor). Normalmente é fornecido só o diâmetro e o material do emissor.

- 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 pois, espectros diferentes implicam em diferentes sensibilidades.
- não é fornecido o valor da resistência de isolamento dos detectores.
- a técnica experimental utilizada para a obtenção das sensibilidades e dados como tempo de irradiação, recobrimento ou não do detector, espessura do recobrimento normalmente não são fornecidos.
- o erro associado às medidas normalmente não é fornecido.

Apesar destes pontos podemos notar que, excetuando-se os valores da sensibilidade gama para os SPDs de Ródio e Prata e os valores da sensibilidade a neutrons epitérmicos para o SPD de Cobalto e Platina, os demais valores obtidos neste trabalho apresentam razoável coerência com os valores citados na literatura.

## REFERÊNCIAS

- [1]- ALLAN, C.J., DREWELL, N.H. and HALL, D.S. - Recent advances in Self-Powered Flux Detector development for CANDU reactors. In: *Proceedings Of An International Symposium On Nuclear Power Plant Control And Instrumentation*. (Munich, Germany, October 11-15, 1982)
- [2]- CATÁLOGO DA REUTER-STOKES - SELF-POWERED FLUX DETECTORS
- [3]- BELLMANN, D. and HAMIDIAN, R. - Determination of the neutron- and gamma-sensitivity of a Rh-SPN-Detector. In: *Atomkernenergie*, Bd.26, Lfg.1: 25-8, 1975
- [4]- NOISE ANALYSIS - PROCESS DATATEC Edition 1989.
- [5]- CATALOGO DA BEIJING NUCLEAR INSTRUMENT FACTORY - GAS-FILLED NUCLEAR RADIATION DETECTORS AND SELF-POWERED DETECTORS
- [6]- ERBEN, O. - The determination of Self-Powered Neutron Detector sensitivity on thermal and epithermal neutron flux densities. In: *Jaderná Energie*, 26, c.2: 47-52, 1980
- [7]- SILVA, M.M. - Cálculo da sensibilidade térmica de detectores auto-energizáveis de Cobalto utilizando o método de Monte-Carlo In: *Dissertação de Mestrado - IPEN*
- [8]- ALLAN, C.J. - Response characteristics of Self-Powered Flux Detectors in CANDU reactors. In: *AECL-6171* 13 p, 1978.

## ABSTRACT

The objective of this work was the determination of the initial sensitivity of Self Powered Detectors (SPDs). Measurements of thermal, epithermal and to gamma flux sensitivities were made with Vanadium, Cobalt, Rhodium, Silver and Platinum SPDs and, when possible, the values are compared with the ones from the existing literature. The determination of neutron sensitivity was realized using the IEA-R1 Reactor from IPEN. The thermal and epithermal neutron flux were determined with bare and Cadmium covered activation foils (Gold).