

ATTENTION MICROFICHE USER,

The original document from which this microfiche was made was found to contain some imperfections that reduce full comprehension or some of the text despite the good technical quality of the microfiche itself. The failures may be:

- missing or illegible pages/figures;
- wrong pagination;
- poor overall printing quality, etc...

We normally refuse to microfiche such a document and request a replacement document (or page) from the national INIS Centre concerned. However, our experience shows that many months pass before such documents are replaced. Sometimes the Centre is not able to supply a better copy or, in some cases, the pages that were supposed to be missing correspond to a wrong pagination only. We feel that it is better to proceed with distributing the microfiche made of these documents than to withhold them till the imperfections are removed. If the removals are subsequently made then replacement microfiche can be issued. In line with this approach then, our specific practice for microfiching such documents is as follows:

1. A microfiche of an imperfect document will be marked with a special symbol (black circle) on the left of the title. This symbol will appear on all masters and copies of the document (1st fiche and trailer fiches) even if the imperfection is on one fiche of the report only.
2. If the incorrectnesses are not too general the reason will be specified on a sheet such as this, in the space below.
3. The microfiche will be considered as temporary, but sold at the normal price. Replacements, if they can be issued, will be available for purchase at the regular price.
4. A new document will be requested from the supplying Centre.
5. If the Centre can supply the necessary pages/document a new master fiche will be made to permit production of any replacement microfiche that may be required.

The original document from which this microfiche has been prepared has these imperfections:

- missing pages/figures numbered: 96 + 97 (Fig. 5.4).
- wrong pagination
- poor overall printing quality
- combinations of the above
- other

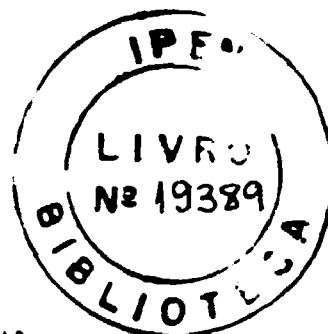
INIS Clearinghouse
I.A.E.A.
P.O. Box 100
A-1400, VIENNA
AUSTRIA

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

ANEXO 25
NIS - BR 2453

NIS - BR -- 2453 .

UTILIZAÇÃO DE DETETORES DO TIPO "SELF-POWERED" NO
REATOR IEA-R1



FELÍCIA DEL GALLO ROCHA

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do grau de "Mestre na Área de Concentração em Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear".

Orientador: Dr. João Manoel Moreira Losada

São Paulo
1989

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, de uma forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

Em particular agradeço:

- Ao Prof. Dr. João Manoel Moreira Losada, pela orientação segura;
- Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, pelo apoio material e de pessoal;
- Ao Ricardo Takeshi, pelo carinho, compreensão e incentivo que recebi durante a execução do trabalho;
- Aos meus pais que, pela sua orientação, permitiram esta minha realização profissional.

UTILIZAÇÃO DE DETETORES DO TIPO "SELF-POWERED" NO REATOR IEA-R1

FELÍCIA DEL GALLO ROCHA

R E S U M O

É apresentado neste trabalho, um estudo teórico sobre os diversos tipos de detetores do tipo SPND, que são usados como parte da instrumentação "in core" de reatores nucleares. A seguir, são apresentados os resultados obtidos com os detetores SPND de Érbio e Cobalto tanto para a determinação do fluxo neutrônico como também para o controle de potência do reator IEA-R1.

Devido a grande dimensão dos detetores SPND disponíveis no Instituto não foi possível obter com precisão a distribuição do fluxo neutrônico no reator IEA-R1. Os resultados obtidos com os detetores SPND na parte de controle de potência do reator IEA-R1, demonstram que os mesmos possuem uma excelente linearidade e rápido tempo de resposta.

É também apresentado uma proposta para a construção de um protótipo de um detetor SPND usando platina como fio emissor. A proposta para a construção do detetor foi baseada na experiência adquirida para a construção de dois protótipos. As maiores dificuldades encontradas, foram com relação a soldagem dos diversos materiais para a construção dos dois protótipos.

USE OF SELF POWERED NEUTRON DETECTORS IN THE IEA-R1 REACTOR

FELICIA DEL GALLO ROCHA

A B S T R A C T

This work presents a survey of self-powered neutron detectors, SPND, which are used as part of the in-core instrumentation of nuclear reactors.

Measurements with Co and Er SPND's were made in the IEA-R1 reactor for determining the neutron flux distribution and the integral reactor power.

Due to the size of the available detectors, the neutron flux distribution could not be obtained with accuracy. The results obtained in the reactor power measurements demonstrate that the SPND have the linearity and the quick response necessary for a reactor power channel.

This work also presents a proposed design of a SPND using Pt as wire emissor. This proposed design is based in the experience gained in building two prototypes. The greatest difficulties encountered include materials and technology to perform the delicate weldings.

CAPITULO I

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 INTRODUÇÃO

O detetor do tipo "Self-Powered Neutron Detector (SPND)" é um instrumento bastante versátil e de grande aplicação em reatores nucleares de potência e de pesquisa^{/2,3,6,9,13,14,15,24,33/}, tanto para o controle^{/11/}, como também para medidas da distribuição espacial do fluxo de neutrons. Os detetores do tipo SPND são também conhecidos por uma grande variedade de nomes^{/19,30/}, e entre eles, detetores de emissão beta, detetores Hilborn, em reconhecimento ao trabalho desenvolvido por J.W. Hilborn, detetores de emissão de elétrons e também detetores PENA (Primary Emission Neutron Activation).

As primeiras experiências com detetores do tipo SPND datam de 1961^{/15/}, quando um detetor do tipo SPND utilizando como emissor um fio de Ródio, foi construído na União Soviética. A partir desta data, uma grande ênfase tem sido dada para o desenvolvimento de detetores do tipo SPND.

Baseado no detetor construído na União Soviética, J. W. Hilborn^{/15/} em 1964, desenvolveu um detetor de neutrons do tipo SPND, no qual o fio emissor era um fio de Ródio com 31mm de comprimento, diâmetro de 0,51mm, com uma massa de 75,2mg. Esse detetor foi utilizado para a determinação do fluxo de neutrons em uma dada posição do reator NRX em Chalk River, Canadá. Para a montagem do detetor, o fio de Ródio foi soldado ao condutor de um cabo coaxial padrão, do tipo RG 174/U com diâmetro externo de 2,5mm. O dielétrico, isto é, o polietileno (com espessura de 0,51mm) atuava como isolante, e a trança de fios de cobre como revestimento externo. A potência do reator na data do experimento era de 42Mw e o fluxo de neutrons de $9,9 \times 10^{12}$ n/cm².s. A corrente medida foi de $3,8 \times 10^{-8}$ A.

Com o êxito obtido por Hilborn com os detetores do tipo SPND, um grande número de trabalhos teóricos e experimentais tem sido desenvolvidos para melhorar os projetos de construção destes detetores. Também desenvolveu-se a metodologia de cálculo da sensibilidade do detetor por unidade de comprimento, ou seja, da razão da corrente do detetor com o fluxo de neutrons e o comprimento do detetor ($S = I/\Phi.L$)^{/33,36/}, dada em $A/n.cm^{-1}s^{-1}$. Dentre eles destacamos alguns que são mencionados nos próximos parágrafos.

Em 1971, H.D. Warren^{/36/} apresentou um modelo de cálculo para a sensibilidade de vários detetores do tipo SPND usados em reatores nucleares. O modelo leva em conta a taxa de captura de neutrons no material emissor, a probabilidade de escape de elétrons do emissor, e o efeito do material utilizado como isolante na sensibilidade do aparelho. Nesse trabalho, são apresentadas as sensibilidades de detetores com fios emissores de Ródio e Vanádio para neutrons térmicos em função do diâmetro do emissor e da espessura do isolante.

W. Jaschik e W. Seifritz^{/17/} em 1973, propuseram um modelo analítico para o cálculo da sensibilidade dos detetores do tipo SPND de resposta pronta. Esses detetores produzem um sinal de saída imediatamente após a captura de neutrons no material emissor, como é o caso de detetores utilizando fios emissores de Platina, Háfnio ou Érbio. Esse trabalho leva em conta o fator de auto-blindagem de neutrons no emissor (neutron self-shielding factor); a correção na depressão do fluxo de neutrons; a taxa de produção de fotoelétrons e elétrons Compton após a emissão de raios gama de captura; a probabilidade de escape de elétrons no emissor, e o alcance dos elétrons no material isolante que contém um campo elétrico devido a carga espacial.

H.D. Warren e N.H. Shah^{/38/} introduziram melhoramentos no modelo desenvolvido por Jaschik e Seifritz^{/17/}. Nesse modelo, são consideradas as interações no detetor devido aos raios gama externos, com a subsequente emissão de elétrons Compton e fotoelétrons. O modelo também introduz um parâmetro no eletrodo central para levar em conta a variação na distribuição da carga espacial em função do número atômico Z do emissor.

D.S. Hall^{/14/} fez uso de um programa computacional utilizando a técnica de Monte-Carlo, para simular os processos físicos que ocorrem no interior de um detetor do tipo SPND, e consequentemente estimar a resposta deste tipo de detetor quando submetido a um campo de radiação (neutrons e gamas).

N.P. Goldstein^{/12,13/}, também se utiliza de um programa computacional, utilizando a técnica de Monte-Carlo, para estimar a sensibilidade a neutrons térmicos de detetores SPND com fio emissor de Platina, Ródio ou Cobalto. A precisão do método computacional foi verificada através de valores experimentais obtidos para este tipo de detetor. Na tabela 1.1, são apresentados os valores calculados e experimentais para a sensibilidade a neutrons térmicos obtidos para os diversos detetores.

Tabela 1.1 - Sensibilidade a neutrons térmicos para os detetores do tipo SPND de Platina, Cobalto e Ródio.

Emissor	Diâmetro (cm)	Sensibilidade A/n.cm ⁻¹ .s ⁻¹	
		Valor Calculado	Valor Experimental
Pt	0,05	$6,2 \times 10^{-24/12/}$	$9,7 \times 10^{-24/24/}$
Co	0,05	$1,2 \times 10^{-23/12/}$	$1,6 \times 10^{-23/32/}$
Rh	0,0508	$15,1 \times 10^{-22/13/}$	$12,0 \times 10^{-22/36/}$

Com relação aos trabalhos experimentais, é citado o trabalho de R.B. Shields^{/31/}, que realizou vários testes com detetores do tipo SPND utilizando como emissores, fios de Platina.

Testes realizados por H. Boech e M. Suleiman^{/5/} com detetores do tipo SPND, utilizando materiais fisséis como emissor, indicaram que os detetores que utilizam Urânio enriquecido como material emissor, apresentam sensibilidades maiores do que aquelas apresentadas por detetores que utilizam o decaimento radioativo como princípio de funcionamento. Os cálculos e os resultados experimentais obtidos mostraram que a sensibilidade para este tipo de detetor irá depender basicamente do enriquecimento e espessura do Urânio usado como emissor.

C.J. Allan e sua equipe^{/3/} desenvolveram um tipo de arranjo para detectores de neutrons do tipo SPND para serem usados em reatores CANDU. Nesse arranjo, (tubo guia de Zircaloy) foram utilizados vários detectores de Vanádio, Cobalto e Platina. As sensibilidades, por unidade de comprimento, dos diversos detectores foram determinadas irradiando-se os mesmos no reator de testes ZED-2 em CNRL (Chalk River, Canadá). Foi determinado que as sensibilidades dos detectores dependem basicamente do diâmetro do fio emissor, e que as variações observadas nas sensibilidades podem ser ajustadas através de leis de potência. Como exemplo, são apresentadas as sensibilidades de detectores de Platina e Vanádio^{/3/}:

$$S_{\text{Platina}} = 3,73 \times 10^{-25} \cdot D^{1,31} \text{ A.m}^{-1}/(\text{n.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$$

$$S_{\text{Vanádio}} = 2,05 \times 10^{-24} \cdot D^{1,21} \text{ A.m}^{-1}/(\text{n.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$$

onde D é o diâmetro do fio emissor em mm.

P.M. French, J.C. Kroon e R.B. Shields^{/11/} realizaram experiências no reator de ZED-2 (Chalk River), para avaliar o comportamento de detectores do tipo SPND com emissores de Platina, para serem utilizados em sistemas de proteção e controle nos reatores da Companhia Geradora de Eletricidade Ontario Hydro. Aproximadamente 60 detectores do tipo SPND, com fio emissor de Platina, foram distribuídos uniformemente no núcleo do reator para medidas do fluxo neutrônico. Os valores obtidos foram comparados com a medida do fluxo de neutrons através da ativação de folhas de Cobre, colocadas no interior dos elementos combustíveis. Os valores obtidos com os detectores SPND de Platina concordam com os obtidos através da ativação das folhas de Cobre, sendo que os detectores SPND, fornecem um sinal contínuo e proporcional ao fluxo de neutrons ao qual são submetidos.

No trabalho realizado por W. Seifritz e P. Gebureck^{/29/}, os detectores do tipo SPND de resposta pronta, isto é, detectores com fios emissores de Érbio, Platina, são utilizados tanto para medida da distribuição de potência, quanto para medidas de ruído em reatores do tipo BWR. Esses detectores, por apresentarem um tempo de resposta rápida, conseguem medir flutuações do fluxo de neutrons quando o reator se encontra em estado estacionário.

Portanto, a utilização de detetores SPND é de grande importância, pois além de fornecer a distribuição do fluxo de neutrons em várias posições do núcleo do reator, os mesmos fornecem um sinal contínuo e proporcional ao fluxo de neutrons ao qual são submetidos. Estes detetores, por fornecerem um sinal contínuo e proporcional ao fluxo de neutrons, são largamente utilizados para o mapeamento e controle do fluxo de neutrons em reatores nucleares.

A seguir, será apresentado uma revisão sobre os métodos utilizados para a determinação do fluxo de neutrons, nos vários pontos do núcleo de um reator nuclear, com os diversos detetores de neutrons existentes, e entre eles, o detetor SPND.

1.2 MÉTODOS UTILIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE NEUTRONS

Basicamente, existem dois métodos empregados para medidas da distribuição do fluxo de neutrons no interior do núcleo de reatores. O primeiro método, denominado técnica de ativação^{/25/}, consiste em se colocar em diversos pontos do reator, pequenos discos, fios, fitas de metais ou pastilhas de pó comprimido ou sinterizados que, quando expostos a um fluxo de neutrons por um certo período de tempo, sofrem ativação, produzindo radioisótopos que decaem com meia-vida que pode variar entre minutos e anos. Após a irradiação, o material é retirado e a atividade dos radioisótopos formados é determinada utilizando-se um sistema de detecção. A atividade medida é então correlacionada com o fluxo e posteriormente com a distribuição de potência. O segundo método, denominado método direto, consiste em se fazer uma varredura de todo o núcleo com o uso de detetores móveis, que forneçam um sinal proporcional ao fluxo^{/6,18,33/}.

Existem vários tipos de detetores de neutrons que podem ser utilizados nos dois métodos acima mencionados para a determinação do fluxo de neutrons. Normalmente, os detetores usados são os detetores a gás^{/19/}, os detetores de ativação e os detetores auto-energizados ou SPND.

Os detetores a gás e os detetores do tipo "Self-Powered" são detetores de resposta direta, e são colocados no núcleo do

reator através de mecanismos para movimentá-los e posicioná-los, acionados por controle remoto^{/25,33/}. No caso de detectores de ativação, estes são colocados no núcleo do reator antes da irradiação. Esta técnica é muito utilizada em reatores de pesquisas e unidades críticas, onde existe a possibilidade de acesso ao núcleo do reator. A técnica da varredura, é normalmente utilizada em reatores nucleares de potência.

Para serem colocados dentro do reator, tais detectores devem ser resistentes a altas temperaturas, alto fluxo de neutrons, intenso campo de radiação gama e alta pressão. Devem também possuir pequenas dimensões^{/6,19,33/}, para que a perturbação causada pelo detector no fluxo de neutrons seja mínima, e para que não haja problemas com o espaço existente no núcleo dos reatores, pois geralmente o diâmetro dos canais de instrumentação é inferior a 1,0cm.

Quando estes detectores são usados no mapeamento do fluxo neutrônico e no controle da potência de reatores nucleares, é necessário que os mesmos atendam uma série de requisitos. Por exemplo, quando usados no mapeamento do fluxo neutrônico, é necessário que possuam pequenas dimensões para que a perturbação causada no fluxo de neutrons seja a menor possível, e que forneçam informações confiáveis a respeito do fluxo de neutrons. Com relação aos detectores que são usados em sistemas de controle, é necessário que os mesmos forneçam um sinal contínuo e proporcional ao fluxo de neutrons no reator. É necessário também, que possuam um tempo de resposta pequeno, para acusar imediatamente as mudanças ocorridas no fluxo neutrônico, para que assim ações de segurança possam ser tomadas logo a seguir. Os detectores SPND de resposta pronta, usados em reatores nucleares, preenchem esses requisitos necessários. O detector SPND também apresenta um simples princípio de funcionamento, além de apresentar as vantagens de não utilizar fonte de alimentação de tensão, ser de pequeno tamanho e apresentar baixo custo.

Tentou-se, nesse trabalho, projetar um protótipo de um detector SPND, para verificar se o mesmo poderia ser usado tanto no mapeamento do fluxo neutrônico, como também no controle da potência do reator IEA-R1. Na concepção proposta para a construção do detector SPND, o material utilizado como fio emissor é a Platina, o ma

terial isolante, a alumina sinterizada, e o revestimento, o aço inox 304. Dois protótipos foram construídos, mas nenhum dos dois apresentaram resultados satisfatórios.

No capítulo seguinte, será apresentado uma revisão teórica sobre os detetores SPND existentes, e entre eles, aqueles utilizados para a medida da distribuição espacial do fluxo neutrônico e também para o controle de potência em reatores nucleares. Os princípios utilizados para a fabricação destes detetores juntamente com os materiais usados são apresentados no capítulo 3. No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos com dois detetores SPND de resposta pronta, existentes no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/CNEN-SP. Finalmente, no capítulo 5, serão apresentados todos os processos utilizados para a construção dos protótipos e também as possíveis causas do não funcionamento destes protótipos.

CAPÍTULO II

2. DETETORES SPND DE RESPOSTA ATRASADA E PRONTA

2.1 INTRODUÇÃO

Apresenta-se neste capítulo de maneira sucinta, um estudo teórico sobre os diversos detetores auto-energizados existentes, e entre eles, aqueles utilizados no mapeamento do fluxo neutrônico e controle de potência de reatores nucleares.

Na secção 2.2, é apresentado o princípio de funcionamento e todos os mecanismos para a produção de corrente em detetores do tipo SPND. Na secção 2.3, é apresentado um resumo teórico sobre o princípio de funcionamento e características de resposta para os detetores SPND, baseados no decaimento radioativo (beta) ou de resposta atrasada, como também são conhecidos. A seguir, na secção 2.4, apresenta-se de uma maneira sucinta, os processos físicos envolvidos na produção da corrente de detetores SPND de resposta pronta, juntamente com as equações que expressam a emissão de elétrons do material emissor, para um detetor SPND com fio emissor de Cobalto.

2.2 DETETORES DO TIPO "SELF-POWERED NEUTRON DETECTOR" (SPND)

Os detetores do tipo "Self-Powered Neutron Detector" (SPND) ou detetores auto-energizados, vide esquema na figura 2.1, utilizam como princípio de funcionamento a conversão da radiação incidente (neutrons e raios gama) no material chamado emissor, em elétrons energizados. Esses elétrons penetram no isolante sólido e são coletados no revestimento, resultando numa corrente que é diretamente proporcional a intensidade do fluxo da radiação incidente /13,15,17,19,33,38/.

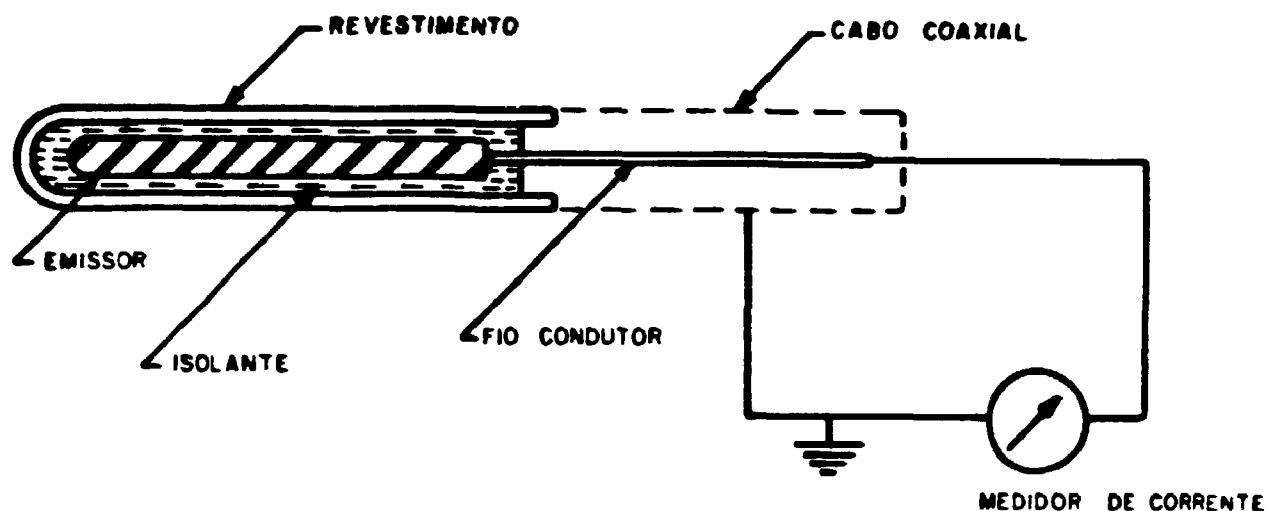


Figura 2.1 - Detetor de nêutrons do tipo SPND^{/32,33,36/}.

Como é mostrado na figura 2.1, um detetor do tipo "Self-Powered" consiste de quatro partes: o emissor, o material isolante, o revestimento ou coletor e o fio condutor. O emissor é um material sensível a radiação, e geralmente é formado por um elemento metálico puro, que emite elétrons energéticos quando submetido a um fluxo de nêutrons e/ou raios gama. O material isolante é um sólido que mantém alta resistência elétrica, mesmo quando exposto continuamente a intensos campos de radiação.

O revestimento e o fio condutor, são materiais condutores que produzem poucos elétrons quando colocados em um fluxo de nêutrons e raios gama, quando comparados com o emissor^{/15,33/}.

Os detetores do tipo SPND podem ser classificados de acordo com os processos físicos, nos quais a radiação incidente é convertida em elétrons energéticos^{/30/} (vide figura 2.2). Os materiais utilizados para a construção de tais detetores, dependem basicamente dos processos físicos que ocorrem nos materiais do detetor^{/147/}.

Os processos físicos que dão origem a elétrons energéticos são^{/1,4,13,14,17,19,23,30,36,38/}:

1. Captura de nêutrons no material emissor seguido do decaimento beta (β^-). Os elétrons energéticos emitidos pelo nuclídeo formado pela ativação do material emissor, são responsáveis pela corrente entre os dois eletrodos, ou seja, emissor e revestimento. Esta interação é chamada

de interação (n, β^-).

2. Captura de neutrons no material emissor acompanhado da emissão de raios gama prontos de captura. Estes raios gama de captura, podem interagir com o material emissor, produzindo elétrons energéticos, através dos efeitos fotoelétrico, Compton e produção de pares. Este tipo de interação, é referida como interação (n, γ, e^-).
3. Interação dos raios gama do reator (raios gama externos ao detector) com os materiais do detector, produzindo elétrons energéticos, através dos efeitos fotoelétrico, Compton e produção de pares. Este tipo de interação, é chamada de interação (γ, e^-). Em reatores nucleares, estes raios gama externos, são resultantes da captura de neutrons no combustível e materiais estruturais do reator, como refletores, barras de controle e também do decaimento dos produtos de fissão e ativação.
4. Interação de neutrons com o emissor através do processo de conversão interna, produzindo elétrons de conversão interna. Esta interação, é denominada interação (n, e_{ic})

Os detectores do tipo SPND que utilizam como princípio de funcionamento, o processo do decaimento radioativo (β^-), são os chamados detectores de resposta atrasada. O tempo de resposta destes detectores é governado pela meia-vida ($T_{1/2}$) do produto formado pela ativação do material emissor ^{14,19,30,36}. Este tipo de interação é o mecanismo dominante para a produção da corrente em detectores, que utilizam Ródio e Vanádio como materiais emissores.

Os detectores que utilizam a interação dos raios gama de captura, resultantes da absorção de neutrons no material emissor, para produzirem elétrons Compton e fotoelétrons, são os chamados detectores de resposta pronta ou rápida. Este tipo de detector produz um sinal de saída imediatamente após a captura de neutrons no material emissor, como é o caso de detectores com emissores de Platina, Cobalto ou Érbio.

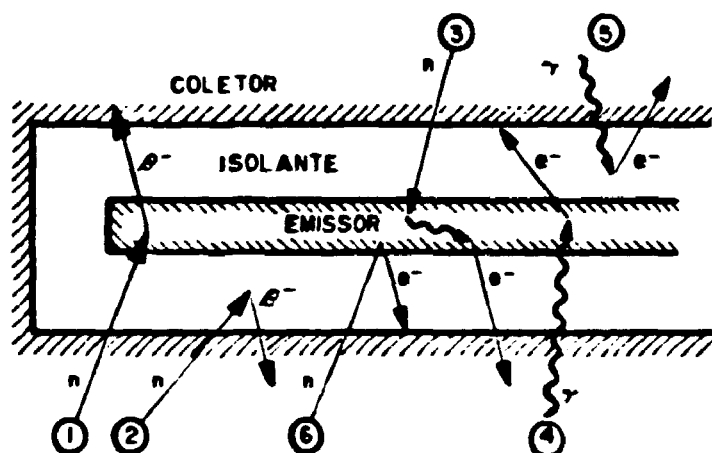


Figura 2.2 - Processos representativos que ocorrem em detectores do tipo SPND^{/19/}. Eventos 1 e 2, decaimento beta devido a captura de neutrons. Evento 3, interação de um raio gama de captura, dando origem a elétrons energéticos. Eventos 4 e 5, interação de raios gama externos, produzindo elétrons energéticos. Evento 6, processo de conversão interna.

2.3 DETETORES DO TIPO SPND BASEADOS NO DECAIMENTO BETA

O princípio de funcionamento dos detectores do tipo SPND baseados no decaimento beta, ou de resposta atrasada é bastante simples. Baseia-se em medir diretamente a corrente gerada pelo decaimento beta, que segue a captura de neutrons no material emissor. Essa corrente é proporcional à taxa de absorção de neutrons no material emissor. Como a corrente produzida se deve ao movimento das partículas beta, não é necessário a aplicação de uma fonte externa de tensão para produzir o sinal de saída, ou seja, o sinal medido é a corrente que vai do material emissor para o revestimento externo do detector.

Na figura 2.3, é mostrado o corte longitudinal de um detector do tipo SPND de resposta atrasada, que utiliza como emissor um fio de Ródio. O material isolante é o óxido de Alumínio (Al_2O_3) e o revestimento metálico ou coletor, é o Inconel, com um diâmetro

externo de 1,57mm. O cabo coaxial possui como fio condutor, o Inconel, como isolante, o óxido de Magnésio (MgO) e o revestimento metálico é de Inconel, com um diâmetro externo de 1,0mm.

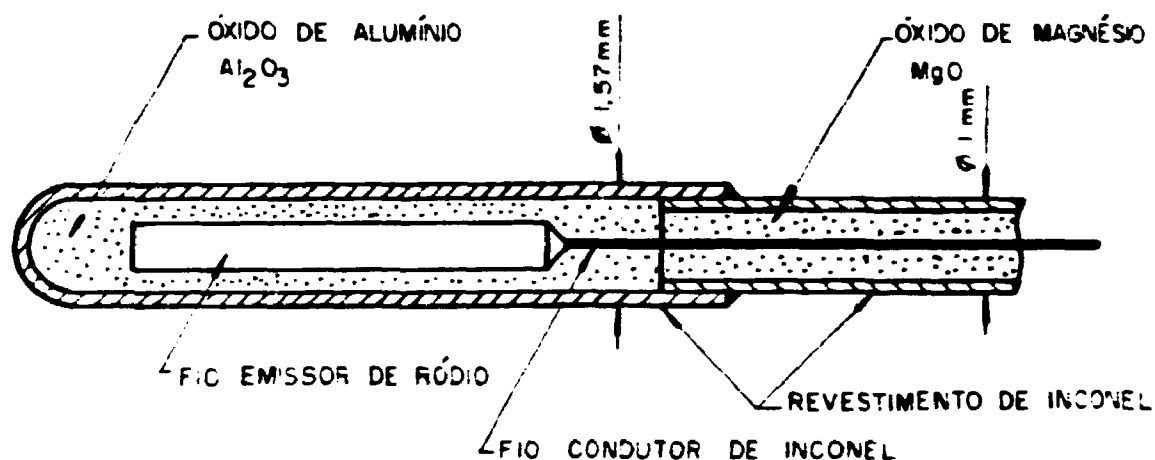


Figura 2.3 - Corte longitudinal de um detector do tipo SPND de resorte atrasada, utilizando fio de Ródio como emissor^{/33/}.

Devido ao princípio de funcionamento dos detectores SPND baseados no decaimento beta, o material emissor deve ter alta seção de choque de ativação para neutrons térmicos. Depois de ativado, o material deve decair por meio de emissão de partículas beta, com energia suficiente para atravessar o material isolante e serem coletadas no revestimento metálico do detector^{/6,15,33,38/}.

O material isolante é um sólido que deve manter alta resistência elétrica na temperatura do núcleo do reator e no ambiente de radiação do reator nuclear. Teoricamente, não deve emitir partículas beta ou elétrons resultantes da ativação por neutrons.

O revestimento metálico e o fio condutor, também devem emitir poucas partículas beta, ou elétrons quando comparados com o material emissor, para que não haja alteração da corrente produzida no material emissor.

A seguir, na seção 2.3.a, são apresentados os mecanismos de

resposta de detetores do tipo SPND baseados no decaimento beta, que utilizam como emissores, fios de Vanádio e Ródio. O primeiro apresenta um esquema de decaimento simples para a produção da partícula beta, enquanto que o segundo apresenta um esquema de decaimento duplo. As diferenças de comportamento são ilustradas a seguir.

2.3.a EQUAÇÕES QUE EXPRESSAM A CORRENTE DE DETETORES SPND DE RESPOSTA ATRASADA.

Quando um detetor do tipo SPND de resposta atrasada é submetido a um fluxo de neutrons, e é aterrado com o revestimento através de um medidor de corrente, algumas das partículas beta produzidas pela ativação do material são coletadas no revestimento, criando uma corrente detetável no medidor, sendo essa corrente proporcional ao escape de partículas beta^{/6,19,33/}. Se o detetor permanece no fluxo de neutrons até que o equilíbrio de emissão beta seja atingido, essa corrente passa a ser proporcional ao fluxo de neutrons incidentes.

Portanto, se o detetor é submetido a um fluxo de neutrons, e o material emissor é constituído por um radionuclídeo com uma única meia-vida ($T_{1/2}$), a corrente do detetor num instante t , levando-se em conta a carga emitida pelo emissor, materiais utilizados e geometria do detetor, é dada por^{/32,33/}:

$$I(t) = K \cdot Q \cdot \sigma_{act} \cdot \phi \cdot N_1(t) \cdot [1 - e^{-\lambda_2 t}] \quad (2.1)$$

onde:

K = constante adimensional determinada pela geometria e materiais utilizados no detetor.

Q = carga emitida pelo emissor por neutron absorvido, em Coulombs.

σ_{act} = secção de choque de ativação do material emissor num instante t , cm^2 .

ϕ = fluxo de neutrons, $n/cm^2 \cdot s$

N_1 = número de átomos do material emissor, \times átomos/cm³.

λ_2 = constante de decaimento do radionuclídeo formado no material emissor, s⁻¹.

Quando o tempo de exposição do detetor é muito maior que a meia vida ($T_{1/2}$) do radionuclídeo formado, isto é, quando o $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\lambda_2 t} = 0$, atinge-se o regime saturação, no qual a corrente passa a ser expressa por^{/33/}:

$$I_{\text{sat}} = K \cdot Q \cdot \sigma_{\text{act}} \cdot \phi \cdot N_1(t) \quad \text{p/ } t \gg \tau_{1/2} \quad (2.2)$$

Portanto, a resposta dinâmica de um detetor do tipo SPND, tendo como princípio de funcionamento o decaimento radioativo, está diretamente relacionada com o esquema de decaimento do radionuclídeo formado pela ativação do material emissor^{/6,15,33,36,38/}. A figura 2.4, mostra o esquema de ativação e decaimento para um detetor do tipo SPND, que usa como material emissor, o Vanádio. Na tabela 2.1, encontram-se as constantes nucleares usadas para o Vanádio.

Toda a absorção de neutrons no material emissor, ${}_{23}\text{V}^{51}$, resulta no aparecimento do ${}_{23}\text{V}^{52}$, que decai por emissão beta para quatro estados excitados do Cromo. Estes quatro estados excitados decaem imediatamente para o estado fundamental do Cromo, através da emissão de raios gama.

Tabela 2.1 - Constantes nucleares utilizadas para o elemento Vanádio^{/21/}.

Constantes Elemento	σ_{act} (barns)	$T_{1/2}$ (s)	λ (s ⁻¹)	ζ (s)
${}_{23}\text{V}^{51}$	4,9	226	$3,07 \times 10^{-3}$	326

Devido ao simples processo de decaimento do radionuclídeo formado pela ativação do material emissor, a resposta de um dete

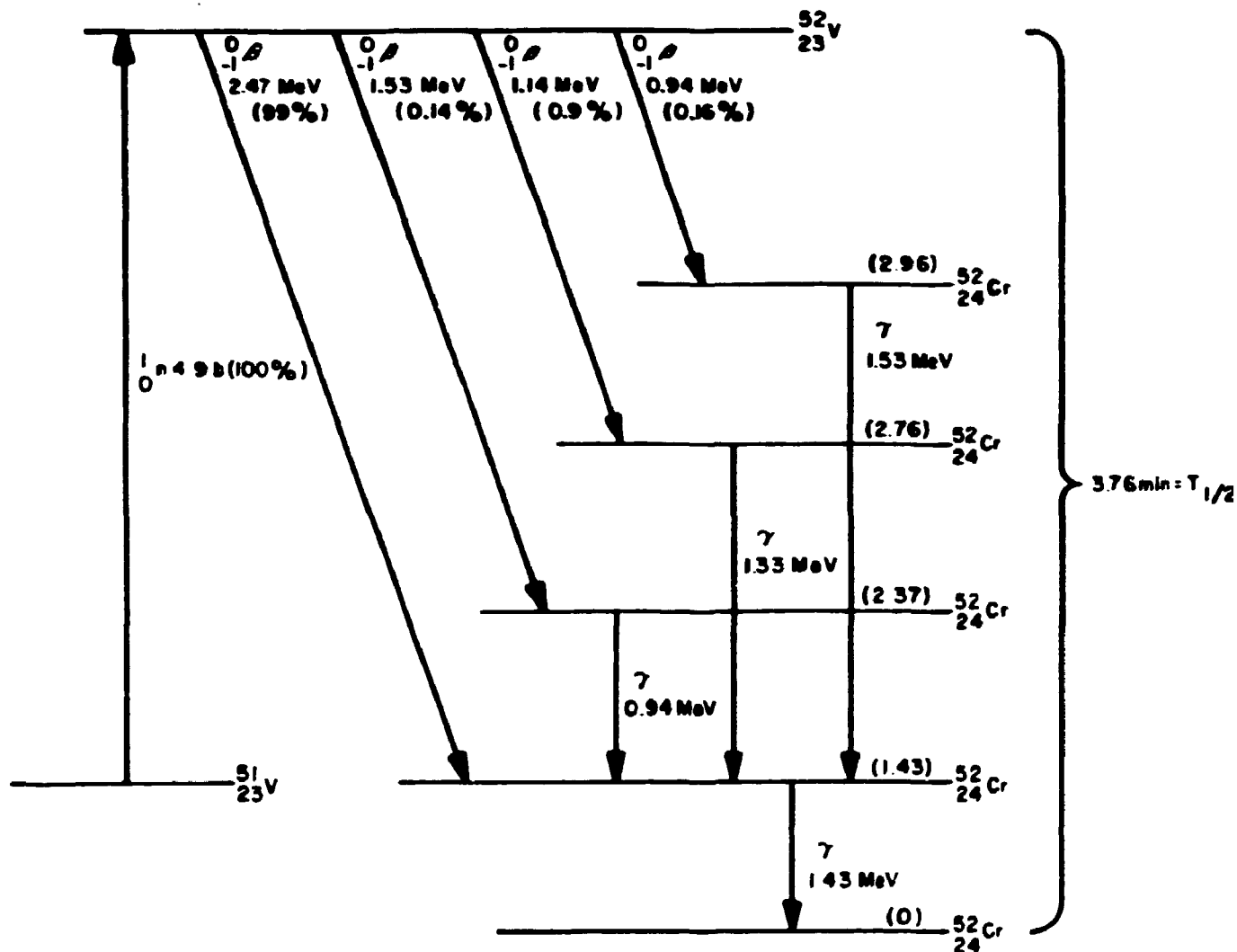


Figura 2.4 - Esquema de decaimento do Vanádio ⁵²V.

tor SPND, que usa como fio emissor o Vanádio, para uma variação em degrau no fluxo de neutrons térmicos, de um valor zero para um valor ϕ , é dada por ^{33/}:

$$I(t) = K \cdot Q \cdot N_1(t) \cdot \sigma_{act} \cdot \phi \cdot (1 - e^{-t/326}) \quad (2.3)$$

chamando

$$I_0 = K \cdot Q \cdot N_1(t) \cdot \sigma_{act} \cdot \phi \quad (2.4)$$

tem-se que:

$$I(t) = I_0 \cdot (1 - e^{-t/326}) \quad (2.5)$$

onde

$I(t)$ = corrente do detetor

I_0 = corrente em regime de saturação ou estacionário

326 é a vida média do $^{23}\text{V}^{52}$ em segundos.

No caso de uma variação no fluxo de neutrons, de um valor c para um valor zero, tem-se que o número de átomos de Vanádio neste instante, é dado por:

$$\frac{dN_V(t)}{dt} = -\lambda N_V(t) \quad (2.6)$$

pois não existe mais a produção, somente o decaimento do radionuclídeo formado, ou seja, $^{23}\text{V}^{52}$. Portanto, a solução da equação (2.6) é dada por:

$$N_V(t) = N_V(0) \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

Mas como a corrente do detetor é de maior interesse, tem-se que:

$$\lambda N_V(t) = \lambda N_V(0) \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.8)$$

ou

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-1/326 t} \quad (2.9)$$

A figura 2.5, ilustra a resposta do detetor de Vanádio em função do tempo, quando submetido as perturbações analisadas.

No caso de um detetor do tipo SPND, que utiliza um fio de Ródio ($^{45}\text{Rh}^{103}$) como material emissor (vide esquema de ativação e decaimento na figura 2.6), a ativação de neutrons pelo $^{45}\text{Rh}^{103}$ cria o radioisótopo $^{45}\text{Rh}^{104}$ em dois estados, um fundamental (92,7%) e outro metaestável (7,3%)^{/21,33/}. Na tabela 2.2, encon

tram-se as constantes nucleares usadas para o ${}_{45}\text{Rh}^{104}$ e ${}_{45}\text{Rh}^{104m}$, respectivamente.

DETETOR SPND DE VANÁDIO

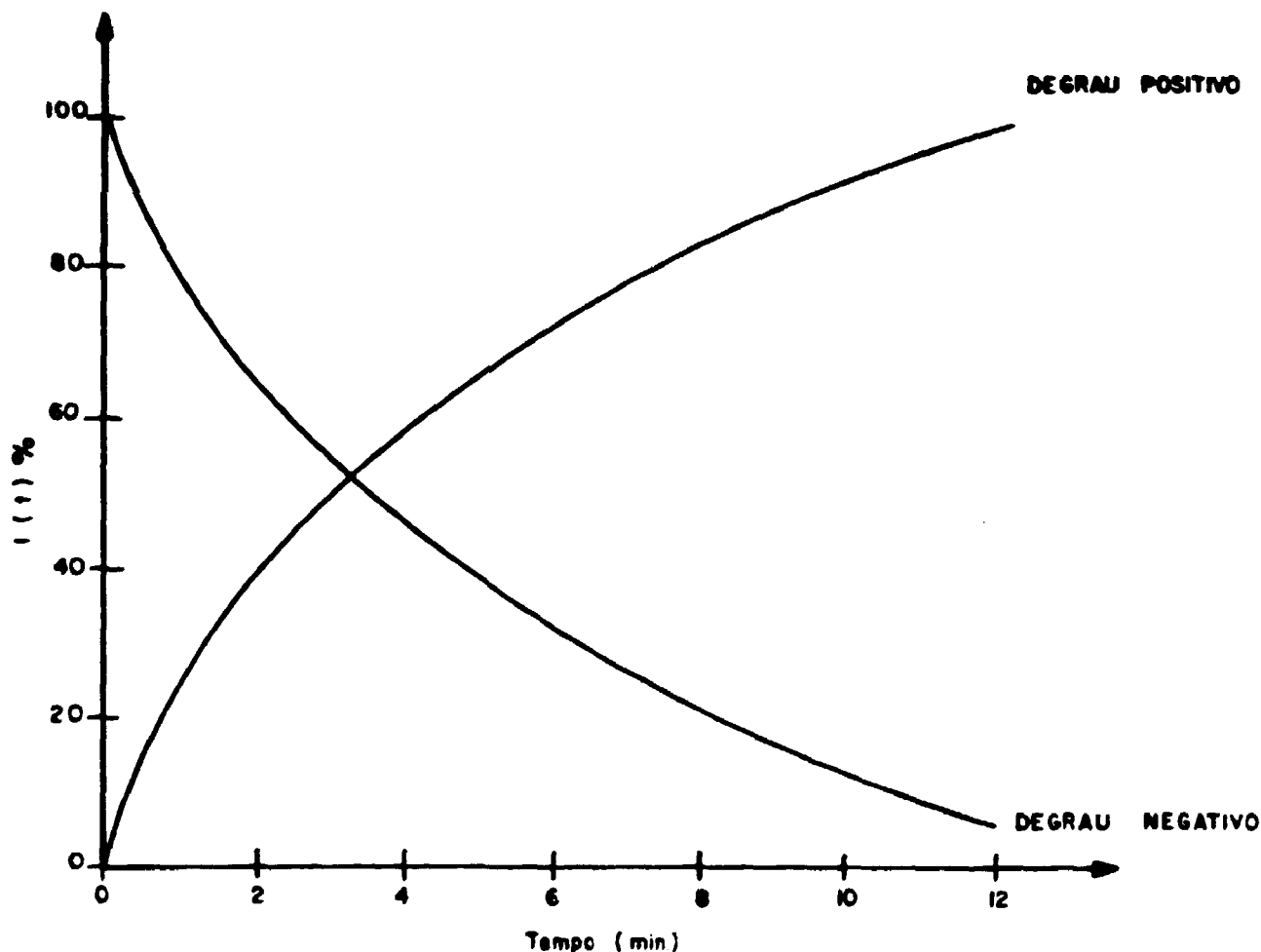


Figura 2.5 - Resposta dinâmica de detectores SPND utilizando como emissor o Vanádio^{/33/}

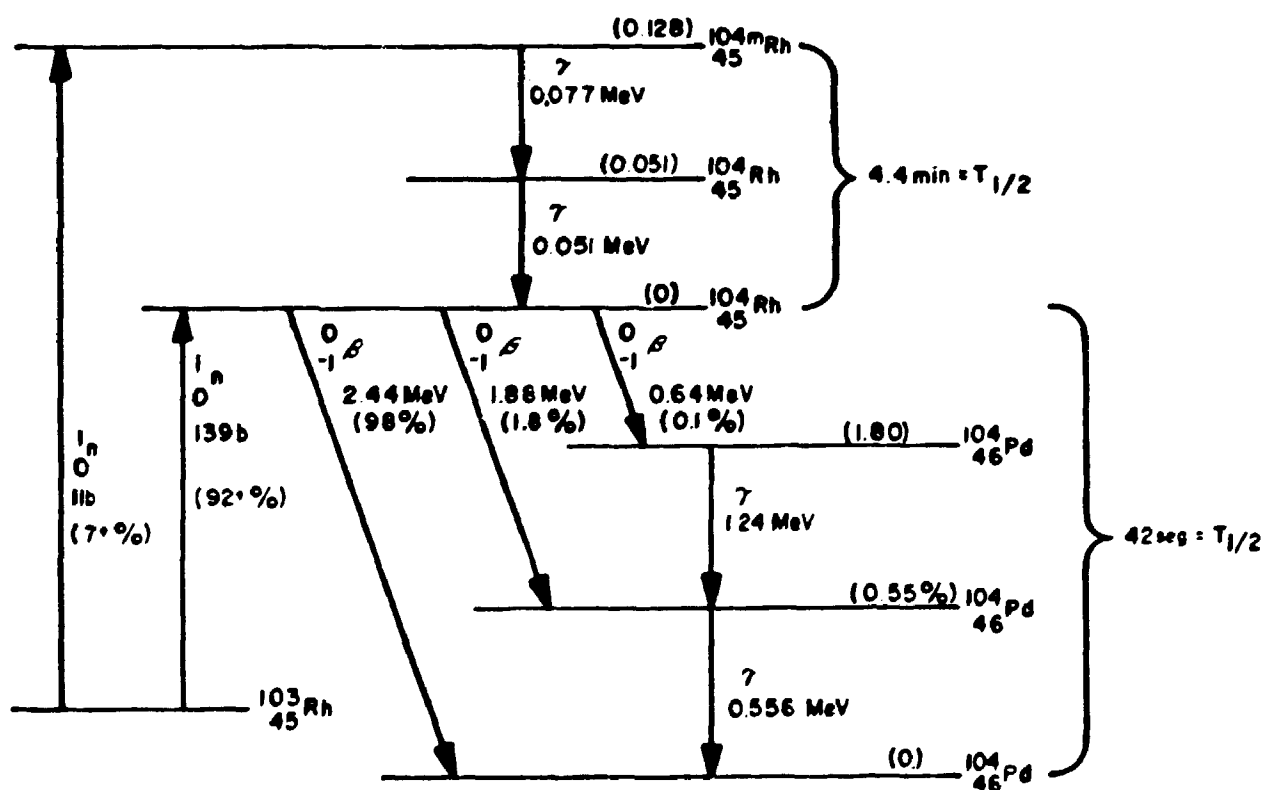
O estado metaestável decai por emissão gama para o estado fundamental, com uma meia-vida característica de 4,4 min (-264s)^{/21/}. O estado fundamental do ${}_{45}\text{Rh}^{104}$ por sua vez, decai por emissão beta para o estado fundamental do ${}_{46}\text{Pd}^{104}$, com uma meia-vida de 42s^{/21/}.

Neste processo final de decaimento beta, 98% das partículas beta emitidas tem uma energia de 2.4MeV^{/21,33/}.

Tabela 2.2 - Constantes Nucleares usadas para o Ródio ¹⁰⁴/₄₅.

Elemento \ Constante	σ_{act} (barns)	$T_{1/2}$ (s)	λ (s^{-1})	ζ (s)
$^{104}_{45}\text{Rh}$	139	42	0,0165	61
$^{104m}_{45}\text{Rh}$	11	264	0,00263	381

Devido a duplicidade de estados do Ródio formado, a resposta de um detetor, que utiliza o Ródio como material emissor, envolve duas exponenciais ^{19,33/}.

Figura 2-6 - Esquema de decaimento do $^{104m}_{45}\text{Rh}$ e $^{104}_{45}\text{Rh}$ ^{19,33/}.

Quando o fluxo de neutrons varia de um valor zero para um valor ϕ , tem-se que:

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\sigma_{act_{A+B}} \cdot \phi \cdot N_1(t) \quad (2.10)$$

$$\frac{dN_A(t)}{dt} = -\lambda_A \cdot N_A(t) + k_A \cdot \sigma_{act_{A+B}} \cdot \phi \cdot N_1(t) \quad (2.11)$$

$$\frac{dN_B(t)}{dt} = -\lambda_B \cdot N_B(t) + \lambda_A \cdot N_A(t) + k_B \cdot \sigma_{act_{A+B}} \cdot \phi \cdot N_1(t) \quad (2.12)$$

onde

$N_1(t)$ = número de átomos do emissor antes de sofrer a ativação.

$N_A(t)$ = número de átomos do radioisótopo ${}_{45}\text{Rh}^{103}$ formado no estado metaestável.

$N_B(t)$ = número de átomos do radioisótopo ${}_{45}\text{Rh}^{103}$ formado no estado fundamental.

k_A e k_B representam as porcentagens dos radioisótopos do ${}_{45}\text{Rh}^{103}$ criados no estado metaestável e fundamental, respectivamente.

O primeiro termo da direita da equação (2.11), representa o decaimento do radioisótopo ${}_{45}\text{Rh}^{104m}$, enquanto que o segundo termo, representa a formação deste radioisótopo. Na equação (2.12), o primeiro termo representa o decaimento do radioisótopo ${}_{45}\text{Rh}^{104}$, enquanto que o segundo e o terceiro representam a formação do radioisótopo em questão.

Assumindo $N_1(t)$ constante e $N_A(0) = 0$ e $N_B(0) = 0$, pode-se resolver as equações (2.11) e (2.12), obtendo-se assim a corrente do detetor, que é dada por:

$$i(t) = i_0 \left\{ 1 - \left[\left(1 - 0,073 \frac{381}{381 - 61} \right) \cdot e^{-t/61} + \left(0,073 \frac{381}{381 - 61} \right) \cdot e^{-t/381} \right] \right\}. \quad (2.13)$$

onde

i_0 é a corrente em estado estacionário ou em regime de saturação, $61 (= 42/0,693)$ e $381 (= 264/0,693)$ são as vidas médias em segundos do ${}^{104}_{45}\text{Rh}$ e ${}^{104m}_{45}\text{Rh}$, respectivamente.

De maneira análoga, quando o fluxo de neutrons varia de um valor ϕ para um valor zero, tem-se que:

$$i(t) = i_0 \left[\left(1 - 0,073 \frac{381}{381 - 61} \right) \cdot e^{-t/61} + \left(0,073 \frac{381}{381 - 61} \right) \cdot e^{-t/381} \right] \quad (2.14)$$

onde

$$i_0 = \sigma_{act} \cdot \phi \cdot N_1(0) \quad (2.15)$$

A resposta do detetor com fio emissor de Ródio, para as perturbações consideradas é mostrada na figura 2.7.

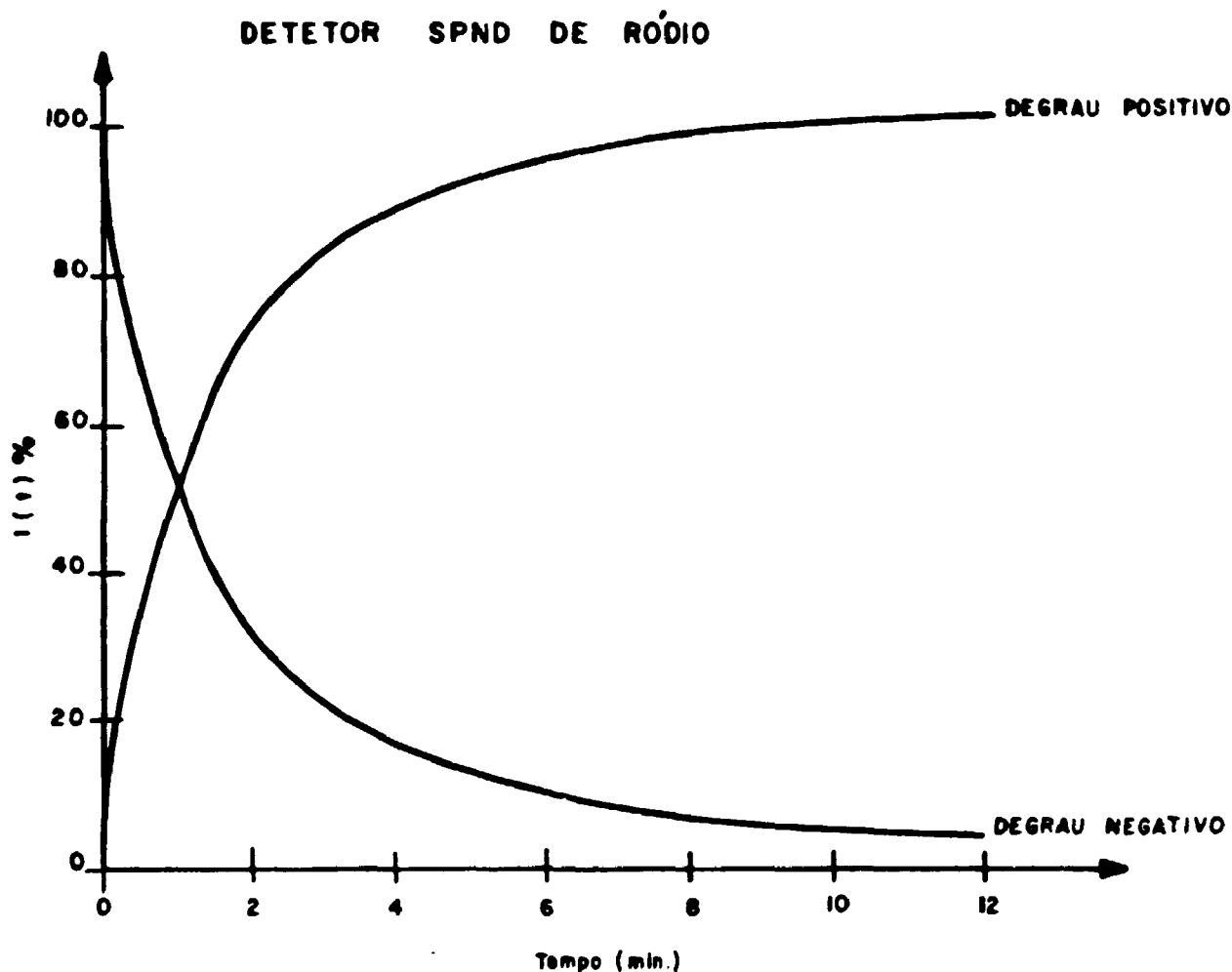


Figura 2.7 - Resposta dinâmica de detetores SPND, utilizando como emissor, o Ródio ¹³³.

2.4 DETETORES DO TIPO SPND DE RESPOSTA PRONTA

Os detetores do tipo SPND de resposta instantânea, apresentam um mecanismo de funcionamento, ligeiramente diferente dos detetores do tipo SPND baseados no decaimento beta ¹³³. Esses detetores apresentam o mesmo tipo de construção, dimensões e formato que os anteriores, sendo diferentes no tipo de material emissor empregado em sua construção. Esses detetores, também chamados de detetores de resposta pronta, utilizam como princípio de funcionamento os elétrons provenientes das interações dos raios gama de captura com o material emissor, ou seja, utilizam como mecanismo dominante para a produção de corrente, a interação (n, γ, e) ^{2,4,6,9,12,13,17,18,19,30,31,38}.

Neste tipo de detetor, a captura de um neutron térmico por um núcleo do fio emissor, faz com que o núcleo fique num estado excitado, cuja energia de excitação é igual a energia de ligação do neutron absorvido. O núcleo excitado irá então, decair para o estado fundamental através da emissão de raios gama, também chamados raios gama de captura^{/1,4,12,13,14,32,38/}. Estes raios gama de captura, que tem origem no fio emissor, tendem a escapar do emissor e outros materiais do detetor. Ao passar através destes materiais, dependendo de suas energias, eles sofrem interações por meio de efeito fotoelétrico, espalhamento Compton ou produção de pares, produzindo assim elétrons energéticos. Estes elétrons, podem atingir o revestimento metálico do detetor, gerando assim a corrente do detetor de resposta pronta.

Portanto, a captura de neutrons no emissor, resulta na emissão de raios gama de captura. A interação destes fótons com os materiais do detetor, resulta na geração de elétrons de recuo com alta energia. Estes elétrons que se originam no emissor e que conseguem atingir o revestimento metálico provocam a corrente do detetor. Conseqüentemente, devido a conversão de raios gama em elétrons no material emissor, este tipo de detetor responde também aos raios gama externos, ou seja, os raios gama provenientes da interação de neutrons com os materiais estruturais do reator, decaimento dos produtos de fissão, etc.. Todos os detetores de resposta pronta são sensitivos tanto a neutrons, como também aos raios gama.

A seguir, na secção 2.4.a, será apresentado o mecanismo de resposta de detetores SPND, que utilizam a interação (n, γ, e) como mecanismo dominante para a produção de corrente do detetor. Serão apresentadas as equações para detetores SPND com fios emissores de Cobalto. As equações para detetores SPND de resposta pronta, que se utilizam de outros tipos de emissores, são semelhantes e podem ser encontradas nas referências^{/4,18,24,36,38/}.

2.4.a EQUAÇÕES QUE EXPRESSAM A CORRENTE DE DETETORES SPND DE RESPOSTA PRONTA.

Os processos de interação que ocorrem em um detector SPND de resposta pronta, citados na secção 2.4, podem ser descritos por equações gerais que expressam a corrente do detector em Amperes.

Na figura 2.8, é mostrado a representação esquemática dos eventos que contribuem para a corrente de um detector SPND de resposta pronta. Neste esquema, a produção de pares não é considerada pois, as contribuições médias de elétrons e pósitrons produzidos por esse processo para a corrente do detector são iguais mas de sinais opostos; portanto, as contribuições se cancelam^{/13,17,38/}.

Para detectores SPND que utilizam como emissor o Cobalto, tem-se que inicialmente a corrente do detector é dominada pela interação (n, γ , e), causada pela captura de neutrons no $^{27}\text{Co}^{59/32/}$. No entanto, o produto de ativação $^{27}\text{Co}^{60}$ ($T_{1/2} = 5.26$ anos)^{/21,32/} emite partículas beta e raios gama que alteram o sinal do detector. Além disso, a captura de neutrons no $^{27}\text{Co}^{60}$, produz um segundo produto de ativação $^{27}\text{Co}^{61}$ ($T_{1/2} = 99$ min) que emite uma partícula beta de 1.20 Mev^{/21,32/}. A corrente atribuída ao $^{27}\text{Co}^{60}$ pode ser considerada constante devido a longa-meia-vida deste nuclídeo, isto é, 5.26 anos^{/21,32/}, mas a corrente atribuída ao $^{27}\text{Co}^{61}$ é proporcional ao fluxo de neutrons. Assim, com a irradiação, a componente (n, γ , e) decresce a medida que o $^{27}\text{Co}^{59}$ é consumido, enquanto a componente atrasada devida ao $^{27}\text{Co}^{60}$ e $^{27}\text{Co}^{61}$ aumenta.

A absorção de neutrons pelo Co^{59} e o subsequente decaimento do Co^{60} é mostrado esquematicamente na figura 2.9. Na figura 2.10, é mostrado a absorção de neutrons no $^{27}\text{Co}^{60}$ e o decaimento do $^{27}\text{Co}^{61}$.

Para um detector SPND que usa como fio emissor o Cobalto, a taxa de variação do número de átomos do $^{27}\text{Co}^{59}$ quando exposto a um fluxo de neutrons, é dada por^{/32/}:

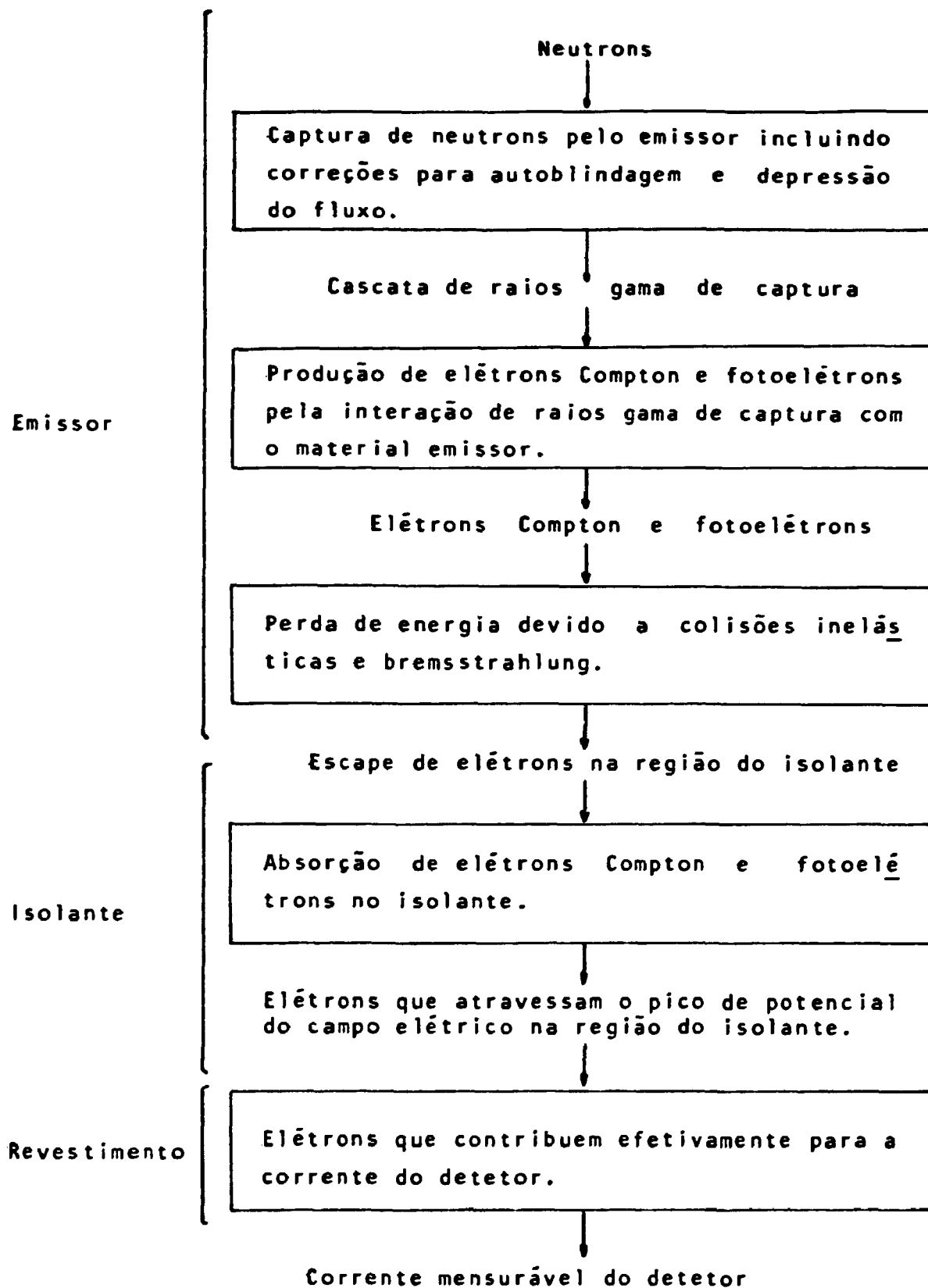


Figura 2.8 - Representação esquemática das sucessivas interações que ocorrem no interior de um detetor SPND de res_{posta pronta}^{/36/}.

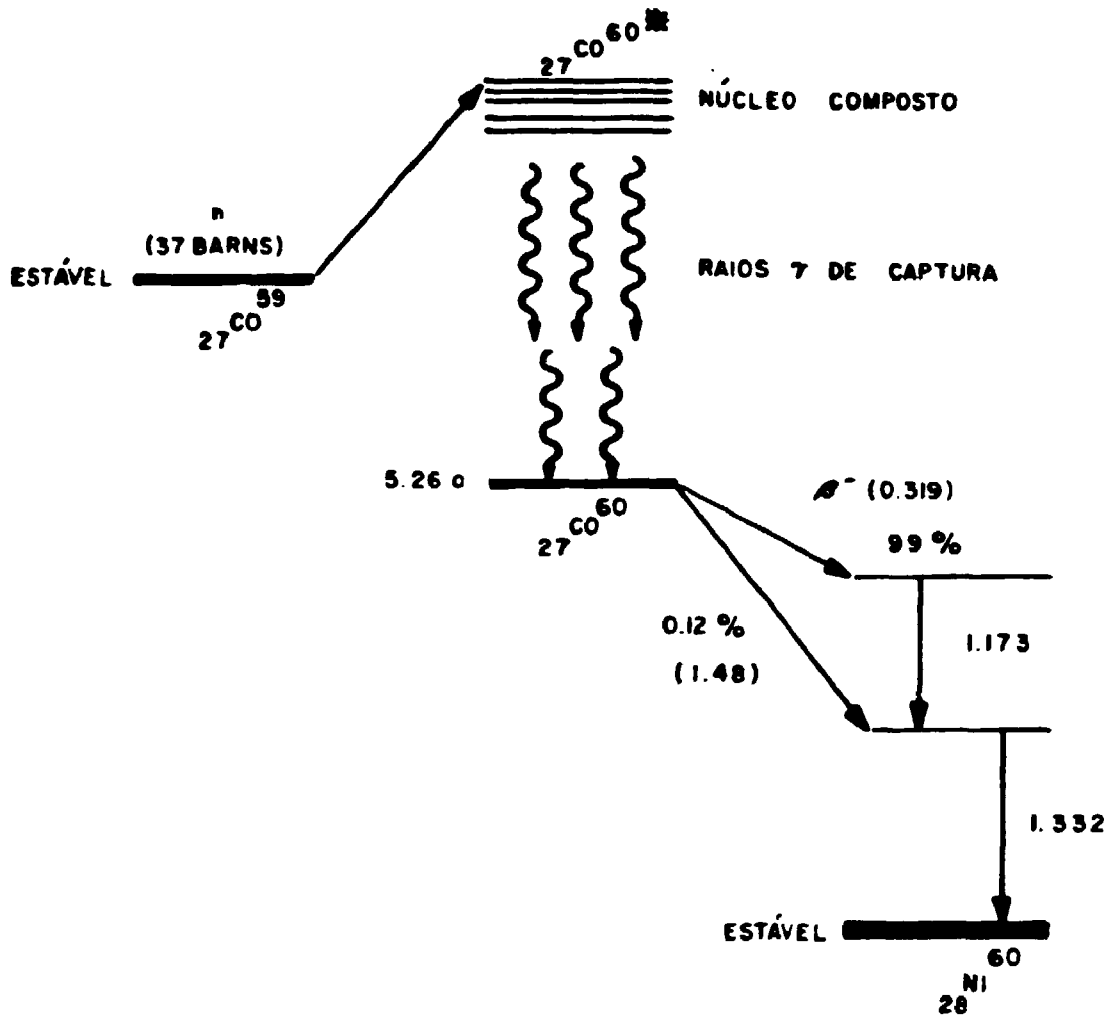


Figura 2.9 - Esquema de decaimento do ${}_{27}^{59}\text{Co}^{32/}$.

$$\frac{dN_{59}}{dt}(t) = -N_{59}(t) \cdot \sigma_{59} \cdot \phi \quad (2.16)$$

onde:

$N_{59}(t)$ = concentração do número de átomos de ${}_{27}^{59}\text{Co}$, num instante t , em \times átomos/cm³

σ_{59} = secção de choque de absorção para neutrons térmicos em cm².

ϕ = fluxo de neutrons em n/cm².s

A solução da equação (2.16), para um fluxo de neutrons constante, é dada por:

$$N_{59}(t) = N_{59}(0) \cdot e^{-\sigma_{59} \cdot \phi \cdot t} \quad (2.17)$$

onde

$N_{59}(0)$ = concentração inicial de átomos de ${}_{27}\text{Co}^{59}$, * átomos/cm³.

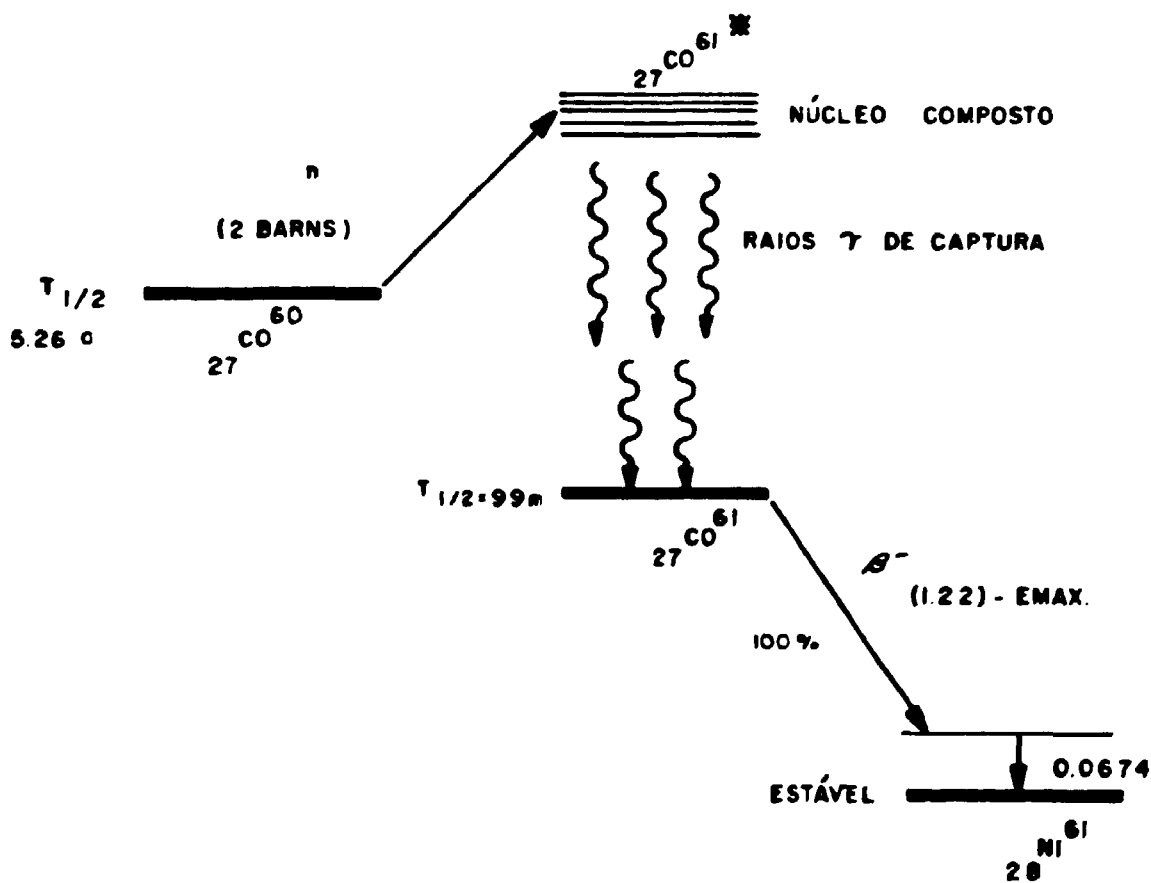


Figura 2.10 - Esquema de decaimento do ${}_{27}\text{Co}^{60/32}$.

A variação do número de átomos do ${}_{27}\text{Co}^{60}$ com o passar do tempo, é dada por:

$$\frac{dN_{60}}{dt}(t) = N_{59}(t) \cdot \sigma_{59} \cdot \phi - \lambda_{60} \cdot N_{60}(t) - N_{60}(t) \cdot \sigma_{60} \cdot \phi \quad (2.18)$$

onde

$N_{60}(t)$ = concentração do número de átomos do ${}_{27}\text{Co}^{60}$, num instante t , em μ átomos/cm³.

λ_{60} = constante de decaimento para o ${}_{27}\text{Co}^{60}$, em s⁻¹.

σ_{60} = secção de choque de absorção, em cm².

O primeiro termo à direita da equação (2.18), representa a produção do ${}_{27}\text{Co}^{60}$ devido a captura de neutrons no ${}_{27}\text{Co}^{60}$, o segundo termo representa a perda devido ao decaimento beta, enquanto que o terceiro, representa a perda devido a captura de neutrons com a formação do ${}_{27}\text{Co}^{61}$.

Resolvendo a equação (2.18) com o auxílio da equação (2.17), obtem-se :

$$N_{60}(t) = N_{60}(0) \cdot e^{-(\lambda_{60} + \sigma_{60} \cdot \phi)t} + \frac{N_{59}(0) \cdot \sigma_{59} \cdot \phi}{\sigma_{59} \cdot \phi - (\lambda_{60} + \sigma_{60} \cdot \phi)} \cdot \left(e^{-(\lambda_{60} + \sigma_{60} \cdot \phi)t} - e^{-\sigma_{59} \cdot \phi \cdot t} \right) \quad (2.19)$$

onde

$N_{60}(0)$ = concentração inicial do número de átomos do ${}_{27}\text{Co}^{60}$, em átomos/cm³.

A concentração do número de átomos de ${}_{27}\text{Co}^{61}$ é dada por:

$$\frac{dN_{61}(t)}{dt} = N_{60}(t) \cdot \sigma_{60} \cdot \phi - \lambda_{61} \cdot N_{61}(t) \quad (2.20)$$

onde

$N_{61}(t)$ = concentração do número de átomos de ${}_{27}\text{Co}^{61}$, num instante t , em $\#$ átomos/cm³.

λ_{61} = constante de decaimento do ${}_{27}\text{Co}^{61}$, em s⁻¹.

O primeiro termo à direita da equação (2.20), representa a produção de ${}_{27}\text{Co}^{61}$, causada pela absorção de neutrons no ${}_{27}\text{Co}^{60}$, e o segundo termo representa a perda devido ao decaimento beta.

Substituindo a equação (2.19) na equação (2.20), a solução para $N_{61}(t)$, é dada por:

$$N_{61}(t) = N_{61}(0) \cdot e^{-\lambda_{61} \cdot t} + R \cdot \left[e^{-\lambda_{61} \cdot t} - e^{-(\lambda_{60} + \sigma_{60} \cdot \phi) \cdot t} \right] +$$

$$+ W \cdot \left[\frac{e^{-\lambda_{61} \cdot t} - e^{-(\lambda_{60} + \sigma_{60} \cdot \phi) \cdot t}}{\lambda_{60} + \sigma_{60} \cdot \phi - \lambda_{61}} - \frac{e^{-\lambda_{61} \cdot t} - e^{-\sigma_{59} \cdot \phi \cdot t}}{\sigma_{59} \cdot \phi - \lambda_{61}} \right]. \quad (2.21)$$

onde

$N_{61}(0)$ = concentração inicial do número de átomos de ${}_{27}\text{Co}^{61}$, em átomos/cm³.

$$R = \frac{N_{60}(0) \cdot \sigma_{60} \cdot \phi}{(\lambda_{60} + \sigma_{60} \cdot \phi - \lambda_{61})} \quad (2.22)$$

e

$$W = \frac{N_{59}(0) \cdot \sigma_{59} \cdot \phi}{\sigma_{59} \cdot \phi - (\lambda_{60} + \sigma_{60} \phi)} \quad (2.23)$$

A corrente de um detetor SPND, que utiliza como emissor o Cobalto, é dada pelas seguintes componentes^{/3,4,32/}:

$$I_{tot} = I_{p,tot} + I_{60} + I_{61} \quad \text{Amp/cm} \quad (2.24)$$

onde

I_{tot} = corrente total do detetor

$I_{p,tot} = I_{\gamma} + I_n$ = componente pronta da corrente do detetor

sendo:

I_{γ} = corrente causada pelo campo de raios γ existentes no núcleo do reator.

I_n = corrente devido a captura de neutrons pelo emissor de ${}_{27}\text{Co}^{59}$.

I_{60} = corrente atribuída ao decaimento β^- do ${}_{27}\text{Co}^{60}$.

I_{61} = corrente atribuída ao decaimento β^- do ${}_{27}\text{Co}^{61}$.

A corrente atribuída aos raios γ externos ao detetor, é dada por^{/4,32/}:

$$I_{\gamma} = S_{\gamma} \cdot \phi \quad (2.25)$$

onde :

S_γ = sensibilidade a raios γ do detector, em Ampere por unidade de fluxo de neutrons.

ϕ = fluxo de neutrons, $n/cm^2 \cdot s$.

A corrente produzida pela absorção de neutrons no $^{59}_{27}\text{Co}$ é dominada pela interação (n, γ, e) , ou seja, após a captura de neutrons no $^{59}_{27}\text{Co}$, ocorre a formação do $^{60}_{27}\text{Co}$, que emite raios γ de captura. Estes raios gama, irão interagir com o material emissor, liberando elétrons Compton e fotoelétrons. A componente da corrente I_n , é dada por^{/32/}:

$$I_n = C_{59} \cdot \phi \cdot \sigma_{59} \cdot N_{59}(t) \quad (2.26)$$

ou

$$I_n = C_{59} \cdot \phi \cdot \sigma_{59} \cdot N_{59}(0) \cdot e^{-\sigma_{59} \cdot \phi \cdot t} \quad (2.27)$$

onde C_{59} é a sensibilidade de captura, em Ampere por unidade de fluxo de neutrons.

2.4.b RESPOSTA DE UM SPND NÃO IRRADIADO EM UM TRANSIENTE DO REATOR

Durante um transiente em um reator, o fluxo de neutrons varia em função do tempo. O detector de resposta pronta deve ter capacidade de gerar um sinal proporcional ao fluxo de neutrons durante o transiente. Nessa secção, veremos esses aspectos para um detector SPND, com fio emissor de Co, ainda não irradiado.

A corrente pronta do detector SPND de Co, é dada por:

$$\begin{aligned} I_{\text{pronta}}(t) &= C_{59} \cdot \sigma_{59} \cdot \phi \cdot N_{59}(t) \\ &= C_{59} \cdot \sigma_{59} \cdot N_{59}(0) \cdot e^{-\sigma_{59} \cdot \phi \cdot t} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Analisando a resposta para transientes da ordem de minutos, e portanto de tempos bem menores que $1/\sigma_{59} \cdot \phi$ (para um fluxo de neutrons de 10^{12} n/cm².s), pode-se considerar que N_{59} não varia. Portanto:

$$I_{\text{pronta}}(t) = C_{59} \cdot \sigma_{59} \cdot \phi \cdot N_{59}(0) \quad (2.29)$$

A corrente atribuída ao decaimento de $^{27}\text{Co}^{60}$ é mista, e contém uma contribuição devido as partículas β^- (com $E_{\text{máx}} = 0,319\text{Mev}$) e aos raios γ de captura emitidos pela absorção de neutrons no $^{27}\text{Co}^{60}$. Como a captura de neutrons pelo $^{27}\text{Co}^{60}$ é desprezível frente a captura de neutrons pelo $^{27}\text{Co}^{59}$, isto é, a secção de choque de absorção do $^{27}\text{Co}^{60}$ é de 2 barns /21,32/, ou seja, 5,4% da secção de choque de absorção do $^{27}\text{Co}^{59}$, a contribuição dos raios γ de captura para a componente pronta da corrente do detetor, pode ser desprezada.

Portanto, a corrente atribuída ao decaimento do $^{27}\text{Co}^{60}$, é devido somente ao decaimento β^- do $^{27}\text{Co}^{60}$, sendo dada por:

$$I_{60} = C_{60} \cdot \lambda_{60} \cdot N_{60}(t) \quad (2.30)$$

onde C_{60} , é uma constante determinada pela geometria do detetor, carga emitida e probabilidade de escape de partículas β^- emitidas pelo emissor.

λ_{60} é a constante de decaimento do $^{27}\text{Co}^{60}$, s⁻¹

mas

$$N_{60}(t) = N_{60}(0) \cdot e^{-\theta_{60} \cdot t} + \frac{N_{59}(0) \cdot \sigma_{59} \cdot \phi \cdot (1 - e^{-\phi_{60} \cdot t})}{\theta_{60}} \quad (2.31)$$

onde

$$\theta_{60} = \sigma_{60} \cdot \phi + \lambda_{60} \quad (2.32)$$

Para fluxos de neutrons da ordem de 10^{12} n/cm².s ,

$\theta_{60} = \lambda_{60}$ e para $t \ll \frac{1}{\lambda_{60}}$, isto é, $1,66 \times 10^8$ s, a componente da corrente atribuída ao decaimento β^- do ${}_{27}\text{Co}^{60}$ é dada aproximadamente por:

$$I_{60} = C_{60} \cdot \lambda_{60} \cdot N_{59} \cdot \sigma_{59} \cdot \phi \cdot t \quad (2.33)$$

onde assumiu-se que $N_{59}(t)$ não varia durante o transiente. De fato, isto ocorre devido a longa meia vida do ${}_{27}\text{Co}^{60}$, aproximadamente 5,2 anos. Seria necessário um tempo de exposição contínuo muito grande, da ordem de 5,2 anos ($T_{1/2}$ do ${}_{27}\text{Co}^{60}$) para que os isótopos de N_{60} entrassem em equilíbrio no emissor.

A corrente atribuída ao ${}_{27}\text{Co}^{61}$ é devido somente as partículas β^- emitidas com uma energia máxima de $1,22\text{Mev}^{21/}$, sendo dada por:

$$I_{61} = C_{61} \cdot \lambda_{61} \cdot N_{61}(t) \quad (2.34)$$

onde C_{61} é uma constante que leva em conta a geometria do detector, densidade do material emissor e probabilidade de escape das partículas β^- .

λ_{61} é a constante de decaimento do ${}_{27}\text{Co}^{61}$, s^{-1}

$N_{61}(t)$ pode ser obtido para tempos bem menores que $1/\lambda_{60}$ como:

$$N_{61}(t) = \sigma_{60} \cdot \sigma_{59} \cdot N_{59} \cdot \phi^2 \cdot t^2 \quad (2.35)$$

e

$$I_{61} = C_{61} \cdot \lambda_{61} \cdot \sigma_{59} \cdot \sigma_{59} \cdot N_{59} \cdot \phi^2 \cdot t^2 \quad (2.36)$$

Portanto a corrente total atrasada do detector, é dada por:

$$I_{\text{atrasada}}(t) = C_{60} \cdot \lambda_{60} \cdot N_{59} \cdot \sigma_{59} \cdot \phi \cdot t + C_{61} \cdot \lambda_{61} \cdot N_{59} \cdot \sigma_{59} \cdot \sigma_{60} \cdot \phi^2 \cdot t^2 \quad (2.37)$$

A corrente total será:

$$I_{\text{tot}} = I_{\text{pronta}} + I_{\text{atrasada}}, \text{ ou}$$

$$I_{\text{tot}} = I_{\text{pronta}} \left(1 + \frac{C_{60} \cdot \lambda_{60} \cdot t}{C_{59}} + \frac{C_{61} \cdot \lambda_{61} \cdot \sigma_{60} \cdot \phi \cdot t^2}{C_{59}} \right)$$

(2.38)

Considerando que $C_{59} = C_{60} = C_{61}$, tem-se que:

$$I_{\text{tot}} = I_{\text{pronta}} (1 + \lambda_{60} \cdot t + \lambda_{61} \cdot \sigma_{60} \cdot \phi \cdot t^2) \quad (2.39)$$

Através da equação (2.39), nota-se que a contribuição da componente atrasada da corrente para detetores SPND, com fio emissor de Co, só será significativa após um longo tempo de operação, pois, λ_{60} é $6,03 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ e $\sigma_{60} \cdot \phi \cdot \lambda_{61}$ é da ordem de 10^{-15} , o que torna suas contribuições desprezíveis no início de irradiação.

Em reatores CANDU, foi observado que depois de 3 anos de operação contínua, os detetores SPND com fios emissores de Cobalto apresentavam o seguinte^{/4,32/}: 57% do sinal total do detetor foi considerado pronto, 19% devido ao decaimento do $^{60}\text{Co}_{27}$ e 23% atribuído ao decaimento do $^{61}\text{Co}_{27}$.

Portanto, durante transientes, as componentes atrasadas não acompanham o fluxo de neutrons. Permanecem no nível que se encontram. Esse fato permite uma fácil utilização desses de tetores durante longos tempos de irradiação. Conhecendo-se o histórico de fluxo ao qual o detetor é submetido dentro do rea tor, pode-se determinar a contribuição das componentes pronta e atrasada à sua corrente. Durante transientes da ordem de minutos, a componente atrasada produz um nível constante de corrente que pode ser subtraída do sinal total do detetor. O resultado dessa diferença é proporcional ao fluxo de neutrons na posição do de tetor.

CAPÍTULO III

3. PRINCÍPIOS DE CONSTRUÇÃO DE DETETORES SPND

3.1 INTRODUÇÃO

Para os detetores que utilizam o decaimento radioativo β^- como princípio de funcionamento, os fatores que devem ser considerados para a seleção do material emissor são: secção de choque de ativação para neutrons térmicos, energia da partícula beta resultante do decaimento e a meia-vida do produto resultante da ativação^{/19/}. A secção de choque não deve ser muito alta, porque irá resultar em uma taxa de queima muito rápida do material emissor, quando exposto a um alto fluxo de neutrons. Emissores com secção de choque de absorção baixa, irão produzir um sinal de saída muito baixo. As partículas beta produzidas devem ter suficiente energia, para que a auto-absorção no material emissor seja evitada e também para que estas partículas possam atravessar o isolante e serem coletadas no revestimento metálico. Com relação a meia-vida ($T_{1/2}$) do produto formado pela ativação do emissor, esta deve ser curta para que o detetor responda rapidamente as mudanças no fluxo de neutrons.

A tabela 3.1, mostra vários materiais que emitem partículas beta quando ativados por neutrons, e que podem ser utilizados como emissores em detetores do tipo SPND.

Baseados nos critérios citados, os materiais que tem sido usados em aplicações comerciais e que apresentam as características mencionadas são o Vanádio ($_{23}\text{V}^{51}$) e o Ródio ($_{45}\text{Rh}^{103}$), sendo que cada um dos outros tem sido rejeitados por apresentar uma ou mais características indesejáveis. Como exemplo, é citado o Manganês ($_{25}\text{Mn}^{55}$) que apresenta uma meia-vida ($T_{1/2}$) de 2.576 horas^{/21,33/}, resultando em um tempo de resposta muito longo para um detetor^{/6,19,33/}.

Tabela 3.1 - Possíveis elementos a serem usados como emissores em detetores SPND baseado no decaimento radioativo, juntamente com suas propriedades^{/21,33,36/}.

Elementos Emissores	Abundância isotópica (%)	Secção de choque de ativação (barns)	Meia vida ($T_{1/2}$)	Energia máxima da partícula beta emitida (MeV)
$_{13}\text{Al}^{27}$	100	0,235	2,31 min	2,85
$_{23}\text{V}^{51}$	99,75	4,9	3,75 min	2,47
$_{25}\text{Mn}^{55}$	100	13,3	2,576 hrs	2,85
$_{45}\text{Rh}^{103}$	100	139 (Rh^{104}) 11 (Rh^{104m})	42 seg 4,4 min	2,44
$_{47}\text{Ag}^{107}$	51,35	35	2,42 min	1,64
$_{47}\text{Ag}^{109}$	48,65	89 (Ag^{110}) 3 (Ag^{110m})	24,4 seg	2,87
$_{49}\text{In}^{115}$	95,77	45 (In^{116}) 154 (In^{116m})	13,4 seg 54 min	3,3 1,0

Para os detetores do tipo SPND de resposta pronta, os requisitos que devem ser considerados na seleção do material emissor incluem: secção de choque de absorção relativamente alta, pelas mesmas razões citadas anteriormente; resposta tanto a neutrons quanto a raios gama, devido ao seu princípio de funcionamento^{/19/}. Teoricamente, o material emissor não deve produzir nenhum produto que emita partículas beta, para não haver deterioração do sinal de saída do detetor com o passar do tempo de irradiação^{/1,32/}, isto é, para que a componente pronta do sinal do detetor não se altere com o tempo, devido a contribuição atrasada da componente β^- .

Na tabela 3.2, encontram-se os materiais possíveis de serem utilizados como fio emissor em detetores auto energizados de resposta pronta.

No caso desses detetores de resposta pronta, os materiais que tem sido usados como emissor em aplicações comerciais são a Platina e o Cobalto^{/1,11,29,32/}. Os outros materiais não tem sido utilizados por apresentarem características indesejáveis. O Cério, por exemplo, apresenta uma alta taxa de resposta devido aos raios gama^{/31/}, mas este metal é difícil de se obter e de se trabalhar.

3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DE UM DETETOR SPND

O detetor SPND, devido a concepção diferente de funcionamento em relação a outros detetores, apresentam características próprias. A seguir, são discutidas as principais características construtivas de cada componente de um detetor SPND.

3.2.a CARACTERÍSTICAS DOS EMISSORES

Geralmente, os detetores do tipo SPND utilizam emissores com diâmetros que podem variar entre 0,5 a 2,0mm e comprimentos que variam entre 30 e 3000mm^{/6,11,17,19,24,29,31,33,36,387/}, sendo que o diâmetro e o comprimento do fio emissor é limitado por considerações práticas.

Tabela 3.2 - Possíveis materiais a serem utilizados como emissores em detetores SPND de resposta pronta e suas propriedades /21,24,31/.

Elementos Emissores	Abundância isotópica (%)	Secção de choque de captura (barns)	T 1/2 do produto formado
$^{59}_{27}\text{Co}$	100	19 (Co^{60}) 18 (Co^{60m}) 2 (Co^{61})	5,26 anos 10,47 min 99 min
$^{114}_{48}\text{Cd}$	28,86	1,1 (Cd^{115}) 0,14 (Cd^{115m})	53,5 horas 43,0 dias
$^{140}_{58}\text{Ce}$	88,48	0,6	32,5 dias
$^{168}_{68}\text{Er}$	27,07	2	9,6 dias
$^{170}_{68}\text{Er}$	14,88	9	7,52 horas
$^{181}_{73}\text{Ta}$	99,98	21 (Ta^{182}) 0,07 (Ta^{182m})	151,1 dias 16,5 dias
$^{190}_{76}\text{Os}$	26,4	3,9 (Os^{191}) 8,6 (Os^{191m})	15 dias 13 horas
$^{192}_{76}\text{Os}$	41	1,6	31,5 horas
$^{196}_{78}\text{Pt}$	25,2	0,9 (Pt^{197}) 0,05 (Pt^{197m})	18 horas 78 min
$^{198}_{78}\text{Pt}$	7,19	4 (Pt^{199}) 0,03 (Pt^{199m})	31 min 14,1 seg

3.2.b CARACTERÍSTICAS DO ISOLANTE

Como os detetores do tipo SPND são dispositivos com alta impedância de entrada, para que a corrente medida não seja afetada por ruídos externos, os materiais utilizados como isolante devem ter alta resistividade elétrica e boa estabilidade quando expostos a um alto campo de radiação^{/33/}. O material isolante não deve emitir partículas beta ou elétrons resultantes da interação com neutrons ou raios gama, para não interferir no sinal de saída^{/15,19,33/}.

Os materiais que podem ser usados como isolante, em detetores do tipo SPND, são o polietileno, o teflon, o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o óxido de Magnésio (MgO)^{/6,15,22,33/}. Os materiais mais utilizados são o óxido de alumínio e o óxido de Magnésio. Estes materiais apresentam baixo custo, alta resistividade e baixo potencial de ruído^{/7,22,30/}. Quanto aos outros materiais citados, não existem dados disponíveis sobre seus desempenhos quando são usados em detetores SPND.

O isolante é construído geralmente na forma de um tubo fino, com espessura de parede entre 0,25 e 0,5 mm. Esta espessura é, entre outras coisas, função da sensibilidade desejada e da tecnologia de fabricação.

3.2.c CARACTERÍSTICAS DO REVESTIMENTO

Para materiais de revestimento, os que tem sido comumente usados são, o aço inox 304 e o Inconel 600 (liga de 76,5% de Níquel, 15,5% de Cromo e 8% de Ferro)^{/1/}. Eles são compatíveis com os materiais estruturais do núcleo do reator, apresentam uma baixa seção de choque de absorção para neutrons térmicos e boa estabilidade em alto campo de radiação^{/6,15,19,30,33,38/}. O aço inox apresenta uma desvantagem em relação ao Inconel, ou seja, ele apresenta uma porcentagem de 2% de Manganês^{/30,33/}, que quando ativado, emite partículas beta, contribuindo assim com sinais espúrios. O Inconel, além de apresentar todas as características citadas anteriormente, também apresenta uma excelente resistência à corrosão e suporta altas temperaturas.

Nos detetores do tipo SPND, o diâmetro externo do revestimento varia de 1,5 a 4,0 mm e geralmente a espessura da parede, de 0,25 a 0,5 mm /6,15,18,19,22,33,36,38/.

3.2.d CARACTERÍSTICAS DOS CABOS CONECTORES

Os cabos utilizados para a transmissão do sinal proveniente do detetor, são cabos coaxiais com isolamento mineral. Geralmente o isolante é o óxido de Magnésio, o fio condutor, é o Inconel e o revestimento, o aço inox 304 ou Inconel (6,19,22,33/). O diâmetro externo varia de 1,0 a 1,5 mm. Este tipo de cabo é utilizado por apresentar alta isolamento e boa resistência à radiação.

3.3 TIPOS DE CONSTRUÇÃO DE DETETORES SPND

Existem dois tipos básicos de construção de detetores SPND, diferentes principalmente na parte do material isolante. A figura 3.1, mostra o tipo de construção comumente utilizada para um detetor SPND. Num dos processos de construção, o material sensível a neutrons é soldado no fio condutor antes do isolante ser instalado. O material isolante é colocado em volta do emissor e do fio condutor, que são colocados dentro do revestimento metálico. O conjunto final é, então, comprimido até que o diâmetro externo do revestimento seja da ordem de 2 mm /33/.

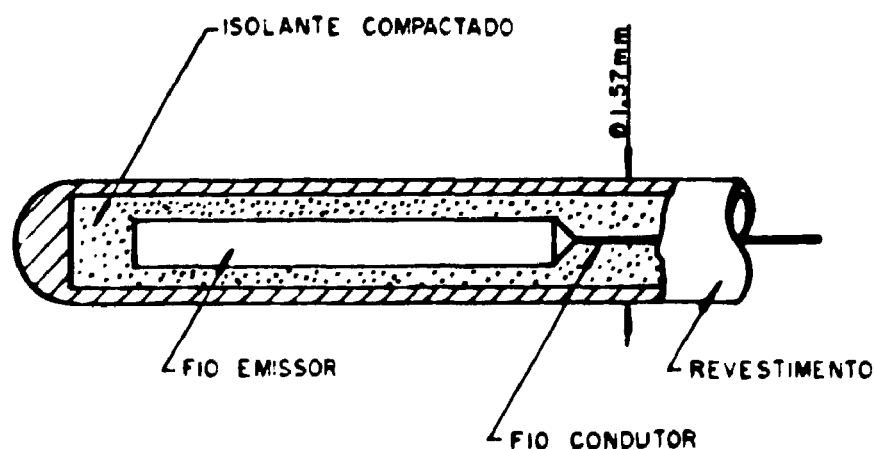


Figura 3.1 - Detetor de neutrons do tipo SPND com isolante compactado /33/.

A figura 3.2 mostra um detetor construído através de um outro processo. Neste caso, a isolação entre o fio emissor e o revestimento é feita por um tubo fino de óxido, geralmente óxido de alumínio (alumina), nuclearmente puro. Qualquer espaço restante é preenchido com pó de óxido de magnésio, após o conjunto todo ter sido soldado ao cabo com isolação mineral. Todos os materiais de construção do detetor, passam por um processo de pré-aquecimento que chega a atingir 1000°C ^{/22/} antes de se fornecer o conjunto final, sendo que o aquecimento das partes metálicas é feito a vácuo e os materiais cerâmicos, a ar.

O fio emissor é ligado ao fio condutor do cabo coaxial, através de solda a ponto, que é um processo que requer uma compressão mútua entre as partes a unir, acompanhada ou não de fusão parcial localizada, sendo apropriada para a soldagem de peças de pequenas dimensões.

O revestimento externo do detetor é soldado ao revestimento do cabo com isolação mineral para formar um conjunto contínuo. O conjunto final deve apresentar uma resistência de isolação entre o condutor central e o revestimento da ordem de 10^{12} ohms^{/22/}.

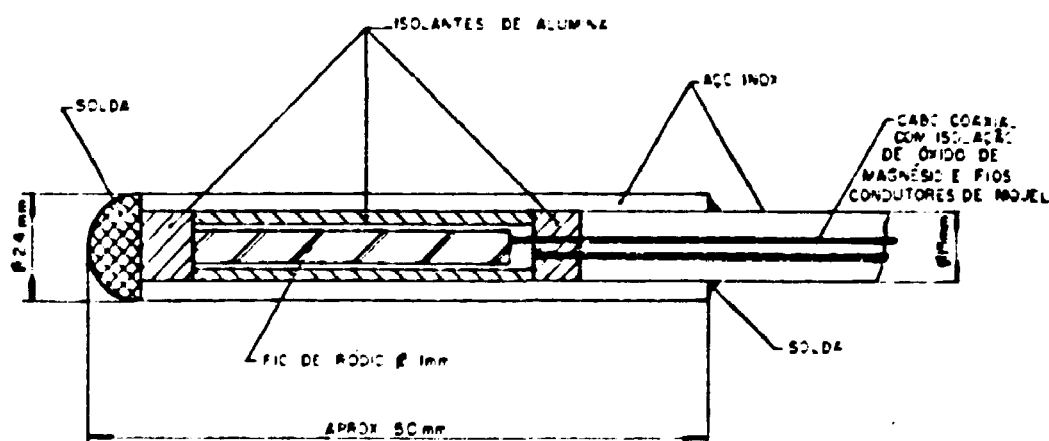


Figura 3.2 - Detetor de neutrons do tipo SPND, utilizando um tubo de alumina como isolante^{/22/}.

CAPÍTULO IV

4. MEDIDAS NO REATOR IEA-R1

4.1 INTRODUÇÃO

Os objetivos das medidas realizadas com os detetores SPND no reator IEA-R1 foram, além de se observar o comportamento desses detetores em resposta a variação de potência do reator, a verificação da sua possível utilização num canal de instrumentação do reator IEA-R1 para monitoração do nível de potência e o levantamento da distribuição axial do fluxo de neutrons térmicos do reator IEA-R1.

A monitoração do nível de potência é imprescindível para se operar um reator. O conhecimento da distribuição do fluxo de neutrons em um reator nuclear é de extrema importância, tanto para a interpretação de resultados experimentais, quanto para a operação correta do reator.

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com dois detetores do tipo SPND de resposta pronta, com fios emissores de Érbio e Cobalto, utilizados na monitoração do nível de potência e no mapeamento do fluxo neutrônico do reator IEA-R1.

Para a utilização de detetores SPND como monitores do nível de potência, é necessário que estes forneçam informações contínuas sobre as variações ocorridas no fluxo de neutrons, quer durante a operação normal do reator, quer durante transientes. Portanto, o sinal de saída dos detetores deve ser proporcional ao fluxo de neutrons, e o tempo de resposta de tais detetores deve ser pequeno para que possam acusar imediatamente as mudanças ocorridas no fluxo de neutrons.

Para verificar se os detetores SPND atendem aos requisitos acima mencionados, vários testes foram feitos no que diz respeito a linearidade do sinal do detetor em função da potência do reator

e também, com relação a resposta dinâmica dos detetores. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados da câmara de ionização compensada do canal linear do reator IEA-R1.

Para que os detetores possam ser usados para o levantamento do perfil do fluxo de neutrons, é necessário que atendam uma série de requisitos: é necessário que forneçam informações confiáveis a respeito do fluxo de neutrons; que apresentem pequenas dimensões para que possam ser inseridos dentro do núcleo do reator e que a perturbação causada pela presença do detetor no fluxo de neutrons não seja significativa.

Os resultados de mapeamento de fluxo obtidos com dois SPND's foram comparados com os resultados obtidos com uma câmara miniatura de fissão WL-23292. Essa câmara é normalmente utilizada para o levantamento do perfil do fluxo de neutrons térmicos do reator IEA-R1.

Como as medidas foram feitas visando a aplicação dos detetores SPND no reator IEA-R1, é apresentado na secção 4.2, uma descrição sucinta do mesmo. Na secção 4.3, é apresentado uma descrição dos detetores SPND utilizados, de todo o procedimento experimental para a verificação da possível utilização desses detetores como um canal de potência e análise dos resultados. Na secção 4.4, é apresentado todo o procedimento experimental para a obtenção da distribuição axial do fluxo neutrônico do reator IEA-R1 com os detetores SPND e com a câmara miniatura de fissão WL 23292 juntamente com a análise dos resultados. Finalmente na secção 4.5, as conclusões são resumidas.

4.2 DESCRIÇÃO DO REATOR IEA-R1^{/28/}

O reator IEA-R1 é um reator de pesquisas do tipo piscina aberta e sua potência nominal de operação é de 2Mw. O ciclo de funcionamento é de 5 dias/semana, 8 horas/dia. O elemento combustível do reator IEA-R1 é do tipo MTR (Material Testing Reactor), e é composto de 18 placas planas paralelas. As placas são fabricadas em forma de sanduíche, tendo na região central, uma liga de Urânio-Alumínio de espessura 0,51mm possuindo 45% em peso de Urâ

nio enriquecido a 93% ou 19,5% em U-235. A figura 4.1 mostra um elemento combustível do reator IEA-R1.

O núcleo do reator IEA-R1 consiste em um arranjo cúbico de elementos combustíveis e blocos de grafita (refletores) revestidos por alumínio, posicionados numa placa matriz retangular. As dimensões da parte ativa do núcleo são de 60 x 40 x 38cm.

Além dos elementos de combustível e dos elementos refletores, existem os elementos de irradiação que são utilizados na produção de radioisótopos. A placa matriz é sustentada por uma estrutura de Alumínio, e contém 8 x 10 furos, dentro dos quais os elementos combustíveis, refletores e de irradiação podem ser encaixados para formar os diversos arranjos críticos possíveis. Na figura 4.2, é mostrado o arranjo crítico do reator IEA-R1 durante a realização deste trabalho, que corresponde a configuração nº 150. Na figura 4.3, apresenta-se esquematicamente o núcleo do reator IEA-R1, juntamente com o esboço da estrutura de sustentação e de mais dispositivos.

Para a remoção da energia térmica gerada no núcleo do reator pelas fissões nucleares nos elementos combustíveis, utiliza-se a circulação forçada da água da piscina, que também atua como moderador.

O controle do reator é feito através de três barras de segurança ($B_4C + Cd$ revestidos de alumínio) e uma barra de controle ($B_4C + Cd$ revestido de aço inoxidável). O controle do reator é feito ajustando-se automaticamente ou manualmente, o fluxo de neutrons a um nível que corresponde à potência desejada.

As principais informações para que o operador possa ligar o reator, levá-lo ao nível de potência desejado e mantê-lo funcionando nesse nível manual ou automaticamente, são fornecidos pelos canais de medidas nucleares. Esses canais, garantem também o início automático de uma ação de segurança, quando uma situação irregular é detetada.

Os canais que fornecem o nível do fluxo de neutrons para a operação do reator são:

- a) canal de partida;
- b) canal linear;
- c) canal logarítmico e de período.

A parte de instrumentação nuclear destinada a segurança é composta por três canais:

- a) canal de segurança nº 1;
- b) canal de segurança nº 2;
- c) canal logarítmico e de período.

O canal logarítmico e de período tem função dupla, isto é, operacional e de segurança.

Além dos canais de medidas nucleares, existem os canais de medidas auxiliares, que são utilizados para medida de temperatura, medida de vazão, medida de posição das barras de controle e de segurança, etc.

4.3 UTILIZAÇÃO DOS DETETORES SPND COMO UM CANAL DE POTÊNCIA DO REATOR IEA-R1.

O principal objetivo das medidas realizadas com os detetores SPND de Érbio e Cobalto, foi verificar a possível utilização dos mesmos como um canal de potência do reator IEA-R1.

Para verificar se os detetores SPND atendem aos requisitos necessários para que possam ser usados como um canal de potência, vários testes foram feitos no que diz respeito a linearidade e resposta dinâmica dos detetores. A linearidade dos detetores SPND foi verificada, medindo-se a variação do sinal dos detetores SPND em função da potência do reator. A resposta dinâmica dos detetores foi verificada, medindo-se o sinal do decaimento dos detetores seguido do desligamento do reator (SCRAM), diminuindo assim a potência que estava em 2Mw para aproximadamente 200kw. Também, para verificar a resposta dinâmica dos detetores, fez-se inserções e retiradas rápidas dos detetores do núcleo do reator, fazendo com que eles sentissem a mudança na intensidade do fluxo de neutrons bruscamente.

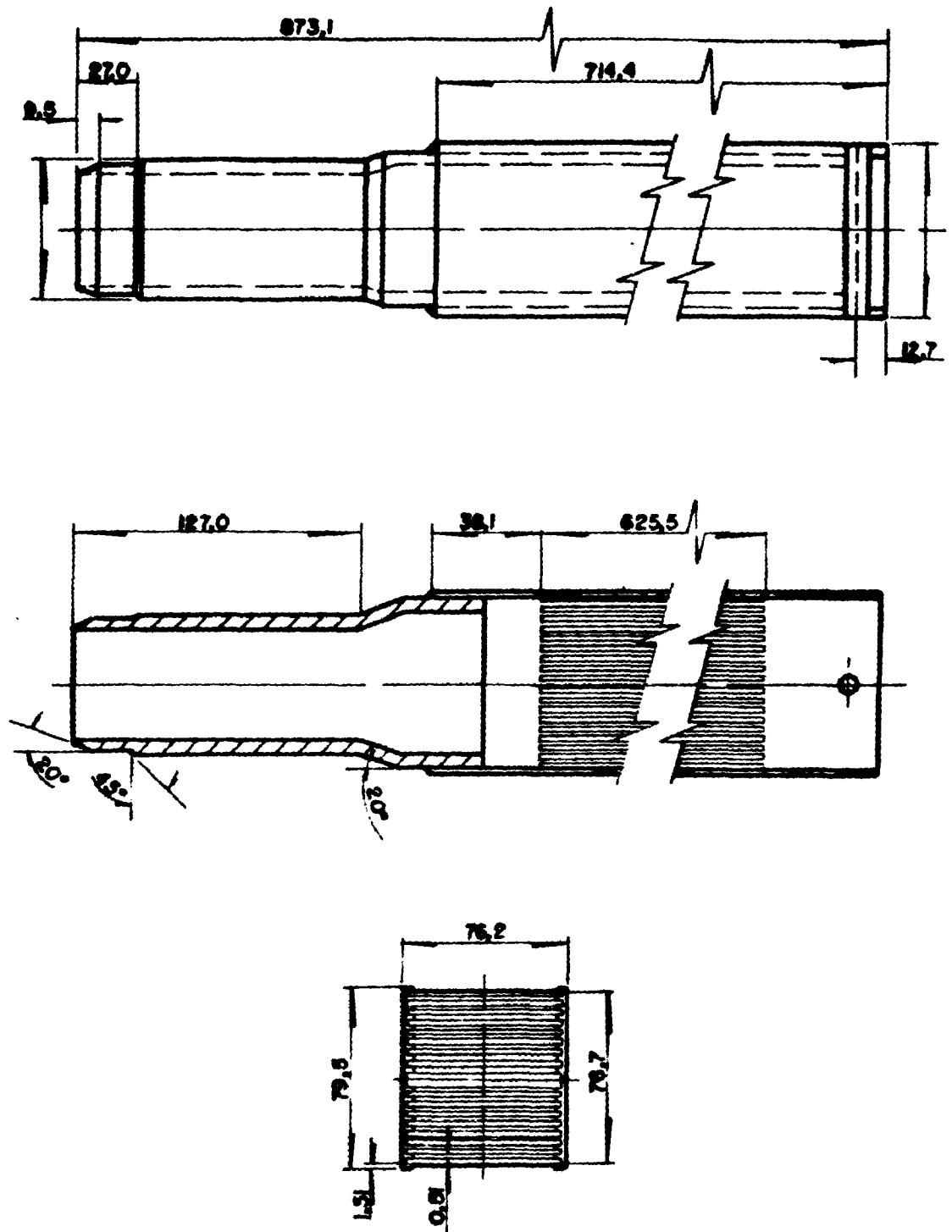
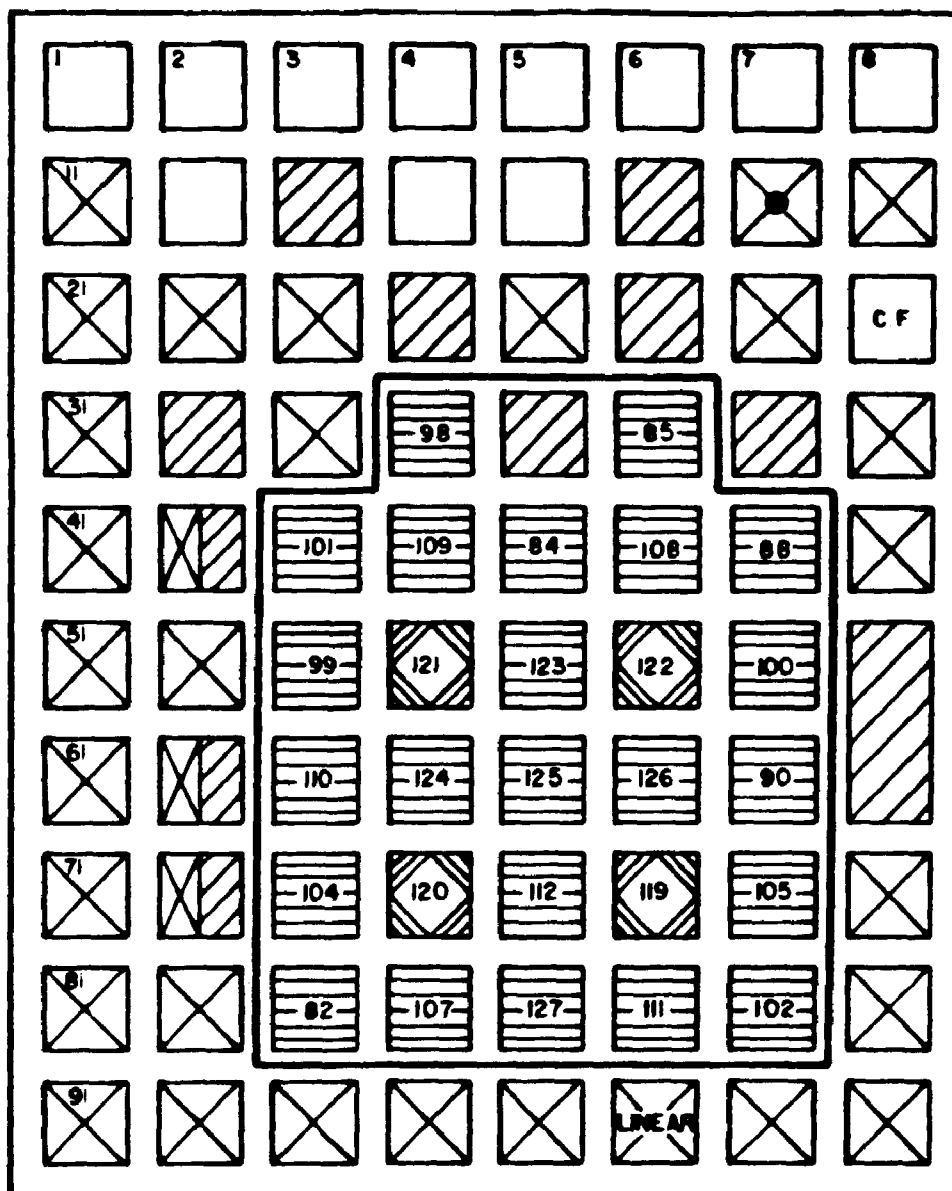


Figura 4.1. Elemento Combustível (dimensões em mm)

PLACA MATRIZ



LEGENDA

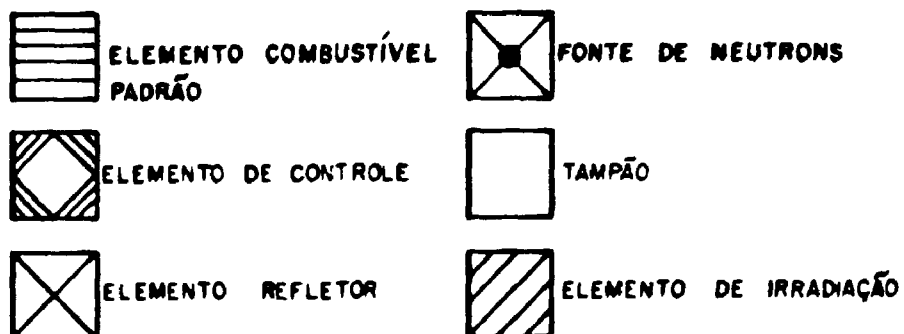


Figura 4.2 - Arranjo crítico do reator IEA-R1 durante a execução deste trabalho. (Configuração nº 150).

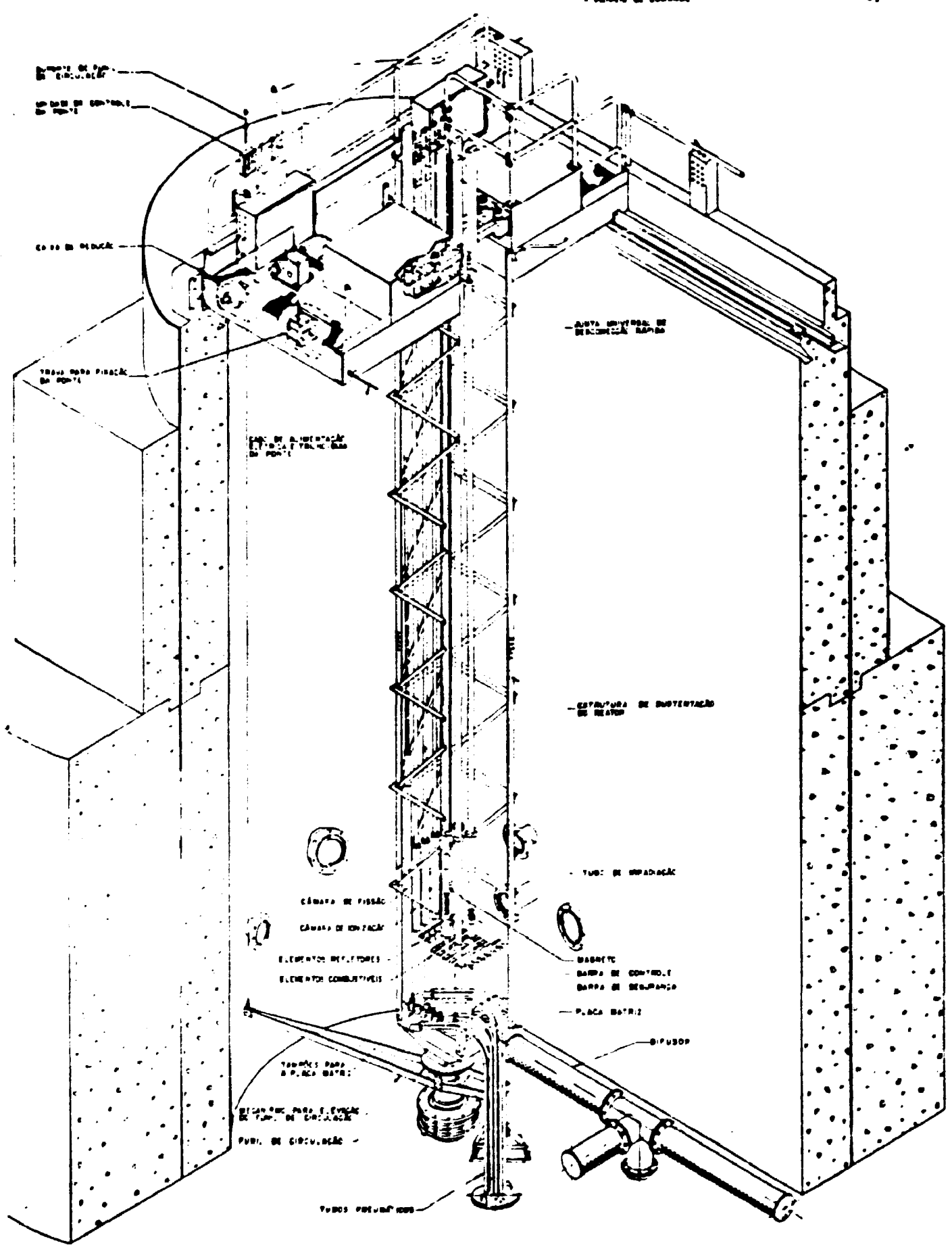


Figura 4.3 - Vista geral do reator IEA-R1.

Serão mostrados nas secções seguintes, os procedimentos utilizados para a verificação da linearidade e resposta dinâmica dos detetores, bem como a análise dos resultados obtidos.

4.3.a VERIFICAÇÃO DA LINEARIDADE DOS DETETORES SPND.

Os detetores SPND utilizados na obtenção dos resultados, e mostrados esquematicamente na figura 4.4, possuem como material sensível a neutrons, ou seja, o fio emissor, o Érbio (detetor nº 1) e o Cobalto (detetor nº 2).

Os materiais utilizados para a construção dos detetores SPND juntamente com as suas dimensões, encontram-se nas tabelas 4.1 e 4.2.

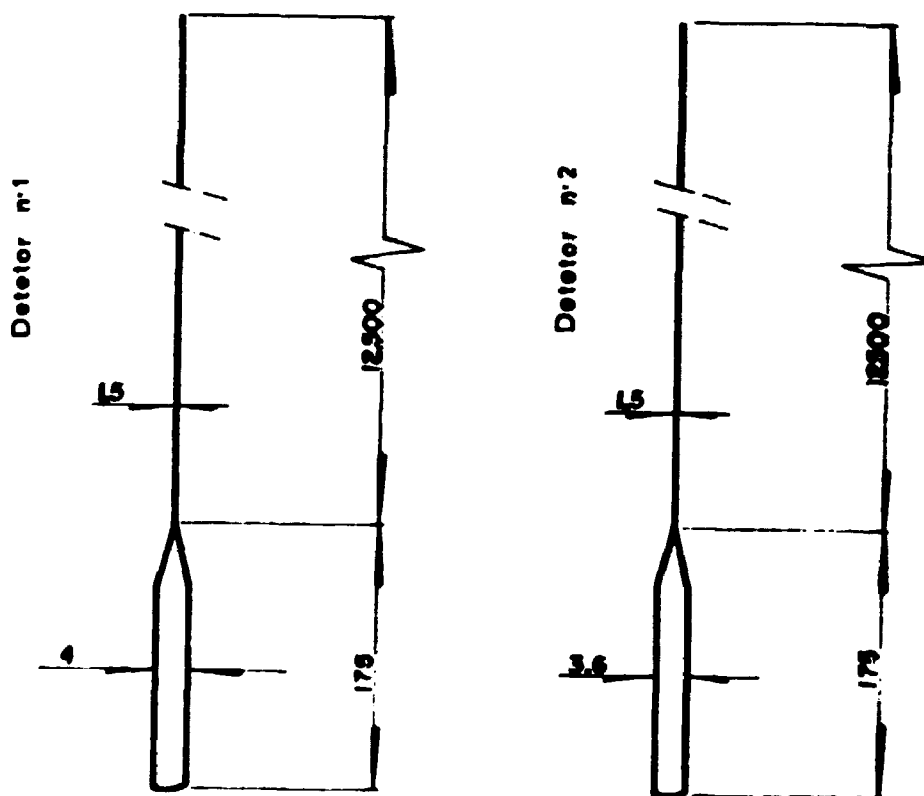


Figura 4.4 - Detetores SPND utilizados (dimensões em mm).

As sensibilidades dos detetores SPND nº 1 e nº 2, também são fornecidas, e estão indicadas nas tabelas 4.3 e 4.4.

Tabela 4.1 - Características do detetor SPND nº 1 - Érbio^{8,16/}

Materiais Dimensões	Emissor	Revestimento	Isolante	Cabo Coaxial
	Érbio	Inconel 600	Alumina Sinterizada	Inconel 600 (Revestimentos e fios) Isolação - Al ₂ O ₃
Diâmetro Interno (mm)	-	3,0	2,0	-
Diâmetro Externo (mm)	2	4,0	3,0	1,5
Comprimento (mm)	150	175	-	- 12500

Tabela 4.2 - Características do detetor SPND nº 2 - Cobalto^{8,16/}

Materiais Dimensões	Emissor	Revestimento	Isolante	Cabo Coaxial
	Cobalto	Inconel 600	Alumina Sinterizada	Inconel 600 (Revestimentos e fios) Isolação - Al ₂ O ₃
Diâmetro Interno (mm)	-	3,1	2,0	-
Diâmetro Externo (mm)	2,0	3,6	3,0	1,5
Comprimento (mm)	150	175	-	- 12500

Tabela 4.3 - Sensibilidades do detetor nº 1^{8,16/}

Sensibilidades		
Neutrons Têrmicos (A/(n/cm ² .s))	Neutrons Rápidos (A/(n/cm ² .s))	Raios Gama (A/(R/h))
$1,3 \times 10^{-20}$	$2,4 \times 10^{-21}$	$1,0 \times 10^{-16}$

Tabela 4.4 - Sensibilidades do detetor nº 2^{8,16/}

Sensibilidades		
Neutrons Têrmicos (A/(n/cm ² .s))	Neutrons Rápidos (A/(n/cm ² .s))	Raios Gama (A/(R/h))
$3,3 \times 10^{-21}$	$3,7 \times 10^{-22}$	$-5,0 \times 10^{-17}$

A linearidade dos detetores SPND foi verificada comparando o aumento do nível de potência do reator IEA-R1, com o sinal de saída dos detetores. Na realização das medidas, os detetores SPND de Érbio e Cobalto foram posicionados no elemento de irradiação nº 26, que está numa posição oposta à câmara de ionização compensada do canal linear do reator IEA-R1 (vide esquema na figura 4.5). Para o posicionamento dos detetores SPND no elemento de irradiação, foram utilizados dois tubos de alumínio com diâmetros externos de 2,5cm e comprimentos de 9,0m. Estes tubos foram colocados no elemento de irradiação, e os detetores SPND deslocaram-se pelo interior dos tubos através do cabo coaxial dos mesmos, que tem 12,5m de comprimento.

O nível de potência inicial do reator IEA-R1 foi fixado em 10kw. A seguir, foram realizadas medidas em duas posições do elemento de irradiação nº 26. A primeira posição no elemento de irradiação encontrava-se aproximadamente 20cm acima da base do núcleo, sendo denotada por posição P₁. A segunda posição foi escolhida aproximadamente 10cm acima do topo do núcleo, e foi deno

tada por posição P_2 . Em P_1 , o fluxo de neutrons t ermicos era maior que em P_2 .

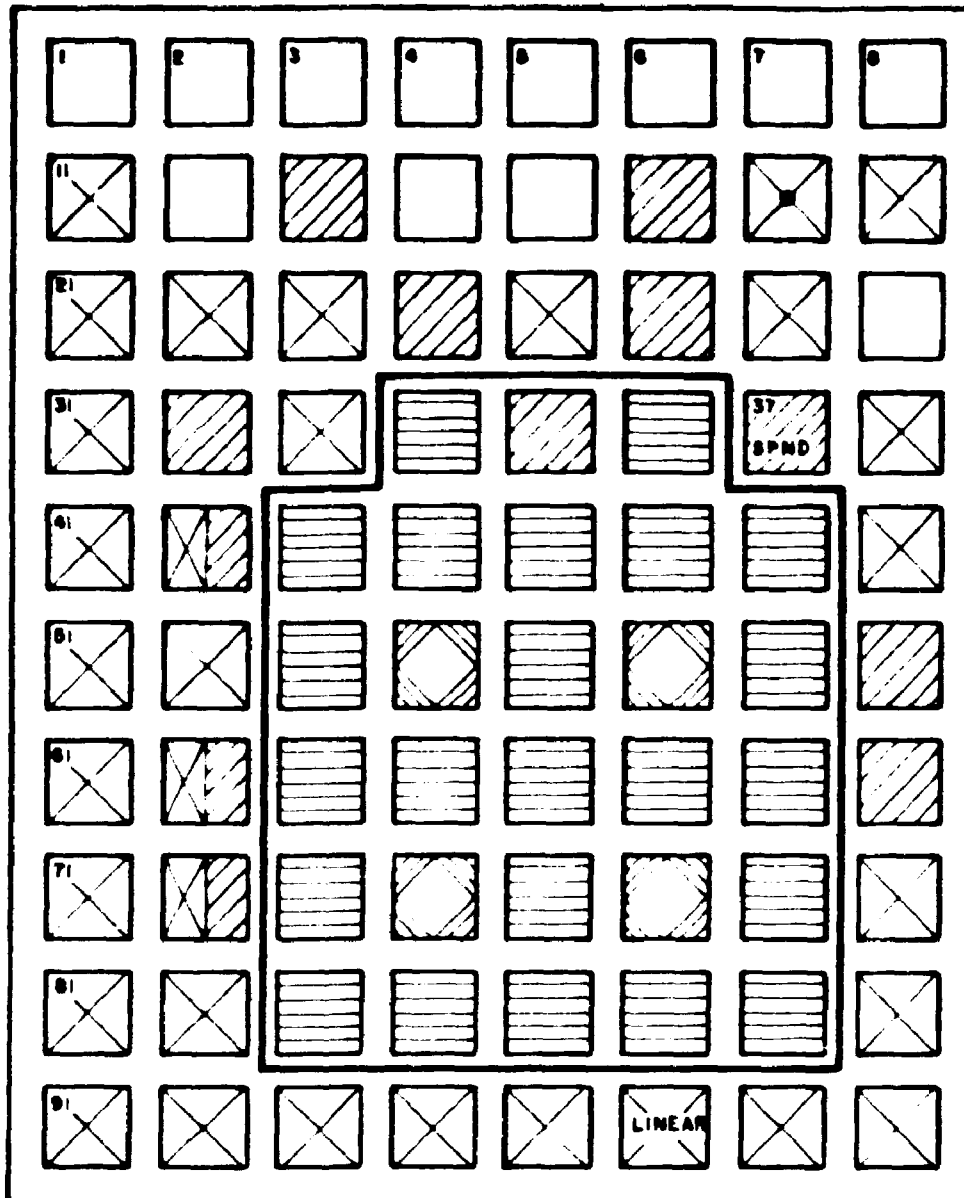
A corrente gerada pelos detetores SPND foi medida com o auxílio de um eletrômetro marca keithley, modelo 610C, que foi operado com a chave de intervalos (RANGE SWITCH) em 10^{-7} A, a chave multiplicadora (MULTIPLIER SWITCH) em 1, chave de realimenta o (FEEDBACK SWITCH) em FAST, chave "ZERO CHECK" em UNLOCK e a chave de medida (METER SWITCH) em +.

A seguir, a potência do reator IEA-R1 foi aumentada até atingir 40kw e 100kw, e novas medidas foram feitas.

A partir de 100kw, a potência do reator foi aumentada em degraus de 200kw, medindo-se em cada degrau, a corrente gerada pelos detetores SPND, até se atingir a potência máxima de opera o do reator IEA-R1, que   de 2Mw. Os valores obtidos para a corrente dos detetores SPND de  rbio e Cobalto em fun o da potência do reator, são mostrados nas tabelas 4.5 e 4.6, respectivamente.

Nas figuras 4.6 e 4.7, encontram-se as curvas de linearidade obtidas com o detetor SPND de  rbio, nas posi es P_1 e P_2 . Nas figuras 4.8 e 4.9, são mostradas as curvas obtidas com o detetor SPND com fio emissor de Cobalto nas duas posi es onde foram feitas as medidas, isto  , P_1 e P_2 .

PLACA MATRIZ



LEGENDA

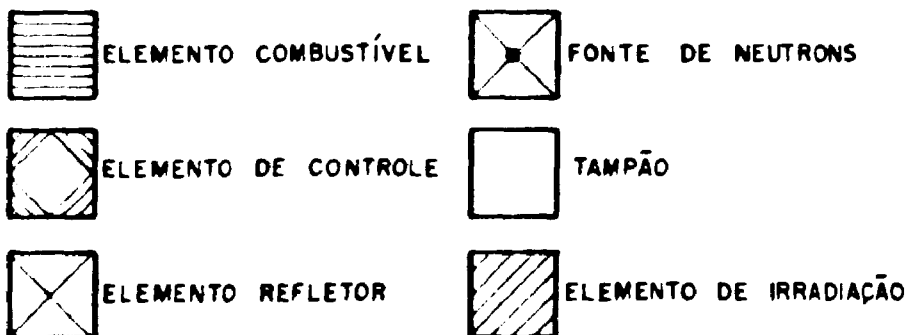


Figura 4.5 - Posicionamento dos detectores SPND nº 1 e nº 2 no núcleo do reator.

Tabela 4.5 - Corrente do detetor SPND de Erblio em função da potência do reator.

Potência do Reator (kw)	Corrente do Detetor ($\times 10^{-7}$ Amperes)	
	Posição P ₁	Posição P ₂
10	0,15	0,09
40	0,23	0,11
100	0,465	0,17
200	0,91	0,275
400	1,9	0,55
600	2,8	0,72
800	3,7	0,95
1000	4,5	1,2
1200	5,4	1,4
1400	6,2	1,6
1600	7,1	1,8
1800	8,0	2,0
2000	8,8	2,3

Tabela 4.6 - Corrente do detetor SPND de Cobalto em função da potência do reator.

Potência do Reator (kw)	Corrente do Detetor ($\times 10^{-7}$ Amperes)	
	Posição P ₁	Posição P ₂
10	0,10	0,085
40	0,14	0,097
100	0,27	0,15
200	0,545	0,26
400	1,1	0,5
600	1,6	0,75
800	2,1	1,0
1000	2,5	1,1
1200	3,0	1,35
1400	3,5	1,55
1600	3,85	1,7
1800	4,4	2,0
2000	4,85	2,15

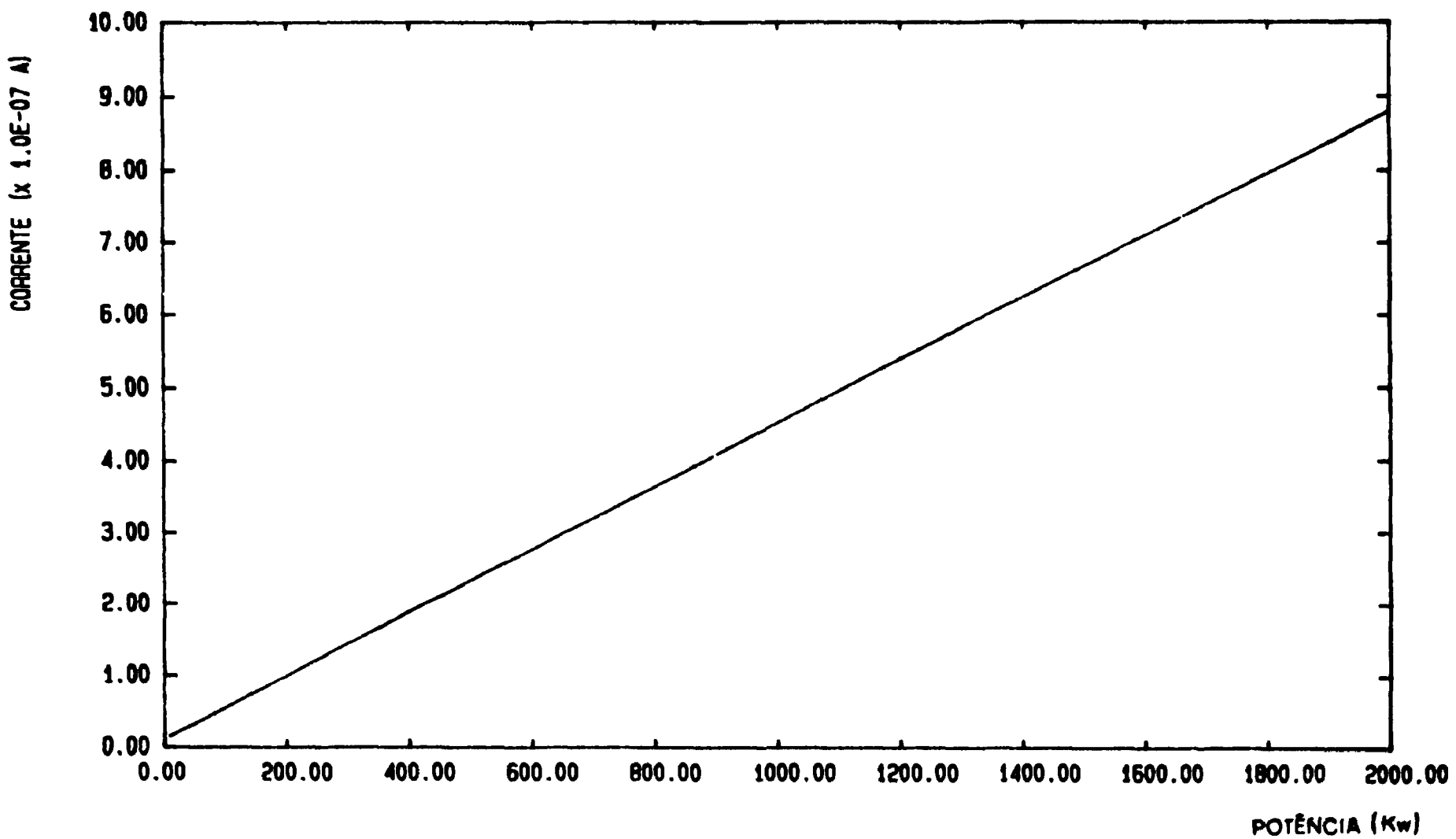


Figura 4.6. Linearidade do Sinal do Detetor nº 1 - Posição P₁

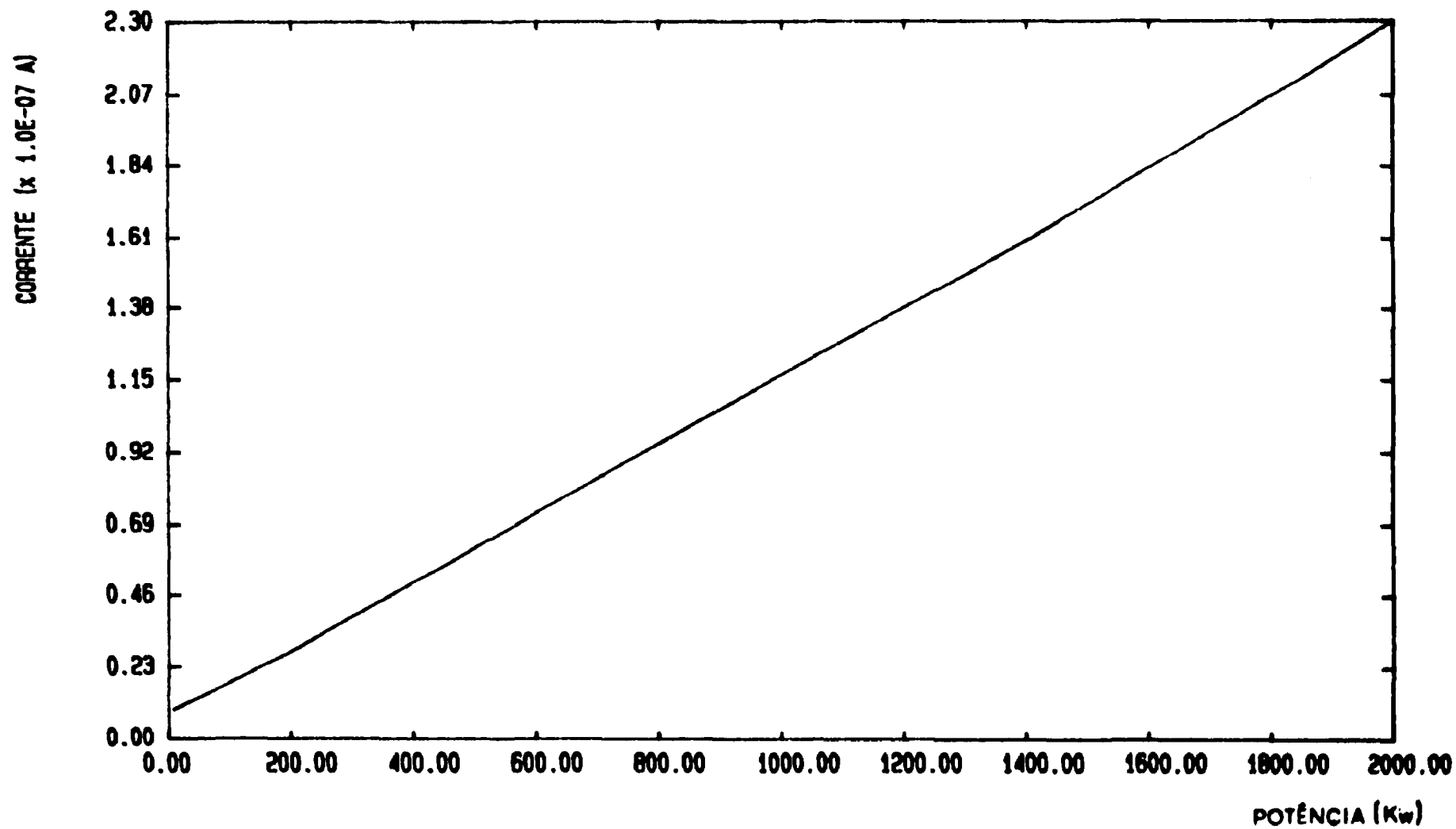


Figura 4.7. Linearidade do sinal do detetor nº 1 - Posição P₂

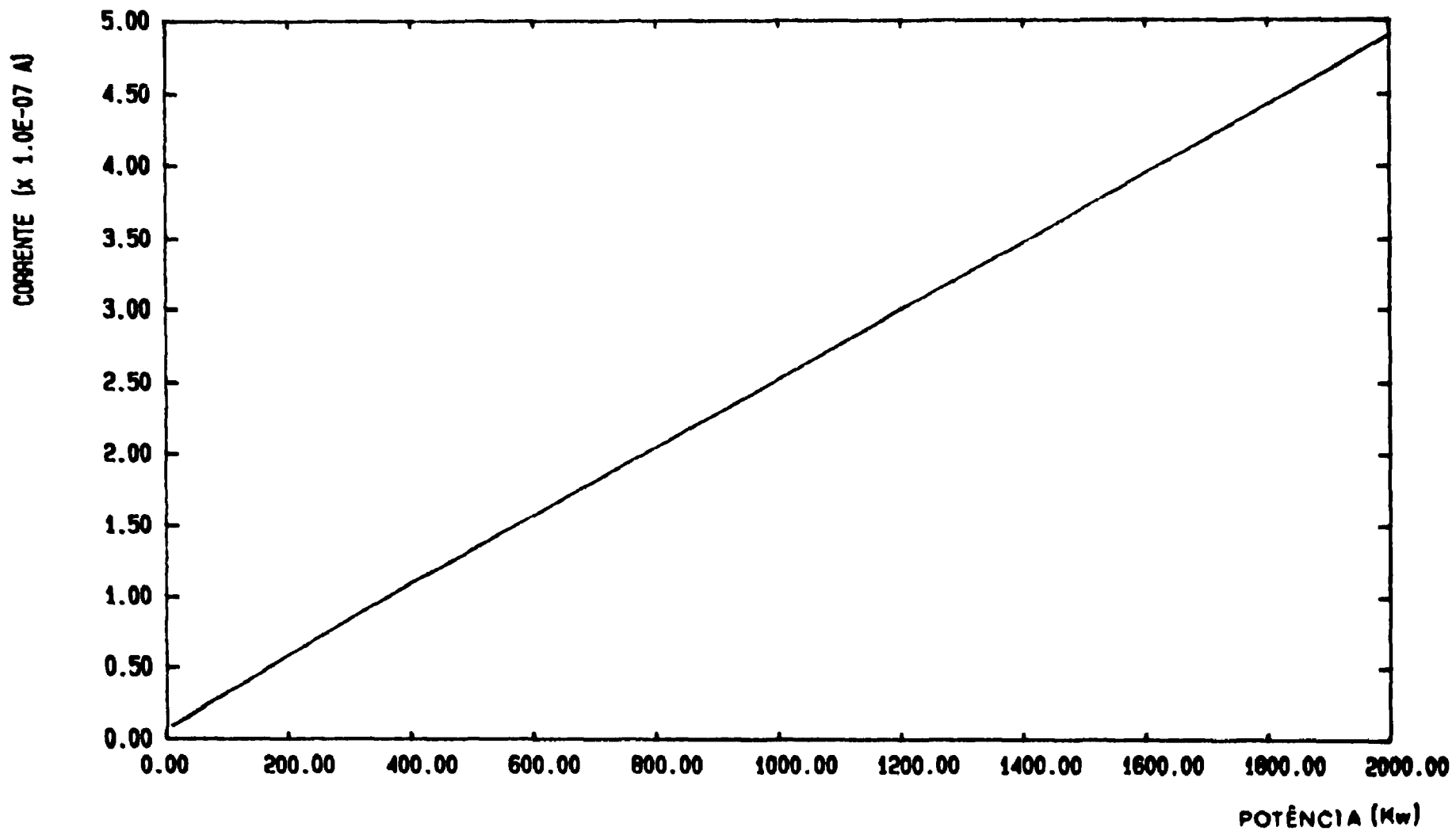


Figura 4.8. Linearidade do Sinal do Detetor nº 2 - Posição P₁

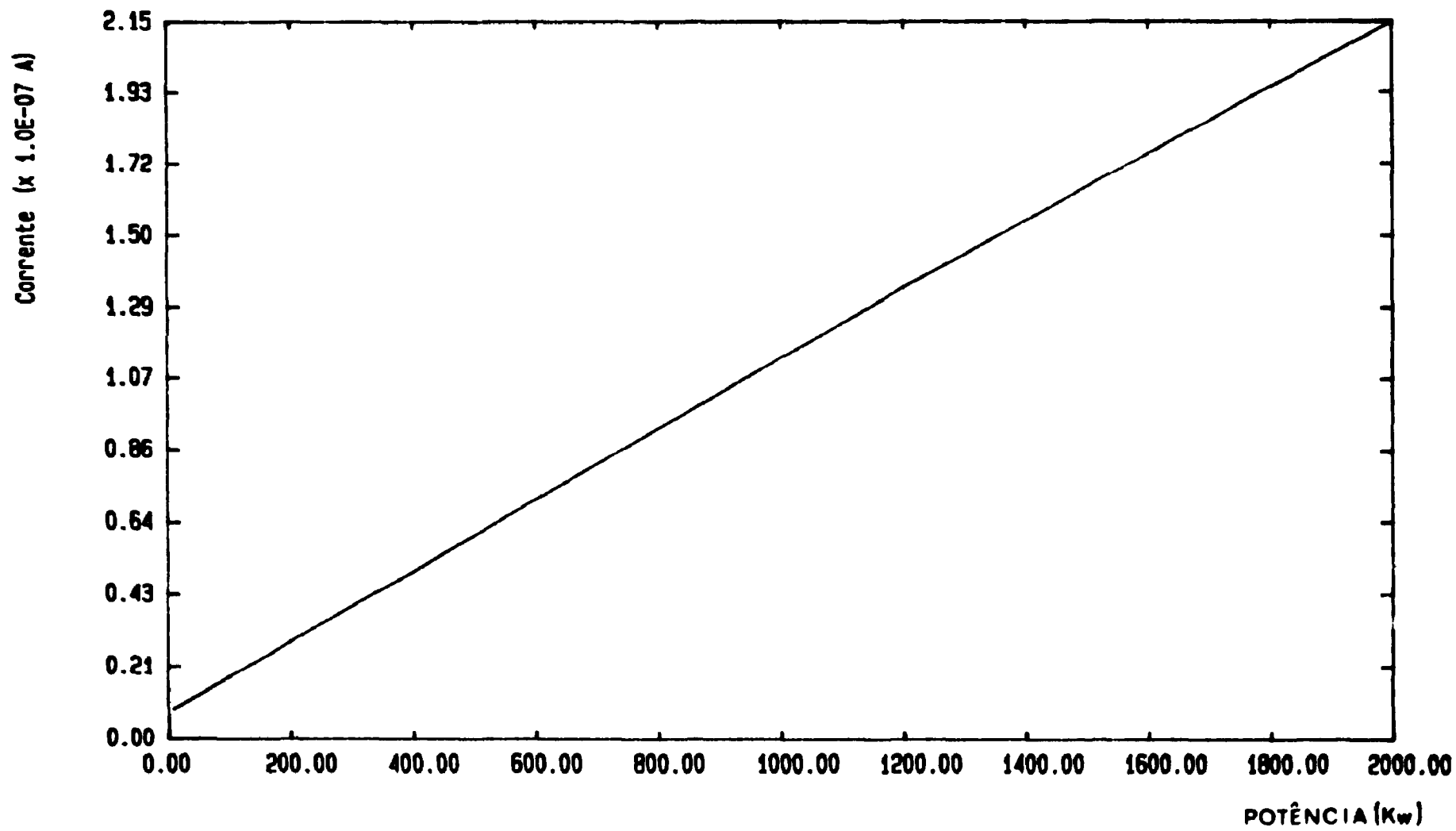


Figura 4.9. Linearidade do Sinal do Detetor nº 2 - Posição P₂

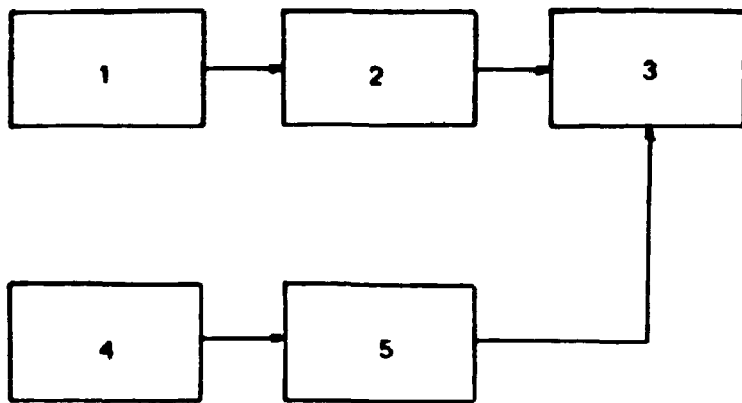
4.3.b VERIFICAÇÃO DO TEMPO DE RESPOSTA DOS DETETORES SPND.

A resposta dinâmica dos detetores SPND, foi verificada através da variação do fluxo de neutrons, no qual os detetores ficaram expostos. A variação do fluxo de neutrons nos detetores, foi obtida retirando ou inserindo os detetores no núcleo do reator e também com o desligamento do reator IEA-R1, por meio da queda das barras de controle e segurança. Os detetores SPND de Érbio e Cobalto foram colocados no elemento de irradiação nº 26, mostrado na figura 4.5, através do sistema de guias descrito na secção 4.3.a. A posição fixada para a colocação dos detetores foi a posição P_1 , onde o fluxo de neutrons térmicos é maior.

Mediu-se a variação da corrente gerada pelos detetores SPND, com o auxílio de um eletrômetro operado nas condições citadas na secção 4.3.a. A corrente gerada pela C.I.C. foi medida com o auxílio de um picoamperímetro, marca Keithley, modelo 414, que foi operado com a chave de intervalos (RANGE FULL SCALE) em 0,03mA e com a chave de medida (METER SWITCH) em "+".

Para registrar a variação do sinal dos detetores (SPND e CIC), utilizou-se o sinal de saída do eletrômetro e do picoamperímetro (sinal de saída em tensão de 0 - 3V e 0 - 1V), como sinal de entrada para um registrador gráfico, marca Hewlet Packard 7100BM, modelo 17501A (vide esquema na figura 4.10). Este registrador gráfico HP, possui dois canais para a entrada do sinal, sendo que cada canal possui faixas de medição de 1mV a 100V, com velocidades de arraste do papel de 2,5cm/h a 5cm/s e largura do registro de 25cm.

Nas figuras 4.11 e 4.12, encontram-se os resultados obtidos com os detetores SPND de Érbio e Cobalto no caso de retirada e inserção no núcleo do reator. Nas figuras 4.13 e 4.14, encontram-se os resultados dos detetores SPND e a CIC do canal linear, acompanhando o desligamento do reator, provocado pela queda das barras de controle e segurança do reator IEA-R1.



1. Detetores SPND nº 1 e 2.
2. Eletrômetro Keithley 610C.
3. Registrador Gráfico HP 7100BM, modelo 17501A.
4. Câmara de ionização compensada do canal linear.
5. Picoamperímetro Keithley 414

Figura 4.10 - Esquema dos detetores utilizados e equipamento as
sociado.

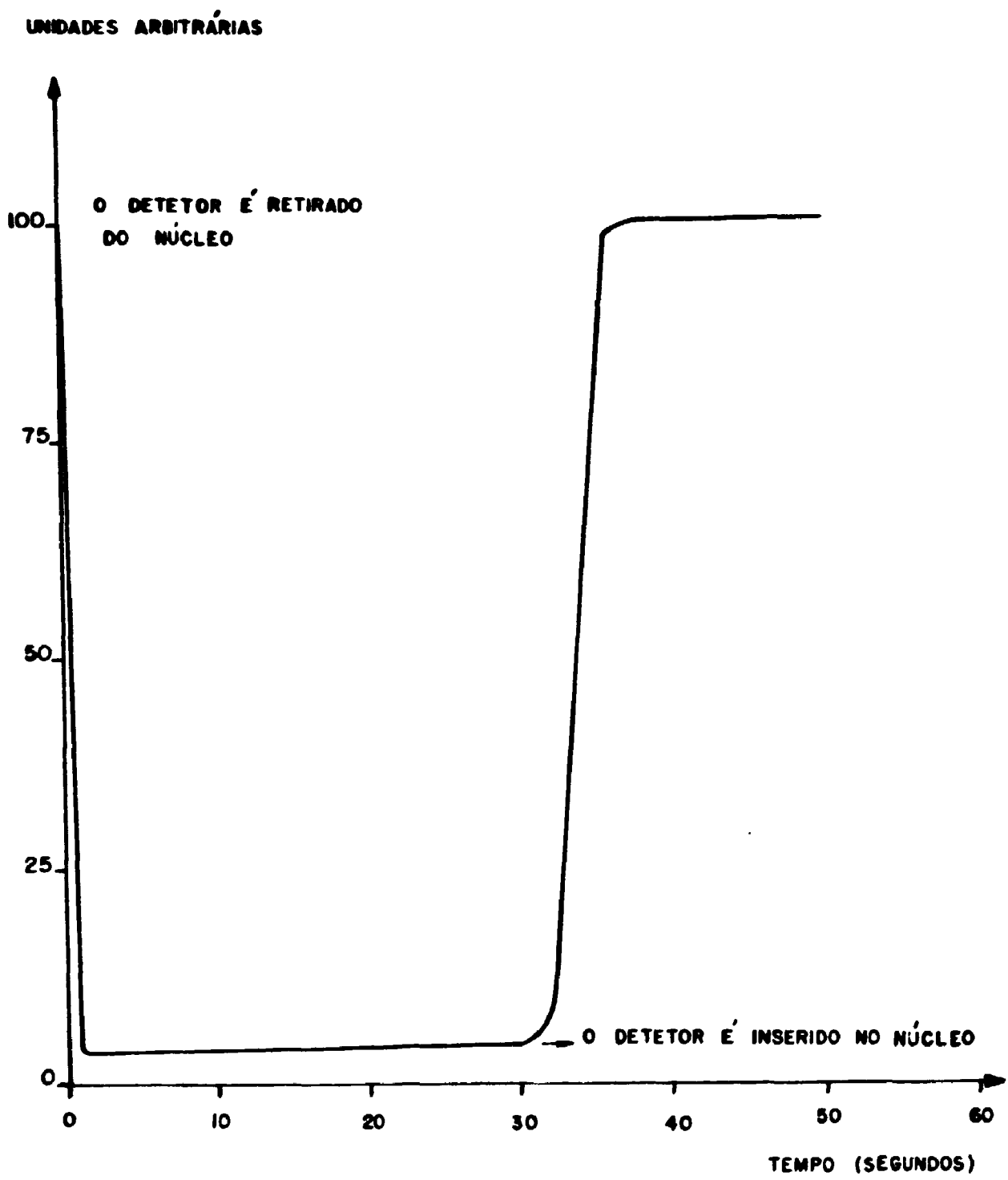


Figura 4.11 - Detetor nº 1 (fio emissor de Érbio).

UNDADES ARBITRÁRIAS

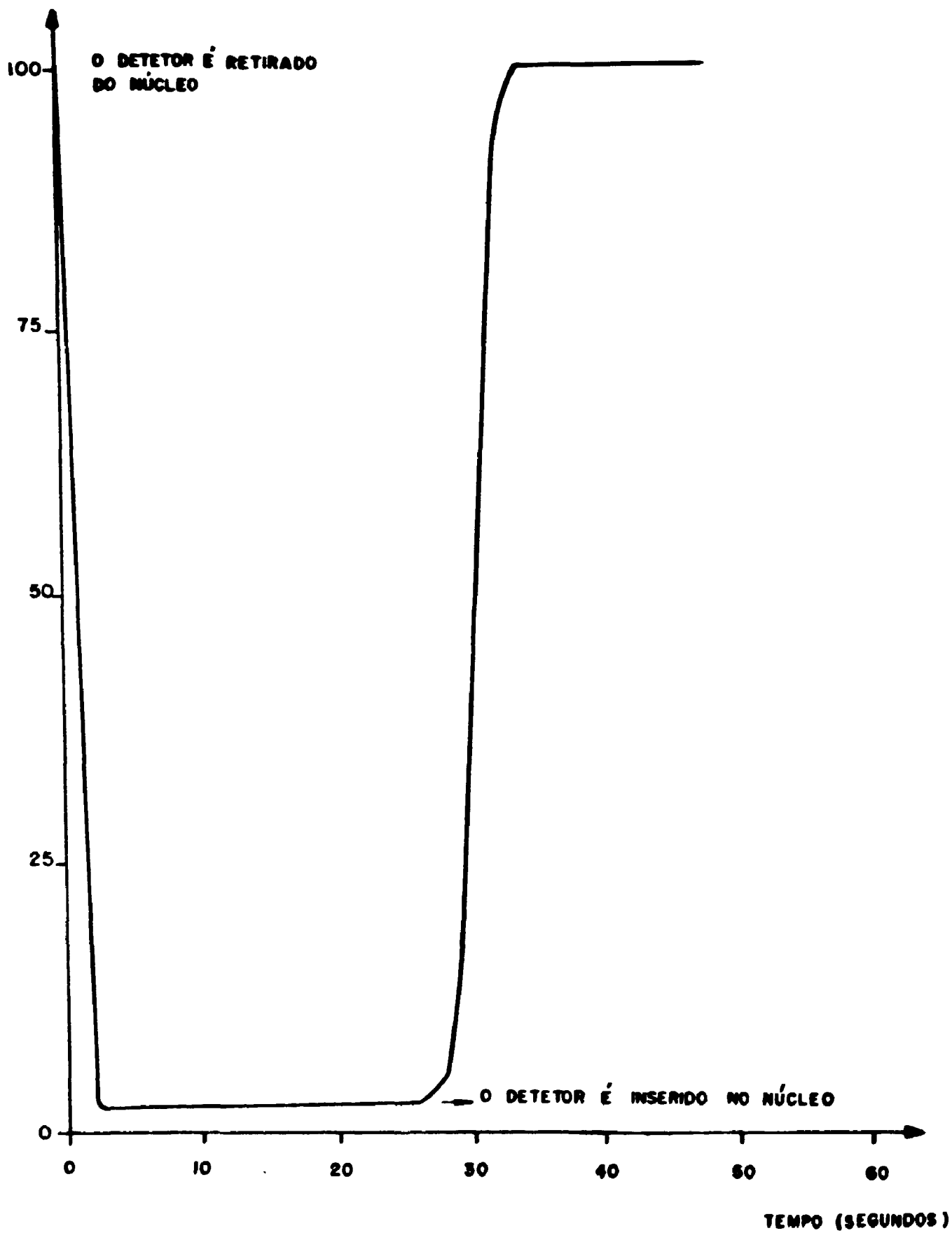


Figura 4.12 - Detetor nº 2 (fio emissor de Cobalto).

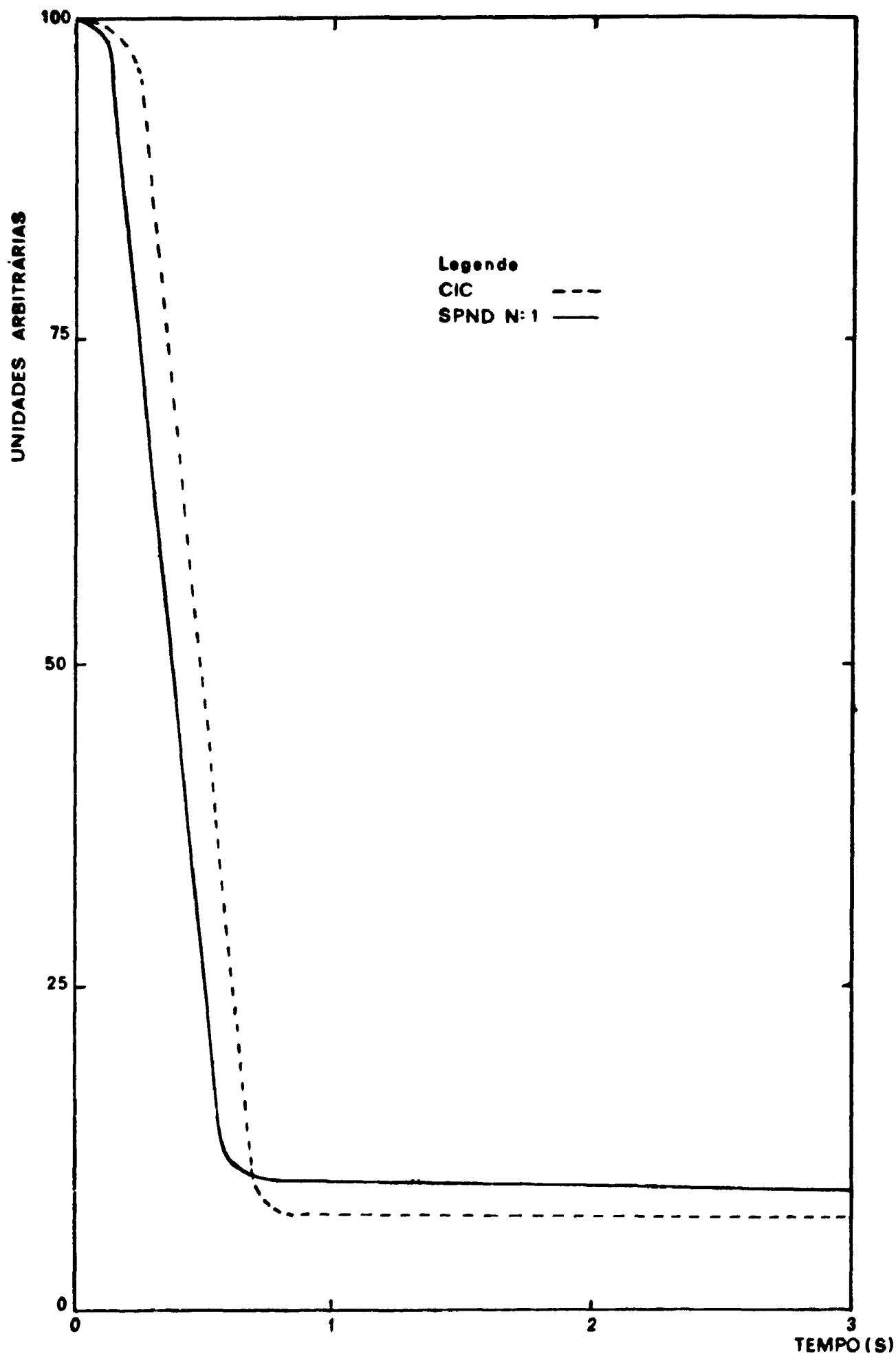


Figura 4.13 - Tempo de resposta do detector SPND nº 1 e a CIC após o desligamento do reator.

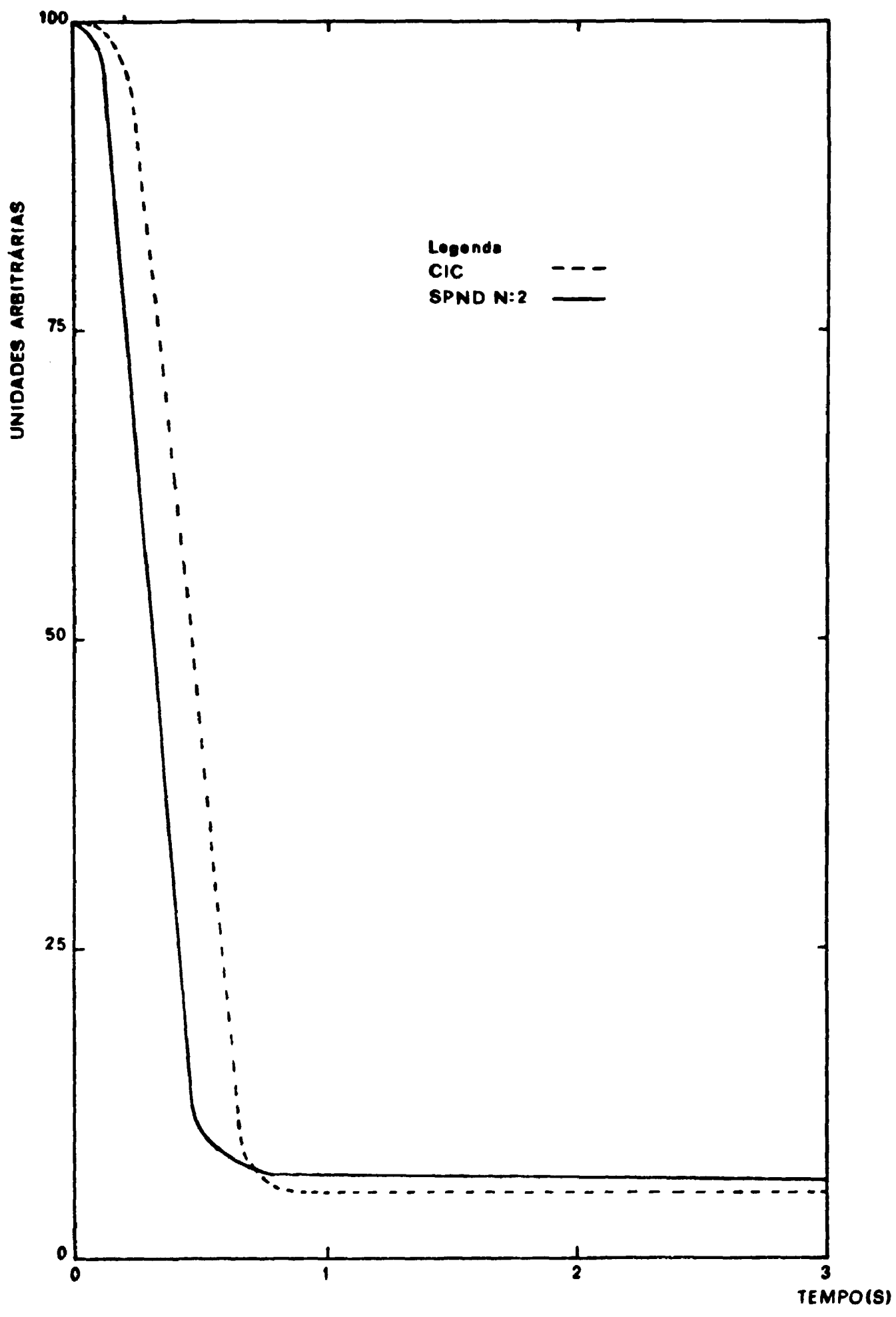


Figura 4.14 - Tempo de resposta do detetor nº 2 e a CIC após o desligamento do reator.

4.3.c ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Nesta secção, é apresentada a análise dos resultados obtidos com os detetores SPND, com fios emissores de Érbio e Cobalto, no que diz respeito a linearidade e o tempo de resposta destes detetores.

Observa-se nas figuras 4.6 a 4.9, a linearidade dos detetores SPND em função da potência do reator IEA-R1, para as posições P1 e P2. Nota-se que, quando os detetores são colocados na posição P1, a linearidade é excelente à medida que a potência do reator é aumentada. Tal fato é observado através dos dados obtidos, que foram ajustados por uma reta, utilizando o método dos mínimos quadrados.

As equações obtidas através do método dos mínimos quadrados feitas entre a corrente do detetor e a potência do reator, constituem a calibração dos detetores utilizados.

Para o detetor de Érbio colocado na posição P1, obteve-se a seguinte equação:

$$C_{ER}(A) = 0,0976 + 0,0044 \cdot P_{reator}(Kw) \text{ e } r=0,9998$$

onde

C_{ER} = corrente do detetor de Érbio, Ampere

P_{reator} = potência do reator, Kw

r = coeficiente de correlação (grau com que os dados se ajustam a uma reta. O coeficiente de correlação pode variar de $r = +1$ e $r = -1$).

Para o detetor de Cobalto, colocado na posição P1,

foi obtida a seguinte equação:

$$C_{Co} (A) = 0,0934 + 0,0240 \cdot P_{reator}(Kw) \text{ e } r = 0,9995$$

onde:

C_{Co} = corrente do detector de Cobalto, Ampere

P_{reator} = potência do reator, Kw

r = coeficiente de correlação

Quando os detectores SPND são colocados na região onde o fluxo de neutrons é menor, isto é, posição P2, obtêm-se as seguintes equações:

- detector de Érbio

$$C_{ER} (A) = 0,0744 + 0,0011 \cdot P_{reator} (Kw) \text{ e } r=0,9994$$

onde:

$C_{ER} (A)$ = corrente do detector, Ampere

P_{reator} = potência do reator, Kw

r = coeficiente de correlação

- detector de Cobalto

$$C_{Co} (A) = 0,0749 + 0,0010 \cdot P_{reator} (Kw) \text{ e } r=0,9986$$

onde:

$C_{Co} (A)$ = corrente do detector, Ampere

P_{reator} = potência do reator, Kw

r = coeficiente de correlação

Na posição P2, região onde o fluxo de neutrons é menor, a linearidade piora um pouco, e é notada através dos coeficientes de correlação.

Por essa razão, esses detetores terão maior precisão, se posicionados em regiões onde o fluxo de neutrons é maior.

Nas figuras 4.11 e 4.12, encontram-se os resultados obtidos com os detetores SPND números 1 e 2, quando os mesmos são retirados e inseridos no núcleo do reator IEA-R1. Observa-se que através dessas figuras, que os detetores respondem prontamente as mudanças ocorridas no fluxo de neutrons térmicos.

Após a retirada dos detetores do núcleo, o sinal dos mesmos leva aproximadamente 1 segundo para cair praticamente a zero.

Quando os detetores estão sendo inseridos no núcleo do reator, observa-se que o tempo de resposta dos detetores SPND, para acusar a variação do fluxo de neutrons térmicos é maior que o tempo de resposta quando os detetores são retirados do interior do núcleo.

Isto é explicado devido a flexibilidade apresentada pelos cabos dos detetores SPND, que faz com que a introdução dos detetores no interior do núcleo, através do tubo guia, seja uma operação mais demorada do que a operação de retirada. A retirada dos detetores do núcleo é feita através de um rápido puxão.

Fica portanto evidenciado, que a corrente dos detetores é devido somente a componente pronta como mostrado no capítulo 2, secção 2.4.a. Como os detetores foram pouco utilizados, a contribuição da componente atrasada não é considerada. Nesse caso, a corrente destes detetores é proveniente dos elétrons produzidos pelos raios gama emitidos após a captura de neutrons no emissor, em outras palavras, a corrente do detetor é proporcio-

nal ao fluxo de neutrons.

A resposta dinâmica dos detetores SPND e também da câmara de ionização compensada foi medida pelo decaimento do sinal dos detetores seguindo o rápido desligamento do reator IEA-R1 através da queda das barras de controle e segurança.

Considerando que a CIC seja boa, compara-se o sinal produzido pelos detetores SPND com o sinal da C.I.C. A CIC é considerada como o padrão de comparação.

Nota-se que nas figuras 4.13 e 4.14, os detetores SPND e a CIC apresentam o mesmo comportamento dinâmico com a redução da potência do reator, isto é, ambos respondem prontamente às mudanças ocorridas na intensidade do fluxo neutrônico, devido a queda das barras de controle e segurança. Em aproximadamente 0,6s, o sinal proveniente dos detetores cai para o nível de 12% de seu valor inicial de operação.

Verifica-se que nas figuras 4.13 e 4.14, tanto a CIC como os detetores SPND estão iniciando no mesmo tempo inicial. Isto foi feito, normalizando-se as curvas para o mesmo valor do tempo inicial.

Após o desligamento do reator, o sinal dos detetores SPND é causado pela interação dos raios gama externos aos detetores e também aos neutrons atrasados emitidos pelos produtos de fissão.

A CIC, posicionada na periferia do núcleo, a um metro do topo do núcleo, fornece um sinal proporcional a média do fluxo de neutrons na parte ativa do núcleo do reator.

4.4 UTILIZAÇÃO DE DETETORES SPND PARA O MAPEAMENTO DO FLUXO DE NEUTRONS NO REATOR IEA-R1.

Os detetores SPND são bastante utilizados para o mapeamento de fluxo neutrônico em reatores nucleares.

Os resultados obtidos de medidas realizadas no reator IEA-R1 com os detetores SPND foram comparados com os resultados de uma câmara de fissão miniatura WL-23292, normalmente utilizada para o mapeamento de neutrons térmicos no reator IEA-R1. Devido a relativamente grande dimensão, para fins de mapeamento de fluxo, dos detetores SPND disponíveis no Instituto, houve dificuldades na comparação dos resultados obtidos com os da câmara de fissão miniatura.

Apresenta-se a seguir, na secção 4.4.a, o arranjo experimental utilizado para se medir a distribuição do fluxo de neutrons térmicos no reator IEA-R1. Na secção 4.4.b é apresentado todo o arranjo utilizado para o posicionamento dos detetores, juntamente com os resultados obtidos. A análise dos resultados é apresentada na secção 4.4.c.

4.4.a DETETORES UTILIZADOS E DISPOSITIVOS ASSOCIADOS.

Para se medir o perfil do fluxo de neutrons térmicos do reator IEA-R1, utilizou-se uma câmara de fissão miniatura, marca Westinghouse, modelo WL-23292 e dois detetores de neutrons do tipo SPND, com fios emissores de Érbio e Cobalto. A câmara de fissão miniatura WL-2392, vista na figura 4.15, é um detector utilizado para o mapeamento do fluxo de neutrons térmicos num intervalo de 10^6 a 10^{11} n/cm².s, com uma sensibilidade a neutrons térmicos de $1.5 \cdot 10^{-5}$ CPS / (n/cm².s)^{1/27}. O material sensível a neutrons consiste de óxido de urânio (U₃O₈) altamente enriquecido em U-235 (90%), sendo o gás que preenche a câmara Ar-N₂. Os eletrodos e as paredes da câmara são de aço inox, e a

isolação é de óxido de alumínio /27/.

O sistema eletrônico associado à câmara de fissão miniatura encontra-se na figura 4.16, e constitui de uma fonte de alimentação, um prê-amplificador, um amplificador, um analisador monocanal, um registrador de tempo e um registrador de pulsos. Os diversos componentes foram operados nas condições citadas na figura 4.16.

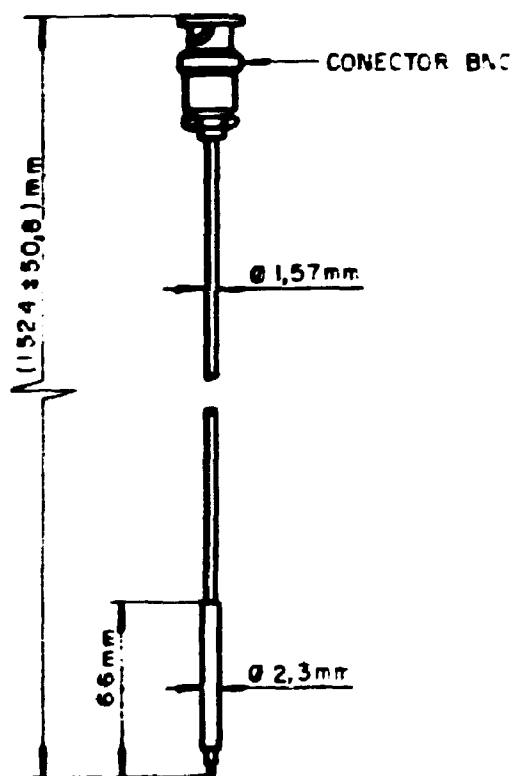
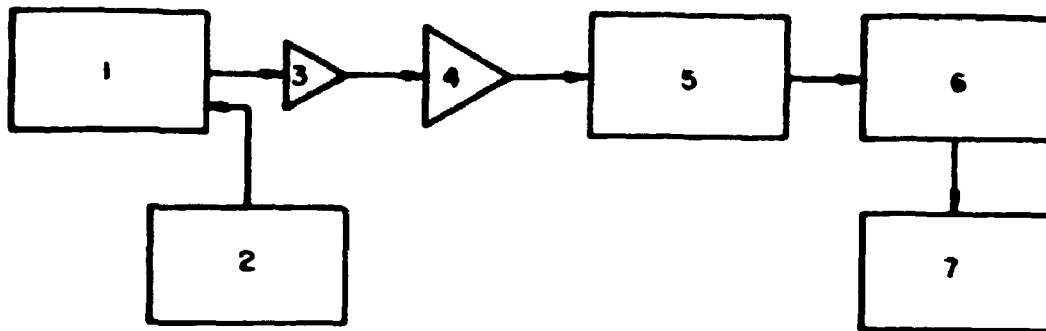


Figura 4.15 - Câmara de fissão miniatura WL 23292 /27/



1. câmara de fissão miniatura, modelo WL-23292
2. Fonte de alimentação ORTEC 456, em 100 volts
3. Pré-amplificador ORTEC 109 PC
ganho 1
polaridade positiva
4. Amplificador ORTEC
5. Analisador Monocanal 550 SCA
6. Registrador de tempo ORTEC 719, em 4 segundos
7. Registrador de pulsos ORTEC 722

Figura 4.16 - Esquema do detetor utilizado e equipamento eletrônico associado.

O sistema eletrônico associado aos detetores SPND foi o mesmo descrito na secção 4.3.a.

Para a introdução da câmara de fissão miniatura no elemento combustível a ser mapeado, utilizou-se um sistema de guias que permite varrer o elemento axialmente em 26 posições diferentes ^{/35/}. O procedimento para levantar a distribuição de fluxo encontra-se descrito na referência ^{/35/}.

Para o posicionamento dos detetores SPND no elemeno

to de irradiação foi utilizado o sistema de guias descrito na seção 4.3. A movimentação dos detetores SPND ao longo do elemento de irradiação é feita por meio do cabo coaxial destes, que tem 12,5 m de comprimento. Os detetores SPND cobriram 8 posições diferentes ao longo do elemento de irradiação, espaçadas de 7,5 cm.

4.4.b CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS E RESULTADOS DAS MEDIDAS DE MAPEAMENTO DE FLUXO

Para o levantamento da distribuição axial do fluxo de neutrons térmicos, escolheu-se o elemento combustível nº 85 e o elemento de irradiação nº 26 mostrados na figura 4.2. Devido ao pequeno espaçamento entre as placas de combustível dos elementos de combustível do reator IEA-R1, não é possível inserir neles os detetores SPND disponíveis. Optou-se assim, a mapear o elemento de irradiação de número 26 por estar na posição mais próxima do elemento combustível nº 85, mapeado com a câmara de fissão miniatura.

Para as medidas de fluxo no elemento de combustível nº 85 com a câmara miniatura de fissão, o reator IEA-R1 estava sendo operado na configuração nº 150, mostrada na figura 4.2, a um nível de 1 Kw de potência. A câmara de fissão miniatura obstrui o canal de refrigeração do elemento de combustível. Devido a isso, a máxima potência de operação do reator IEA-R1 com a câmara de fissão miniatura é 1 Kw.

Para o reator IEA-R1 operando em 1 Kw, as barras de segurança e controle estavam nas seguintes posições:

	posições no mostrador	inserção da barra no núcleo
BS1	803	11,82 cm
BS2	800	12,00 cm
BS3	800	12,00 cm
BC	820	20,80 cm

O procedimento para o levantamento da distribuição do elemento de irradiação, com os detetores SPND, consistiu em se colocar os detetores SPND nas oito posições de medida e anotar, a seguir, a corrente gerada pelos detetores.

Na figura 4.17, pode-se ver o perfil do fluxo de neutrons térmicos do elemento combustível nº 85, que está na periferia do núcleo do reator, obtido com a câmara miniatura de fissão.

O tempo de acumulação de contagem para cada ponto medido foi de 4 segundos, proporcionando altas contagens. Esse alto número de contagens permitiu uma boa estatística com erros de 1% indicando que as incertezas são devidas a variação de potência, que é controlada automaticamente e também as variações ocorridas no sistema de medição. A medida do "background" da radiação gama com o detector miniatura foi feita a 0,5 m acima do núcleo, pois a essa distância do núcleo, o fluxo de neutrons já é bastante atenuado e a câmara detecta quase que somente radiação gama. Para evitar a contaminação dos sinais medidos pela radiação gama existente no reator, o monocanal foi operado discriminando pulsos de amplitudes baixas, característico da radiação gama.

Os perfis do fluxo de neutrons térmicos no elemento de irradiação nº 26 faceando o elemento combustível nº 85, levantados com os detetores SPND encontram-se na figura 4.18.

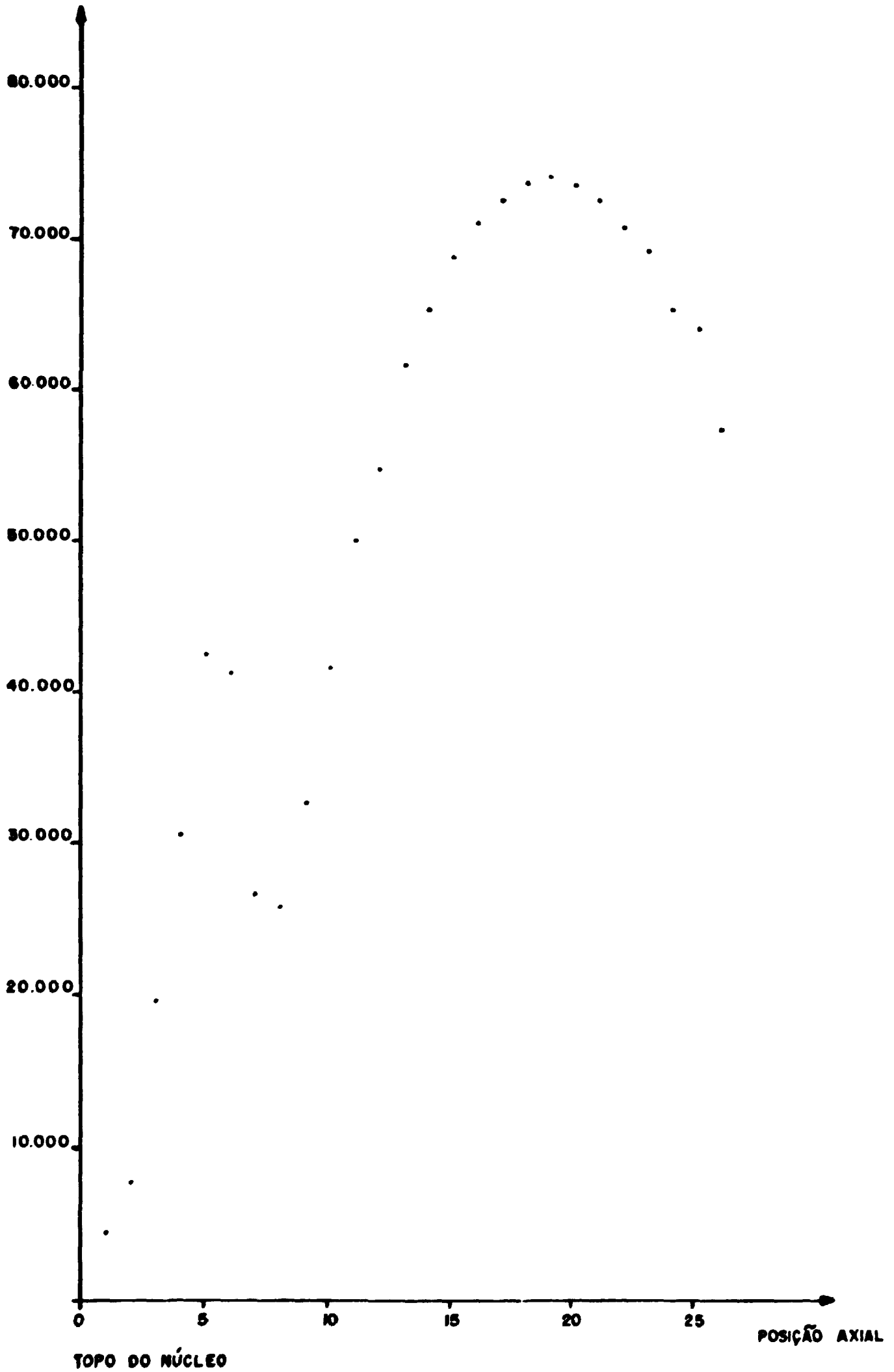
Devido as dimensões apresentadas pelos detectores, ou seja, aproximadamente 1/4 do comprimento ativo do núcleo do reator,

a distribuição axial do fluxo de neutrons térmicos não é detalhada. Com a câmara miniatura, pode-se dizer que a medida feita é quase puntual devido as dimensões da câmara de fissão, enquanto que os valores obtidos com os detetores SPND são valores proporcionais à média do fluxo de neutrons ao longo do comprimento ativo do detetor que é de 15 cm.

Na figura 4.19 é apresentada a diferença entre o perfil do fluxo de neutrons obtido com a câmara miniatura e os detetores SPND. O perfil do fluxo de neutrons obtido com a câmara miniatura refere-se ao perfil do elemento combustível nº 85, enquanto que aquele obtido com os detetores SPND refere-se ao elemento de irradiação nº 26.

As curvas apresentadas nas figuras 4.18 e 4.19 são curvas normalizadas para que a média de todas seja igual a 1.

CONTAGENS / 4 s



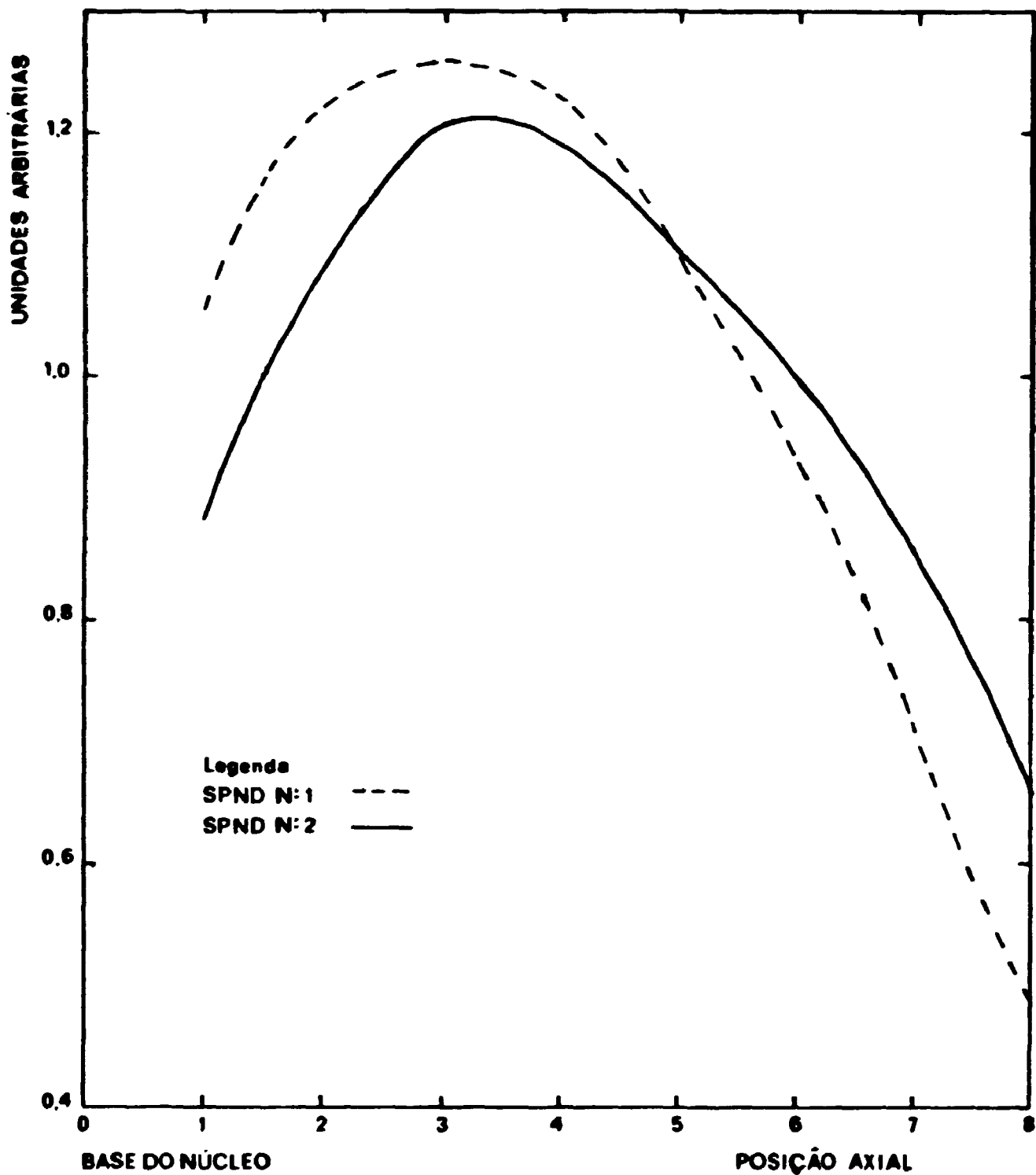
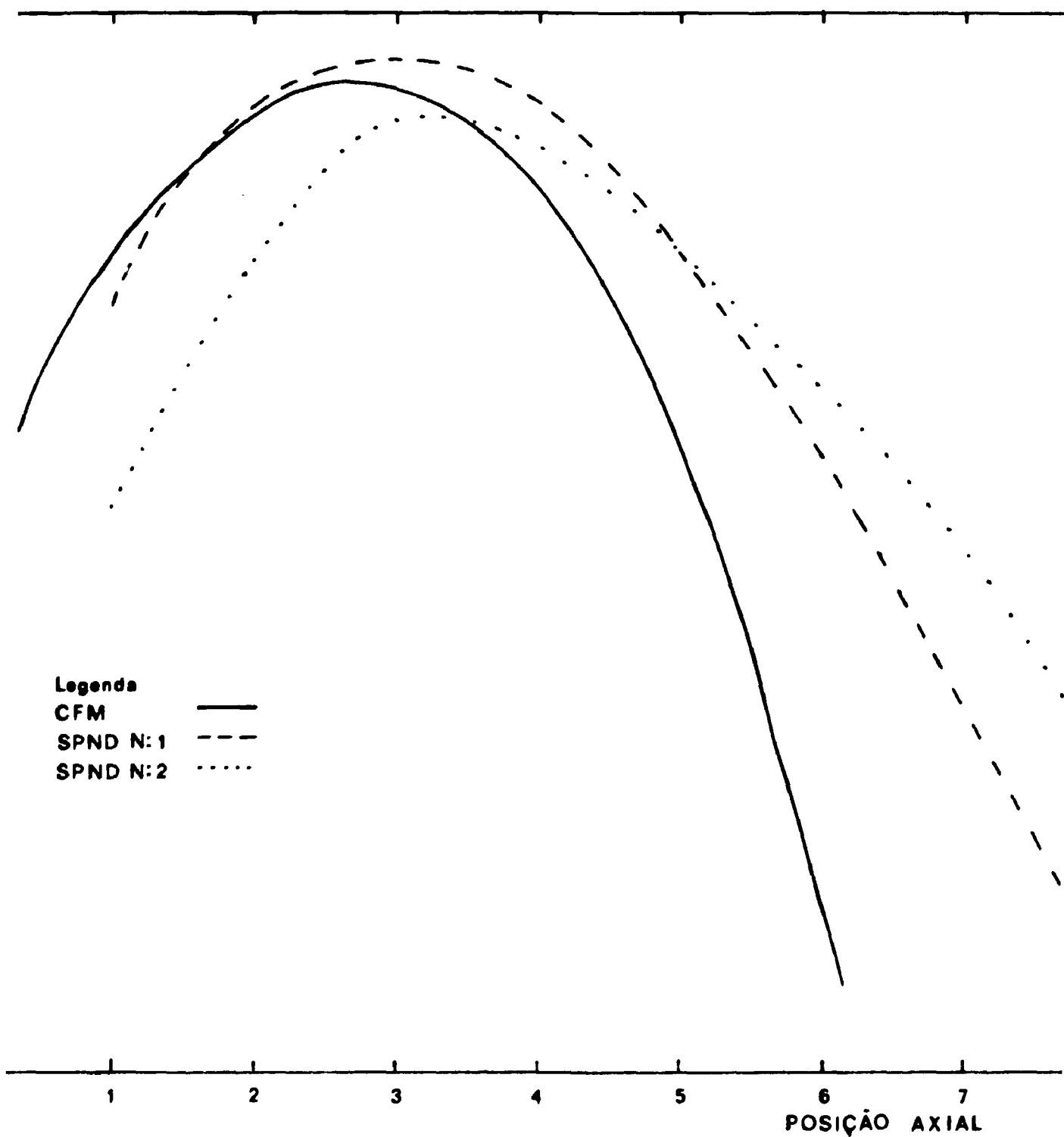


Figura 4.18 - Distribuição axial do fluxo neutrônico no elemento de irradiação nº 26 obtida com os detectores SPND nº 1 e nº 2.



4.19 - Distribuição axial do fluxo neutrônico do EC# 85 e do EI#26 obtidos com a câmara miniatura e os detetores SPND.

4.4.c ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na figura 4.17, pode-se ver o perfil do fluxo de neutrons térmicos do elemento combustível nº 85, que está na periferia do núcleo do reator, obtido com a câmara miniatura de fissão. Nota-se que as barras de controle, inseridas a aproximadamente 1/4 na parte superior do núcleo do reator, fazem com que o fluxo de neutrons térmicos seja maior na parte inferior do núcleo, devido a grande absorção de neutrons térmicos pelas barras de segurança e controle. Também pode ser visto, o pico no refletor característico do fluxo neutrônico na parte superior do elemento combustível.

Na figura 4.18, são apresentados os perfis do fluxo de neutrons do elemento de irradiação nº 26 obtido com os detetores SPND de Érbio e Cobalto. Mesmo com as dimensões grandes dos detetores SPND em relação ao comprimento ativo do núcleo do reator, fica evidenciado as características físicas do reator IEA-R1, ou seja, o fluxo de neutrons na parte inferior do elemento é maior devido ao efeito de absorção de neutrons térmicos pelas barras de segurança inseridas na parte superior do núcleo.

Na figura 4.19, é apresentado o perfil do fluxo de neutrons do elemento combustível nº 85 obtido com a câmara miniatura e os perfis do fluxo de neutrons obtidos com os detetores SPND, evidenciando a diferença obtida com a câmara miniatura e os detetores SPND.

Nota-se que os resultados obtidos com os detetores SPND não estão satisfatórios, quando comparados com os resultados obtidos com a câmara miniatura de fissão. Isto ocorre devido a grande dimensão apresentada pelos detetores SPND frente às dimensões da câmara miniatura, que tem um comprimento de 6,6 mm e diâmetro de 2,3 mm. Outro fator a ser citado, e que contribuiu para a obtenção desses resultados foi com relação ao sistema de guias

utilizado para o posicionamento dos detetores. Os detetores SPND foram posicionados no núcleo do reator através de tubos de alumínio de 9 m de comprimento, sendo que a movimentação dos detetores ao longo do comprimento do tubo foi feita através do cabo coaxial destes, o que pode ocasionar o posicionamento irregular dos detetores no núcleo do reator, causando resultados imprecisos, ou seja dados defasados em relação aos obtidos com a câmara miniatura.

4.5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Buscou-se verificar a possibilidade de utilização de detetores SPND tanto no sistema de instrumentação e controle do Reator IEA-R1, como também no mapeamento do fluxo neutrônico. Para isto, vários testes foram feitos com os detetores SPND e os sinais produzidos pelos detetores foram comparados com os sinais produzidos pela câmara de ionização compensada do canal linear e a câmara miniatura de fissão, utilizadas no controle e mapeamento do fluxo neutrônico do reator IEA-R1, respectivamente. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade da aplicação destes detetores no reator IEA-R1.

Os resultados obtidos com os detetores SPND não se mostraram satisfatórios em mapeamento do fluxo neutrônico do reator IEA-R1, devido suas dimensões grandes frente à parte ativa do núcleo do reator.

Para se obter uma distribuição do fluxo de neutrons "in-core" detalhada e com grande precisão, torna-se necessário a utilização de métodos que combinam o conjunto de dados obtidos experimentalmente com aqueles obtidos teoricamente, através da teoria de difusão de neutrons.

Este método utilizado é chamado de mapeamento racional (Rational Mapping-RAM) e foi elaborado para que os sinais incorretos obtidos experimentalmente sejam reconhecidos e eliminados do conjunto de dados. Isto é obtido através da expansão nodal da diferença entre os fluxos teóricos e experimentais nas posições ocupadas pelos detetores.

Estudos da sensibilidade provaram que o método RAM é estável e que os resultados obtidos no mapeamento do fluxo são três vezes menores do que aqueles obtidos pela interpolação direta dos resultados experimentais.

Com relação aos resultados obtidos com os detetores SPND para a utilização dos mesmos no sistema de instrumentação e controle do reator IEA-R1, estes mostraram-se satisfatórios quando comparados com os resultados fornecidos pela câmara de ionização compensada do canal linear. Vários testes foram feitos em relação a linearidade e tempo de resposta destes detetores e através dos resultados obtidos, verifica-se que estes detetores podem ser utilizados no sistema de instrumentação e controle. Utilizados juntamente com a C.I.C do canal linear, estes poderão fornecer informações contínuas a respeito do fluxo neutrônico e também das mudanças ocorridas no fluxo de neutrons no núcleo do reator.

Através dos resultados obtidos, nota-se que estes detetores obtêm seus melhores desempenhos quando operam em potências superiores a 100 Kw, devido a baixa sensibilidade a neutrons térmicos apresentadas por estes detetores.

As vantagens apresentadas por estes detetores com relação às apresentadas pela CIC do canal linear, residem no fato de que os mesmos não necessitam de uma fonte de alimentação externa para que possam operar. Os detetores SPND também não necessitam de blindagens especiais para a sua colocação no interior do núcleo do reator, isto é, podem ser imersos diretamente no refrigerante, sendo necessário somente um sistema de guias para que possam ser colocados na posição desejada.

Os detetores que são usados em sistemas de proteção e controle de reatores nucleares não devem apresentar problemas com relação a instalação no núcleo do reator e devem sempre fornecer informações confiáveis a respeito das mudanças ocorridas no fluxo de neutrons. O tempo de resposta destes detetores deve ser pequeno para que possam acusar essas informações rapidamente.

Com relação a componente atrasada da corrente des-

tes detetores, ficou evidenciado através do capítulo 2, que somente após um longo período de operação, ou seja, aproximadamente cinco anos, que esta componente irá alterar o sinal de saída dos detetores, isto é, a componente pronta da corrente.

No caso do reator IEA-R1, que opera com uma potência nominal de $2M_w$, com um ciclo de funcionamento de 5 dias/semana, 8 horas/dia, o prazo para que a componente atrasada da corrente do detetor seja significativa é maior ainda.

Portanto, se os detetores SPND vierem a ser usados no sistema de instrumentação e controle do reator IEA-R1, o controle do fluxo de neutrons ficará assegurado através da redundância, aumentando assim a confiabilidade do sistema.

CAPÍTULO V

5. TENTATIVA DE CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE UM DETETOR DE NEUTRONS DO TIPO SPND

5.1 INTRODUÇÃO

Devido a possibilidade de utilização de detetores SPND no reator IEA-R1 e em outros projetos no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), decidiu-se projetar e construir um protótipo de um detetor auto-energizado ou detetor SPND. Os objetivos do projeto, eram o de produzir um detetor de pequenas dimensões, para que o mesmo pudesse ser colocado em canais com pequenos diâmetros ou até mesmo entre as placas dos elementos combustíveis do reator IEA-R1; que o mesmo fosse de simples operação e sem a necessidade de uma eletrônica associada sofisticada; de grande resistência para que pudesse ser inserido no núcleo do reator sem a necessidade de precauções especiais. Também era de interesse, que o detetor SPND tivesse um tempo de vida útil superior a 12 meses, mesmo quando exposto continuamente a uma intensidade de fluxo de neutrons da ordem de 10^{13} n/cm².s. O detetor com essas características forneceria informações confiáveis tanto para a realização de experimentos em melhores condições, quanto para a medida da distribuição do fluxo de neutrons.

Em princípio, tentou-se construir um protótipo de um detetor SPND baseado no decaimento beta, chamado de detetor de resposta atrasada, e que seria utilizado para o mapeamento do fluxo de neutrons térmicos no reator IEA-R1.

De acordo com as referências /4,6,15,21,22,30,33/, os materiais comumente usados como fio emissor, para este tipo de detetor, são o Ródio e o Vanádio, com diâmetros externos variando de 0,5 a 2,0 mm. No entanto, todo material que emite partículas beta após a ativação do fio emissor e que apresente uma meia-vida da ordem de segundos, é candidato potencial para ser usado como fio emissor em um detetor do tipo SPND baseado no decaimento be

Tentou-se encontrar no mercado nacional fios de Ródio, Vanádio e outros materiais que pudessem ser utilizados como fio emissor em um detetor SPND. Como esses materiais inexitem no mercado nacional, tentou-se adaptar a construção do protótipo SPND aos materiais existentes. Dos materiais citados no capítulo 3, tabelas 3.1 e 3.2, que são utilizados como fio emissor, somente a Platina é que foi encontrada no mercado nacional com as dimensões desejadas, isto é, fios com diâmetros entre 0,5 a 2,0 mm. Assim sendo, um detetor SPND foi projetado com um fio emissor de Platina.

Nas seções seguintes, serão discutidos todos os detalhes referentes ao projeto e construção dos protótipos dos detetores SPND, juntamente com os testes realizados no reator IEA-R1.

5.2 DETETOR SPND - 1º PROTÓTIPO

Devido a dificuldade em se obter no mercado nacional um tubo de alumina sinterizada de pequenas dimensões, que seria utilizado como material isolante, o primeiro protótipo do detetor SPND teve que ser adaptado ao tubo de alumina com a menor espessura de parede existente no mercado. O tubo encontrado mais adequado consistiu de um tubo com quatro furos, sendo o diâmetro de cada furo de 1,2mm, diâmetro externo do tubo de 5,5 mm e comprimento de 100 mm.

Para a construção do primeiro protótipo, era necessário um tubo de aço inox 304 ou Inconel para revestimento do detetor. As dimensões deveriam ser tais que, o tubo de alumina sinterizada pudesse ser colocado dentro deste tubo de Inconel, com uma folga entre os dois não superior a 0,5mm.

Tentou-se conseguir um tubo de aço inox 304 ou Inconel, com um diâmetro interno de 6,0 mm e diâmetro externo de 6,5 mm. O único encontrado no mercado, foi uma amostra com um diâmetro interno de 8,0 mm, diâmetro externo de 10mm e comprimento de 150mm. Assim, o primeiro protótipo foi construído com os materiais encontrados no mercado nacional.

Na tabela 5.1, são apresentados os materiais usados na cons

trução do protótipo, juntamente com as suas dimensões.

Tabela 5.1 - Materiais utilizados na construção do protótipo do detetor SPND.

Materiais Usados	Diâmetro Interno (mm)	Diâmetro Externo (mm)	Comprimento (mm)
Platina	-	1,0	100 e 110
Cabo coaxial RG62A/U	-	6,0	1000
Tubo de aço	8,0	10	120
Cabo coaxial	-	1,5	7000
Fio condutor do cabo coaxial	-	0,2	7000
Tubo de Al_2O_3 sinterizada	1,2 (cada furo)	5,5	100
Junção aço inox	10	14	30
Óxido de Al_2O_3 em pó	-	-	-

5.3 DESCRIÇÃO DA CONSTRUÇÃO DO 1º PROTÓTIPO DO DETETOR SPND.

Para a construção do protótipo, foram utilizados quatro fios de platina (fio emissor) com diâmetros externos de 1,0mm. Três destes fios, apresentaram um comprimento de 100mm e o quarto um comprimento de 110mm, para que pudessem ser soldados no fio condutor do cabo com isolamento mineral.

O cabo com isolamento mineral, utilizado na construção do primeiro protótipo, nos foi fornecido pela Divisão de Física Nuclear, que o utilizava em um detetor do tipo SPND com fio emissor de Ródio. A resistência de isolamento deste cabo foi medida e o valor encontrado foi de 10^6 ohms.

Para a montagem do detetor, os fios de Platina foram colocados nos furos existentes no tubo de alumina sinterizada, e após a colocação foram soldados no fio condutor do cabo com isolamento mineral. Após a soldagem, o tubo de alumina sinterizada foi colocado dentro do revestimento metálico. Em seguida, foi feita a bra

sagem da junção de aço inox entre o revestimento do cabo com isolação mineral e o revestimento do detetor; o espaço restante foi preenchido com óxido de alumínio em pó. A outra extremidade do detetor, foi fechada através de uma peça usinada, que depois foi soldada ao detetor pelo processo de solda prata, a 60% de prata.

Um dos problemas encontrados durante a construção do primeiro protótipo foi com relação a solda dos fios de Platina com o fio condutor do cabo com isolação mineral. O diâmetro externo do fio condutor é de 0,2mm, enquanto que o diâmetro de cada fio de platina é de 1,0mm.

Para se fazer a solda do fio condutor com os quatro fios de Platina, foi utilizado o processo de soldagem micro-plasma de arco transferido, com gás do arco piloto Argônio ultrapuro, e gás de proteção do poço de fusão Argônio 5 (solda). Este processo de soldagem foi escolhido porque permite a soldagem de peças em pequenas dimensões, pois a concentração de calor alcançada na coluna do arco chega a atingir 20.000°C. Como a velocidade de fusão é bastante rápida, evita-se assim que uma grande zona seja termicamente afetada.

Para a soldagem da junção de aço inox entre o revestimento do cabo com isolação mineral e o revestimento do detetor não houve problema. O processo de soldagem utilizado foi solda Prata, a 60% de Prata, atingindo uma temperatura de 700°C.

Na extremidade livre do cabo com isolação mineral, tentou-se adaptar um conector BNC, para que a corrente gerada no detetor pudesse ser conectada nos terminais de entrada do eletrômetro; e a leitura da mesma pudesse ser feita. Devido as dimensões do fio condutor, isto não foi possível. Para se resolver tal problema, fez-se a solda do fio condutor do cabo com isolação mineral com o fio condutor de um cabo coaxial do tipo RG 62A/U. O fio condutor deste cabo é de cobre, dielétrico de polietileno e uma trança de fios de cobre como blindagem^{/19/}, com um diâmetro externo de 6,0mm. A trança de fios de cobre do cabo coaxial foi soldada com o revestimento do cabo com isolação mineral. Na outra extremidade do cabo coaxial RG 62A/U foi adaptado um conector BNC.

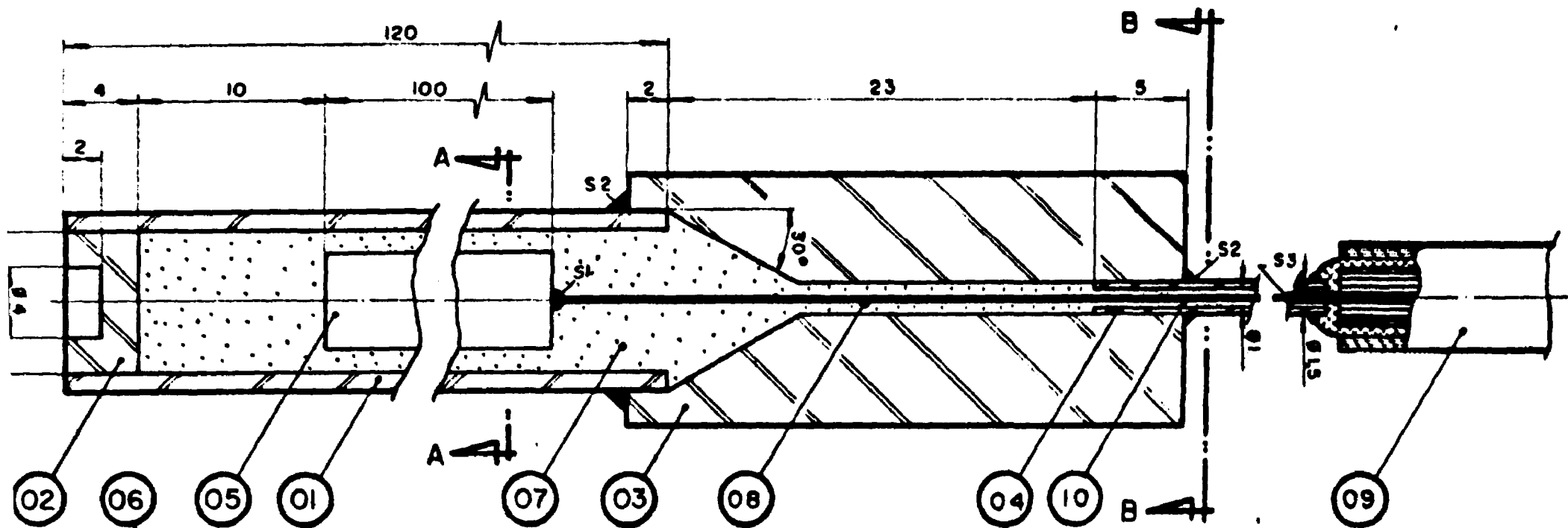
Na figura 5.1, é apresentado o esquema para a construção do primeiro protótipo do detetor SPND. Observa-se o corte longitudinal do detetor de neutrons do tipo SPND, onde são apresentadas as secções transversais do detetor, juntamente com os materiais utilizados para a sua construção. O corte A-A, é a secção transversal da parte ativa do detetor, isto é, os quatro fios emissores de Platina, o tubo de alumina sinterizada com quatro furos e o tubo de aço. O corte B-B, é uma secção transversal do cabo com isolamento mineral, onde pode ser visto o fio condutor de diâmetro 0,2mm, o isolante compactado, que é o óxido de Magnésio e a bainha protetora que é de Inconel. No corte longitudinal do detetor SPND, na figura 5.1, pode ser vista a peça usinada ou junção de aço inox, feita para unir o revestimento do detetor ao revestimento do cabo com isolamento mineral, e também a peça que foi utilizada para fechar a extremidade do detetor.

Pode ser vista na figura 5.1, a posição onde foi feita a soldagem micro-plasma dos fios de Platina com o fio condutor do cabo com isolamento mineral denotada por S1. A soldagem da junção de aço inox com o revestimento metálico do detetor e com o revestimento do cabo com isolamento mineral, também está indicada na figura 5.1, sendo denotada por S2. O ponto S3, indica a posição onde foi feita a solda do fio condutor do cabo coaxial RG62 A/U com o fio condutor do cabo com isolamento mineral.

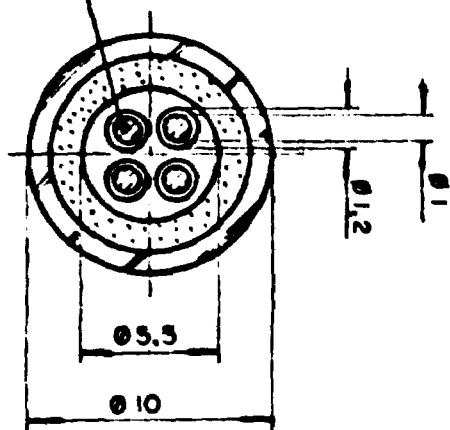
5.4 TESTES FEITOS COM O PRIMEIRO PROTÓTIPO

Para a realização dos testes com o primeiro protótipo do detetor SPND, utilizou-se o reator IEA-R1, operando a um nível de potência de 2Mw.

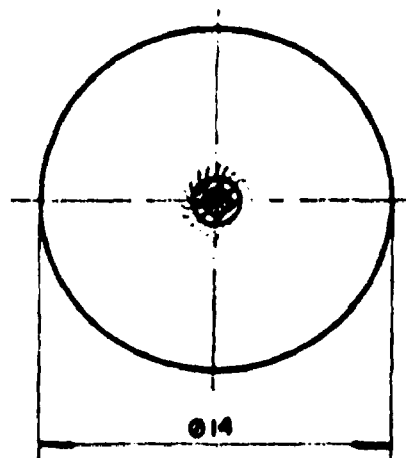
O objetivo principal dos testes realizados era a verificação do funcionamento do protótipo do detetor SPND. A verificação seria feita através da medida da corrente gerada no detetor, quando o mesmo estivesse sujeito a um fluxo de neutrons e gamas. Devido as dimensões do protótipo construído, escolheu-se o elemento de irradiação n937 (mostrado na figura 5.2) para a colocação do detetor. O posicionamento do detetor no núcleo do reator, foi feito através do sistema de guias descrito na secção 4.3.a do capítulo 4.



ESC 8-1



CORTE A-A

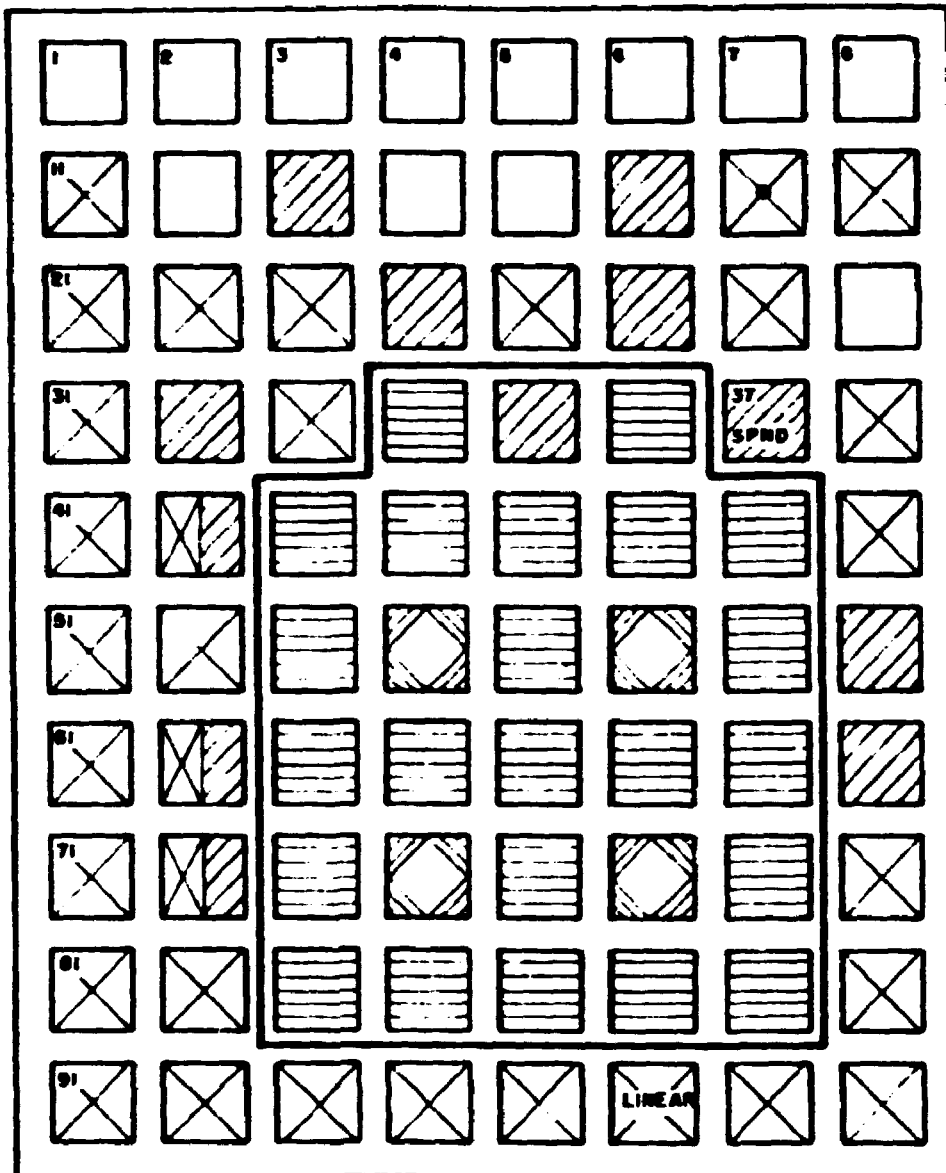


CORTE B-B

10	ÓXIDO DE MAGNÉSIO
09	CABO COAXIAL RG 62A/U
08	FIO CONDUTOR DE INCONEL 600
07	ÓXIDO DE ALUMÍNIO EM PÓ
06	FIO EMISSOR DE PLATINA
05	TUBO DE ALUMINA SINTERIZADA
04	TUBO DE INCONEL 600
03	JUNÇÃO DE AÇO INOX
02	PEÇA USINADA DE AÇO INOX
01	TUBO DE AÇO
Item	Descrição

Figura 5.1 - Primeiro protótipo do detetor SPND construído.

PLACA MATRIZ



LEGENDA

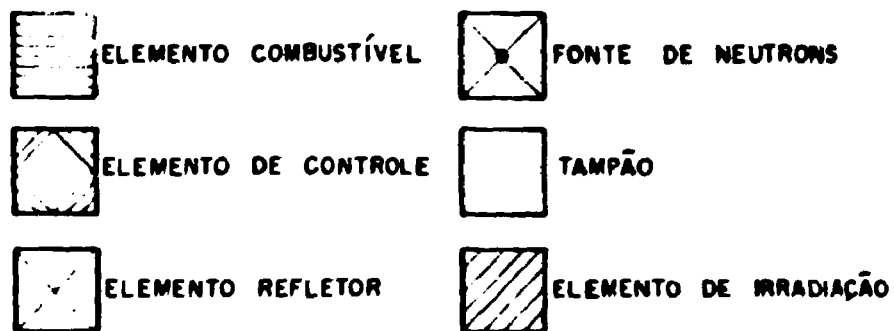


Figura 5.2 - Posição ocupada pelo protótipo durante a realização dos testes no reator IEA-R1.

Para a realização dos testes, o detetor foi colocado no elemento de irradiação nº 37, e a potência do reator foi aumentada de 0 a 2Mw. A monitoração da corrente gerada no detetor, foi feita durante todo o tempo de permanência destes, no núcleo do reator, que foi de vários dias.

Os testes realizados com esse protótipo, mostraram que o mesmo não possuía a sensibilidade necessária para fornecer uma indicação de corrente, no instrumento de medida utilizado. A corrente permaneceu nula durante todas as variações de potência do reator. O instrumento de medida utilizado foi um eletrômetro marca Keithley, modelo 610C, que foi operado nas mesmas condições citadas na secção 4.3.a do capítulo 4.

Vários fatores podem ser citados como causas do não funcionamento do protótipo do detetor SPND: a grande espessura da parede do tubo de alumina e do tubo de aço; o ponto de soldagem dos quatro fios de Platina com o fio condutor do cabo com isolamento mineral; a soldagem do fio condutor do cabo com isolamento mineral com o fio condutor do cabo coaxial RG 62A/U.

O primeiro fator pode ter impedido que os elétrons fossem coletados no revestimento para dar origem a corrente gerada no detetor. Devido a grande diferença existente entre o diâmetro do fio condutor ($\phi = 0,2\text{mm}$, com os quatro fios de Platina $\phi = 1\text{mm}$ cada fio), a solda neste ponto torna-se muito frágil, e com o manuseio do detetor, esta pode romper-se facilmente sem que isso seja notado, apesar de que cuidados especiais para a soldagem neste ponto terem sido tomados. No momento em que o detetor SPND foi retirado do núcleo do reator, notou-se que a solda entre o fio condutor do cabo com isolamento mineral e o fio condutor do cabo RG62A/U estava rompida (posição S_3 indicada na figura 5.1).

Uma análise mais detalhada, para se tentar descobrir as possíveis causas do não funcionamento do detetor, não pode ser feita devido a alta taxa de dose no detetor ($> 2000 \mu\text{S}_v$) e no cabo com isolamento mineral ($> 1000 \mu\text{S}_v$), que impedia o manuseio de ambos.

Decidiu-se então, que um novo protótipo fosse construído, tentando eliminar os problemas que foram encontrados durante a

construção do primeiro protótipo. Desta vez, utilizaria-se apenas um fio de Platina (fio emissor), com diâmetro externo de 1,0mm, reduzindo o problema da soldagem com o fio condutor do cabo com isolação mineral.

Como material isolante, seria utilizado uma fita de Teflon enrolada ao redor do fio emissor, atenuando assim o problema da espessura da parede do material isolante. Não se dispõe de dados a respeito do Teflon quando usado em detectores do tipo SPND, mas de acordo com as referências /15,20,33/, este tipo de material po de vir a ser usado em detectores SPND, razão pela qual optou-se por este material.

5.4 DETETOR SPND - 2º PROTÓTIPO

Na construção do segundo protótipo do detector SPND, utili zou-se como fio emissor, a Platina, com um diâmetro de 1,0mm e com primento 120mm; como material isolante uma fita de Teflon que foi enrolada ao redor do fio de Platina; como revestimento, um tubo de aço inox 304 com diâmetro interno de 1,8mm, diâmetro ex terno de 2,39mm e comprimento de 150mm e o cabo com isolação mine ral utilizado na construção do primeiro protótipo. Não se dispu nha de verbas para a compra de um outro cabo com isolação mine ral. Para a utilização desse cabo, foi necessário a espera de vários dias, para que a dose apresentada pelo cabo diminuísse para um va lor tal que pudesse ser manuseado.

5.5 DESCRIÇÃO DA CONSTRUÇÃO DO 2º PROTÓTIPO DO DETETOR SPND

Os procedimentos para a construção do segundo protótipo fo ram os mesmos utilizados para a construção do primeiro protótipo. O fio de platina foi soldado no fio condutor do cabo com isolação mineral, através do processo de soldagem micro-plasma. Em seguida, a fita de Teflon foi passada ao redor do fio emissor e esse con junto foi inserido no tubo de aço inox 304. A seguir, foi feita a brasagem da junção de aço inox 304 com o revestimento do detector e com o revestimento do cabo com isolação mine ral. Na extremidade livre do cabo com isolação mine ral, foi feita a soldagem do fio

condutor com o fio condutor de um cabo coaxial do tipo RG 174/U (diâmetro externo do cabo é de 2,6mm). A trança de fios de cobre foi soldada no revestimento do cabo com isolamento mineral. A outra extremidade do detetor foi fechada por um simples ponto de solda.

Na figura 5.3, é apresentado o esquema do 2º protótipo de detetor SPND construído e os materiais utilizados na sua construção.

É mostrado na figura 5.3, o corte A-A, que é a secção transversal da parte ativa do detetor, ou seja, aquela que contém o material emissor, que neste caso é um fio de Platina de diâmetro 1,0mm. Observa-se também no corte A-A, o material isolante (fita de Teflon enrolada ao redor do fio emissor) e o revestimento metálico do detetor. O corte B-B, é a secção transversal do cabo com isolamento mineral.

Os pontos de união por solda do fio de Platina com o fio condutor do cabo com isolamento mineral, e da junção de aço inox com o revestimento do detetor e o cabo com isolamento mineral, estão indicados por S_1 e S_2 , respectivamente.

A extremidade livre do detetor, que foi fechada por um simples ponto de solda, está indicada por S_3 . A posição S_4 indica a soldagem do fio condutor do cabo com isolamento mineral com o condutor do cabo coaxial RG 174/U.

Na tabela 5.2 estão indicados os materiais utilizados na construção e suas respectivas dimensões.

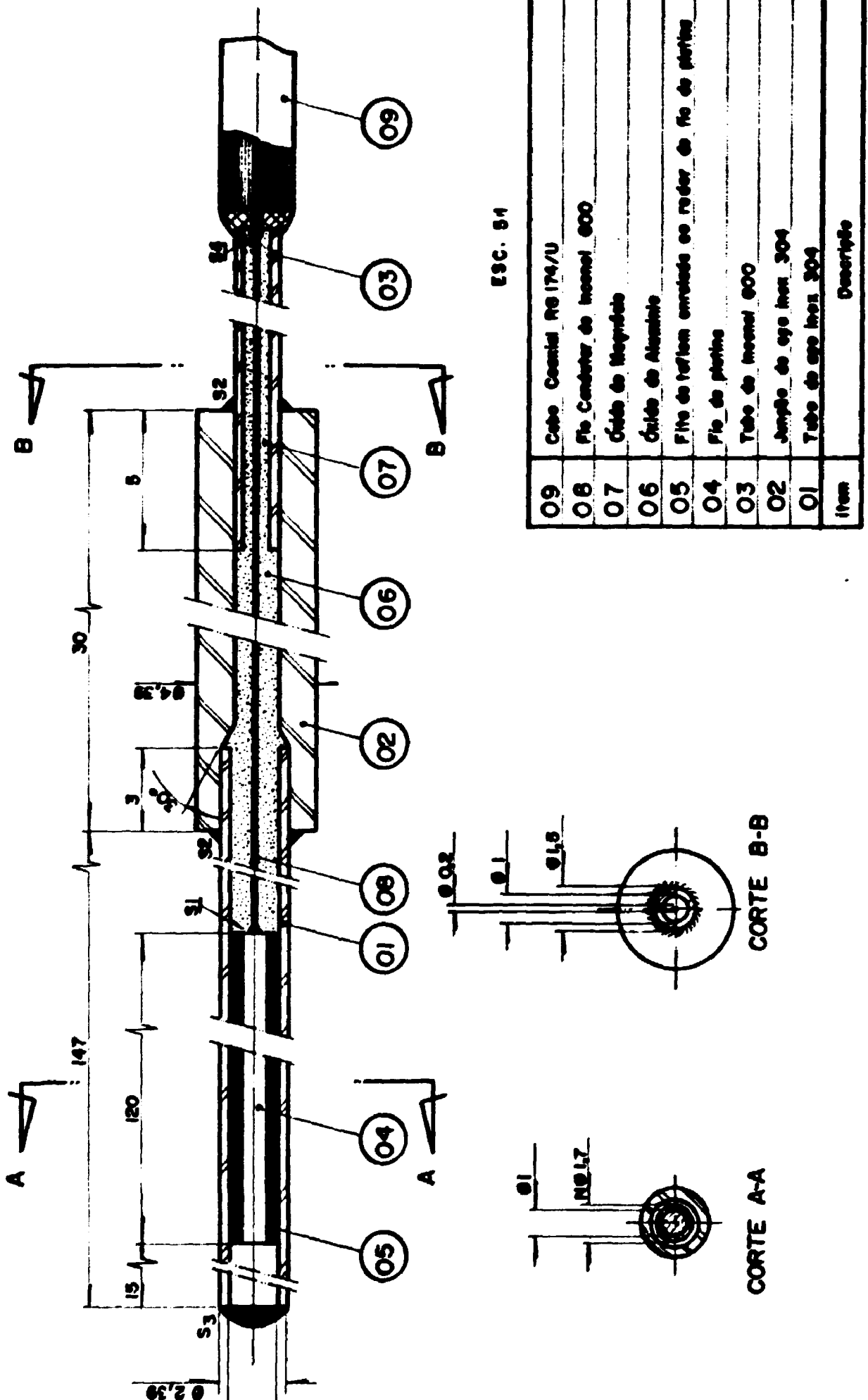


Figura 5.3 - Segundo protótipo do detector SPND construído

Tabela 5.2 - Materiais utilizados na construção do segundo protótipo.

Materiais Usados	Diâmetro Interno (mm)	Diâmetro Externo (mm)	Comprimento (mm)
Platina	-	1,0	120
Tubo de Aço	1,8	2,39	150
Cabo coaxial com isolamento mineral	-	1,0	6500
Fio condutor do cabo coaxial	-	0,2	6500
Fita de Teflon	-	-	-
Junção de aço inox	2,39	4,39	30
Cabo coaxial RG174/U	-	2,6	400

5.6 TESTES REALIZADOS COM O SEGUNDO PROTÓTIPO

Os testes com o segundo protótipo construído foram realizados no reator IEA-R1, operando em uma potência de 2Mw.

O objetivo, como anteriormente, seria medir a corrente gerada no detector em função da variação do fluxo de neutrons e gamas no núcleo do reator. O detector foi colocado no elemento de irradiação nº 37 (vide figura 5.2), num local onde a intensidade do fluxo de neutrons é da ordem de 10^{11} n/cm² s^{/10/}. Novamente, os testes mostraram que o segundo protótipo não fornecia nenhuma indicação de corrente no eletrômetro, ou seja, a corrente permaneceu nula com a variação do fluxo de neutrons e gamas.

Vários fatores podem ser citados para explicar o porque do seu não funcionamento, e entre eles, a resistência de isolamento entre o condutor central e o revestimento do cabo com isolamento mineral. De acordo com as referências^{/20,37/}, a redução da resistência de isolamento é causada pela presença de água absorvida pelo óxido de magnésio, causando a corrosão no cabo quando é usado por um longo tempo. Isso resulta na transmissão do sinal do detector até o instrumento de medida de uma maneira não confiável, podendo contribuir para o não funcionamento do segundo protótipo.

Outro fator a ser citado, é a utilização da fita de Teflon como material isolante, que esteve exposto a um fluxo integrado de 10^{18} n/cm². De acordo com a referência /6,15,37/, o Teflon quando exposto continuamente a altos campos de radiação, sofre danos de radiação e perde suas características de material isolante.

5.7 SUGESTÕES PARA A CONSTRUÇÃO DE UM DETETOR DO TIPO SPND

Durante a fase de desenvolvimento e construção dos protótipos dos detetores SPND, vários problemas foram constatados, e entre eles, a falta no mercado nacional de alguns materiais que são utilizados na construção de detetores SPND. É o caso de fios de Ródio e Vanádio, conectores apropriados para cabos com isolamento mineral, micro tubos de Inconel e aço inox 304 com diferentes diâmetros e espessuras de parede, e também tubos de alumina sintetizada de pequenas dimensões. Devido a inexistência desses materiais, a construção do primeiro protótipo do detetor SPND foi adaptada àqueles materiais existentes no mercado nacional.

Além disso, outro problema encontrado foi com relação a montagem do primeiro protótipo do detetor SPND. O processo de soldagem dos fios de Platina com o fio condutor do cabo com isolamento mineral, apresentou problema devido a grande diferença de diâmetro existente entre os fios soldados (quatro fios de Platina com diâmetro de 1,0mm cada, com o fio condutor com um diâmetro de 0,2mm).

Vários processos de soldagem foram testados, e o escolhido entre eles, foi o processo por soldagem micro-plasma devido as vantagens apresentadas por este processo em relação aos demais. Este problema foi minimizado na construção do segundo protótipo, pois ao invés da utilização de quatro fios de Platina, utilizou-se apenas um com um diâmetro externo de 1,0mm e comprimento de 120mm.

Outro problema encontrado, foi com relação a falta de recursos para a aquisição de materiais necessários para a construção dos detetores SPND. Por essa razão, cabos com isolamento mineral e conectores não apropriados foram utilizados na construção dos dois protótipos; usou-se cabos coaxiais RG62 A/U e RG 174/U para que um conector BNC pudesse ser adaptado para a leitura da corren

te gerada no detetor.

Baseados na experiência obtida na construção dos dois protótipos, e na dificuldade de se conseguir os materiais apropriados no mercado nacional, propõe-se então que a construção de um detetor de neutrons do tipo SPND siga o esquema mostrado na figura 5.4.

Observa-se na figura 5.4, o corte longitudinal do detetor SPND, onde são apresentados os materiais selecionados para a sua construção. Na figura 5.4 são também mostrados os cortes A-A, B-B, que representam as secções transversais da parte ativa do detetor e do cabo com isolamento mineral, respectivamente.

Nesta concepção, esquematizada na figura 5.4, propõe-se a utilização de um fio de Platina como fio emissor, com diâmetro de 0,10mm e comprimento ativo de 120mm; um tubo de alumina sinterizada com diâmetro interno de 1,2mm, diâmetro externo de 1,7mm e comprimento de 120mm e um tubo de aço inox 304 com diâmetro interno e externo de 1,8 e 2,39mm respectivamente, com comprimento de 150mm. Desta maneira, eliminam-se os problemas encontrados na construção do primeiro e segundo protótipos com relação a soldagem dos fios de platina com o condutor do cabo coaxial pois, utiliza-se apenas um fio como emissor.

Nesta concepção, sugere-se que a espessura do material isolante seja de 0,25mm, possibilitando assim, que os elétrons originados no emissor atravessem o isolante e sejam coletados no revestimento, para dar origem a corrente do detetor. Com relação a espessura do revestimento ou coletor, propõe-se, devido as mesmas razões, que esta seja de - 0,3mm.

Portanto, para a construção de um protótipo de um detetor de neutrons do tipo SPND de resposta pronta, será preciso a aquisição dos materiais especificados na tabela 5.3.

Conviém salientar, que seria necessário também, a aquisição de conectores apropriados para cabos com isolamento mineral.

A título de informação, no Apêndice A estão relacionados

os materiais que foram

concepção proposta para a construção do detetor.

fabricação do detetor proposto.

Tabela 5.3 - Materiais necessários para a construção do detetor SPND.

Materiais	Diâmetro Interno (mm)	Diâmetro Externo (mm)	Comprimento (mm)
Platina	-	1,0	120
Tubo de aço inox 304	1,8	2,39	150
Tubo de alumina sinterizada	1,2	1,7	120
Cabo com isolamento mineral	-	1,5	10.000
Fio condutor do cabo coaxial	-	0,2	10,000

Assim, com a seleção apropriada dos materiais empregados como emissor, isolante, revestimento e também do cabo para a transmissão do sinal gerado no emissor, as possibilidades para o perfeito funcionamento do detetor são maiores. Isto facilitaria a obtenção de resultados precisos, quando estes detetores fossem usados para a determinação da distribuição do fluxo de neutrons térmicos e também quando usados em sistemas de controle e proteção de reatores nucleares.

APÊNDICE A - RELAÇÃO DAS EMPRESAS NACIONAIS QUE FORNECEM OS MATERIAIS PARA A CONSTRUÇÃO DE DETETORES SPND.

Os fios de Platina nuclearmente pura, utilizados como material emissor, são fornecidos pela Degussa S.A. - Divisão Metal - São Paulo, com diâmetros a partir de 0,5mm.

Os tubos de alumina sinterizada, utilizados como isolante, podem ser adquiridos na cidade de São Carlos - SP, na empresa Cetebra (Cerâmica Técnica Brasileira Ltda), que a partir de abril de 1985 passou a produzir tubos de alumina sinterizada em pequenas dimensões.

Os micro tubos de Inconel 600, não são encontrados no mercado nacional, sendo que para a sua utilização é necessário a sua importação. O mercado nacional dispõe de micro-tubos de aço inox 304, que podem perfeitamente serem usados como revestimento de um detetor SPND. Esses tubos podem ser encontrados na Açomed - Indústria e Comércio de Aços S.J.T. - São Paulo - SP e A.M. Comércio de Aços Metais Indústria Ltda - São Paulo - SP.

O cabo com isolamento mineral também é encontrado no mercado nacional, sendo fornecido pela ECIL S.A. - Produtos e Sistemas de Medição e Controle em São Paulo (SP). O fio condutor é de aço inox, a isolamento de óxido de Magnésio e a bainha protetora de aço inox, chegando a atingir um diâmetro externo de 1,0mm.

BIBLIOGRAFIA

1. ALLAN, C.J. A new self-powered flux detector. Chalk River, Atomic Energy of Canada, Nov. 1979. (AECL-6681).
2. ALLAN, C.J. Experimental measurements of neutron and gamma ray sensitivities of flux detectors having a mixed response. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS29(1):660-4, 1982.
3. ALLAN, C.J. Response characteristics of self-powered flux detectors in CANDU reactor. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Nuclear power plant control and instrumentation: proceedings of an international symposium...held in Cannes, 24-28 April 1978. Viena, 1978. V.1, p.325-337.
4. 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. Chalk River, Atomic Energy of Canada, Sept. 1980. (AECL-6957).
5. BOECH, H. & SULEIMAN, M. Development and tests of a self-powered neutron detector with a fissile emitter. IN : INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Nuclear power plant control and instrumentation: proceedings of a international symposium...held in Cannes, 24-28 April 1978. Viena, 1978. V.1, p.291-299.
6. BOLAND, J.F. Neutron and gamma flux measurements. In: BOLAND, J.F. Nuclear reactor instrumentation (incore). New York, Gordon and Breach, 1970. cap. 9, p.156-68.
7. CABOS de isolação mineral nacionais. Dirig. Industr., 26(13): 37, 1985.
8. COELHO, P.R. Comunicação pessoal.
9. ENDLER, A.; BOHME, K.; STEIN, H. Investigation of the signal composition of self-powered detectors. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Nuclear power plant control and

- instrumentation: proceedings of an international symposium ...held in Cannes, 24-28 April 1978. Vienna, 1978. V.1, p.301-8.
10. FRAJNDLICH, R. Comunicação pessoal.
 11. FRENCH, P.M.; KROON, J.C.; SHIELDS, R.B. Platinum self-powered detector response in a simulated boosted CANDU lattice. Trans. Am. Nucl. Soc., 17:448-9, 1973.
 12. GOLDSTEIN, N.P. A comparison between calculated and measured neutron sensitivities of a Pt self-powered detector. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS25(1):292-5, 1978.
 13. GOLDSTEIN, N.P. A Monte Carlo calculation of the neutron sensitivity of self-powered detectors. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS20(1):549-56, 1973.
 14. HALL, D.S. Monte Carlo simulation of self-powered flux detector. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS29(1):646-50, 1982.
 15. HILBORN, J.W. Self-powered neutron detectors for reactor flux monitoring. Nucleonics, 22(2):69-74, 1964.
 16. HOLLAND, L. Comunicação pessoal.
 17. JASCHIK, W. & SEIFRITZ, W. Model for calculating prompt-response self-powered neutron detectors. Nucl. Sci. Eng., 53:61-78, 1974.
 18. KENDOUSH, A.A.; AL-JABORI, S.M.; AHMED, H.H.; MOHAMED, H.Z. Performance of platinum self-powered neutron detectors in the simulated conditions of a pressurized water reactor. Atomkernenerg. Kerntech., 42(3):174-6, 1983.
 19. KNOLL, G.F. Radiation detection and measurement. New York, Wiley, 1979. cap. 14, p.517-50, cap. 16, p.599-635.

20. KROON, J.C.; SMITH, F.M.; TAYLOR, R.I. Self-powered flux detectors: status and prospects. Trans. Am. Nucl. Soc., 23:459-60, 1976.
21. LEDERER, C.M.; HOLLANDER, J.M.; PERLMAN, I. Table of isotopes. 6.ed. New York, Wiley, 1967.
22. LOOSEMORE, W.R. & KNILL, G. Design and performance of miniature primary emission neutron activation detectors for spatial distribution measurements of neutrons in reactors. In: CENTRAL ELECTRICITY GENERATING BOARD. Radiation measurements in nuclear power: proceedings of international conference...held in Berkeley, Sept. 1966. London, Institute of Physics and Physical Society, 1966. p.430-9. (Institute of Physics and Physical Society conference series, 2).
23. LYNCH, G.F. The basic concepts of a fuel power detector for nuclear power reactors. Chalk River, Atomic Energy of Canada, Jan. 1979. (AECL-6403).
24. LYNCH, G.F.; SHIELDS, R.B.; COULTER, P.G. Characterization of platinum self-powered detectors. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS24(1):692-5, 1977.
25. MESTNIK F?, J. A distribuição espacial do fluxo de neutrons no núcleo do reator IEA-R1, obtida por meio da ativação de folhas. São Paulo, 1978. (Dissertação de mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo).
26. PRICE, W.J. Nuclear radiation detection. 2.ed. New York, MacGraw Hill, 1964.
27. RADIATION detector: in core radiation detector. Pittsburgh, Pa., Westinghouse, Sept. 1969. p.9. (Catálogo comercial).
28. RELATÓRIO de análise de segurança do reator IEA-R1 modificado. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, 1974.
29. 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.
30. SELF-POWERED flux detectors. Cambridge, Reuter-Stokes Canada, s.d. (Catálogo comercial).
 31. SHIELDS, R.B. A platinum in-core flux detector. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS20(1):603-8, 1973.
 32. SOVKA, J.A. Response of cobalt neutron flux detectors. Chalk River, Atomic Energy of Canada, Jun. 1969. (AECL-3368).
 33. STEVENS, H.H. Neutron sensors-in-core. In: HARRER, J.M. & BECKERLEY, J.G. eds. Nuclear power reactor instrumentation systems handbook. Washington, D.C., U.S. Atomic Energy Commission, Technocal Information Center, 1973. v. 1, cap. 3, p.42-56. (TID-25952-P1)
 34. TANGARI, C.M. Montagem de um sistema para mapeamento do núcleo com detetor miniatura. São Paulo, IPEN-CNEN/SP. Relatório interno).
 35. TANGARI, C.M.; MOREIRA, J.M.L.; JEREZ, R. Mapeamento de fluxo térmico no reator IEA-R1. São Paulo, 1986. Publicação IPEN 93.
 36. WARREN, H.D. Computational model for self-powered neutron detector. Nucl. Sci. Eng., 48(3):331-42, 1972.
 37. WARREN, H.D. Depletion characteristics of beta decaying SPNDs. Trans. Am. Nucl. Soc., 23:460-461, 1976.
 38. WARREN, H.D. & SHAH, N.H. Neutron and gamma-ray effects on self-powered in-core radiation detectors. Nucl. Sci. Eng. 54(4):395-415, 1974.