

NUCLEBRÁS

Empresas Nucleares Brasileiras SA

PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM
DETECTOR DE NÉUTRONS TIPO "SELF-POWERED"

Ricardo Ferracini Corrêa

NUCLEBRÁS/CDTN - 589

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR

CAIXA POSTAL, 1941 - 30.000 - BELO HORIZONTE - BRASIL

**EMPRESAS NUCLEARES BRASILEIRAS S.A. - NUCLEBRÁS
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE REATORES**

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM
DETECTOR DE NÉUTRONS TIPO "SELF-POWERED"**

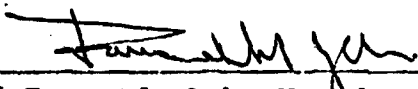
Ricardo Ferracini Corrêa

**NUCLEBRÁS/CDTN-589
Belo Horizonte
1987**

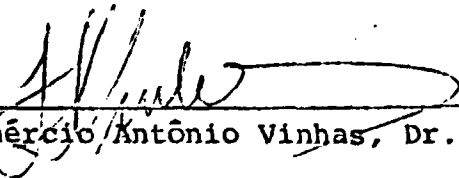
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: "Projeto, Construção e Teste de um Detector de Nêutrons Tipo "Self-Powered".

NOME DO AUTOR : Ricardo Ferracini Corrêa

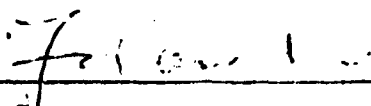
Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora, constituída dos Senhores:



Prof. Fernando Lobo Vaz de Mello, Dr.



Prof. Laércio Antônio Vinhas, Dr.

Orientador: 

Fis. João Bernardino da S.M. Pombo, Mestre

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Tecnologia das Centrais Nucleares

Belo Horizonte, 11 de setembro de 1987
(Data defesa dissertação)

Este trabalho foi realizado nas instalações do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear e constitui tarefa do Departamento de Tecnologia de Reatores - Divisão de Testes - Laboratório de Física de Reatores - NUCLEBRÁS

À Kátia, Marcelo e
Daniel

AGRADECIMENTOS

- ao Físico João Bernardino da S.M.Pombo, orientador e Myrian de Carvalho Paiano, Chefe do Laboratório de Física de Reatores, pela colaboração valiosa e críticas construtivas;

- às Empresas Nucleares Brasileiras S.A. - NUCLEBRÁS e ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear-CDTN, pela realização deste trabalho em suas dependências;

- ao pessoal do Laboratório do Reator, pela operação durante as medidas;

- à Divisão de Tecnologia do Combustível, pelo fornecimento de material;

- à Divisão de Estudos Minerais e Divisão de Ensaios e Técnicas de Soldagem pelas análises efetuadas;

- ao Engenheiro Luiz Fontoura Lorenzoni pelas sugestões e colaboração no decorrer do trabalho;

- à Marcia Maria Costa de Castro pelo trabalho de datilografia;

- a Daniel Funghi de Souza pela confecção dos desenhos;

- ao pessoal da Seção de Documentação Técnica, pela eficiência na obtenção da bibliografia solicitada;

- ao pessoal da Seção de Comunicação e Reprografia pelos serviços de impressão;

- a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho,

Obrigado

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
RESUMO	1
ABSTRACT	2
I. INTRODUÇÃO	3
II. ASPECTOS TEÓRICOS	10
II.1 Princípios de Funcionamento	10
II.2 Modelo Matemático	12
II.3 Composição do Sinal dos Detectores "SPN"	15
II.3.1 Sinal pronto devido a nêutrons	16
II.3.2 Sinal atrasado devido a nêutrons	17
II.3.3 Sinal gama	18
II.4 Relação de Queima do Detector	20
II.5 Cabo de Conexão do Detector ao Circuito de Processamento de Sinal	21
II.5.1 Correntes induzidas no cabo pela radiação	22
II.5.2 Dependência da resistência elétrica do cabo com a temperatura e radiação	24
II.6 Influência da Resistência de Isolamento do Conjunto no Sinal de Medida	25
III. CONSTITUIÇÃO DO CONJUNTO "SPN"	40
III.1 Detectores	40
III.2 Cabo de Ligação do Detector ao Circuito de Medida	43
III.3 Circuito Eletrônico de Processamento do Sinal	43
IV. TESTES E CALIBRAÇÕES COM O SEGUNDO PROTÓTIPO	51
IV.1 Testes com o Detector	51
IV.1.1 Testes de verificação da montagem	51
IV.1.2 Testes de desempenho operacional	53

IV.2	Testes com o Circuito Eletrônico de Processamento de Sinal	56
IV.3	Testes com o Cabo de Sinal	57
IV.4	Calibrações	58
IV.4.1	Determinação da sensibilidade gama	58
IV.4.2	Determinação da sensibilidade a nêutrons têrmicos	59
V.	ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	91
	REFERÊNCIAS	96

LISTA DE TABELAS
E ANEXO

	<u>Pág.</u>	
Tabela II.1	Dados neutrônicos de entrada para cálculo da taxa de captura de nêutrons	30
Tabela II.2	Parâmetros de cálculo do detector de cobalto [11]	31
Tabela II.3	Energias e intensidades de raios gama de captura de nêutrons térmicos no cobalto até 1,85 MeV [12]	34
Tabela II.4	Valores de queima para três tipos de detectores "SPN" [16]	37
Tabela III.1	Dados e dimensões dos materiais utilizados nos dois protótipos	47
Tabela III.2	Dados levantados sobre o cabo Pirelli ICD-50	49
Tabela IV.1	Testes de resposta do conjunto "SPN" ao "Background" ambiente e fluxo gama do reator IPR-R1 desligado	69
Tabela IV.2	Resumo das medidas de corrente e tensão de saída do circuito eletrônico de processamento de sinal	75
Tabela IV.3	Calibração do circuito eletrônico em bancada	83
Tabela IV.4	Valores medidos para obtenção da sensibilidade gama do "SPN"	89
Tabela IV.5	Valores medidos para obtenção da sensibilidade do "SPN" a nêutrons térmicos	90
Tabela V.1	Comparação das sensibilidades gama e a nêutrons de detectores "SPN" com emissor de cobalto e geometria cilíndrica	95
Anexo IV.1	Certificado de análise de uma amostra do revestimento do detector "SPN"	62

LISTA DE FIGURAS

		<u>Pág.</u>
Figura I.1	Esquema típico de um conjunto de medição com detector "SPN"	8
Figura I.2	Detalhe do "SPN"	9
Figura II.1	Diagrama esquemático da composição da corrente do detector "SPN"	28
Figura II.2	Localização (d_p) do pico de potencial da carga espacial dentro do isolador de um detector coaxial [12]	29
Figura II.3	Diagrama esquemático dos sentidos das correntes no detector "SPN" e cabo	32
Figura II.4	Diagrama esquemático do decaimento do Co^{60} após captura de nêutron no Co^{59} [15]	33
Figura II.5	Diagrama esquemático do decaimento do Co^{61} após captura de nêutron no Co^{60}	35
Figura II.6	Sentido da corrente gama líquida de um "SPN" em função do número atômico do material do emissor [19]	36
Figura II.7	Dependência da resistência de isolamento de um conjunto "SPN" com isolador de óxido de magnésio em função da temperatura e radiação	38
Figura II.8	Diagrama elétrico de amplificação de corrente do conjunto "SPN"	39
Figura III.1	Corte transversal do protótipo I	45
Figura III.2	Corte transversal do protótipo II	46
Figura III.3	Protótipo I do "SPN" montado	48
Figura III.4	Componentes do protótipo II do "SPN"	48
Figura III.5	Diagrama em blocos do circuito eletrônico do "SPN"	50

Figura IV.1	Radiografias do detector "SPN" incluindo o conector	61
Figura IV.2	Detector "SPN" - PM - Esquema para espectrometria gama	63
Figura IV.3	Espectro gama do "SPN" (Posição = 8 cm)	64
Figura IV.4	Espectro gama do "SPN" (Posição = 16 cm)	65
Figura IV.5	Espectro gama do "background" ambiente	66
Figura IV.6	Esquema do circuito de medição com pico amperímetro	67
Figura IV.7	Corte vertical do núcleo do IPR-R1 mostrando os dois locais de posicionamento do "SPN"	68
Figura IV.8	Tensão de saída do circuito eletrônico do "SPN" em função da potência registrada pelo canal linear do reator IPR-R1 (De 0 a 1 kW)	70
Figura IV.9	Tensão de saída do circuito eletrônico do "SPN" em função da potência registrada pelo canal linear do reator IPR-R1 (De 0,5 a 10 kW)	71
Figura IV.10	Corte horizontal do reator Triga	72
Figura IV.11	Tensão de saída do circuito eletrônico do "SPN" em função da potência registrada pelo canal linear do reator IPR-R1 (De 1 a 100 kW)	73
Figura IV.12	Registro do sinal do canal linear do reator IPR-R1 e da corrente do "SPN"	74
Figura IV.13	Tensão de saída do circuito eletrônico em função da corrente do "SPN"	76
Figura IV.14	Teste de estabilidade da resposta do "SPN"	77

Figura IV.15	Teste de tempo de resposta do "SPN" para inserções de reatividade positiva e negativa	80
Figura IV.16	Tensão de saída do circuito eletrônico em função da corrente do "SPN" na entrada teste em bancada	84
Figura IV.17	Tensão de saída do circuito eletrônico em função da corrente de compensação do cabo na entrada-Teste em bancada	85
Figura IV.18	Análise por espectrometria de raios-X de uma amostra do cabo bifilar	86
Figura IV.19	Espectro gama de uma amostra irradiada do cabo bifilar	87
Figura IV.20	Espectro gama do "Background" ambiente	88

RESUMO

São descritos o projeto, construção e testes de um detector de nêutrons tipo "self-powered" ("SPN"), bem como a eletrônica associada. Foram feitos diversos testes, obtendo-se informação sobre as propriedades dielétricas do detector e cabo, espectros gama induzidos no detector pela irradiação em reator, resposta do detector às variações de fluxo de nêutrons, estabilidade e reprodutibilidade da corrente com o fluxo de nêutrons. Foi estimada também sua sensibilidade a radiação gama e a nêutrons usando, respectivamente, dosímetros termoluminescentes e folhas de ouro como referências. Os resultados dos testes são apresentados e mostram que a resposta do detector é confiável. As sensibilidades gama e a nêutrons concordam com as encontradas na literatura disponível. Entretanto, um cabo com isolamento cerâmico deverá ser empregado para utilização permanente em um reator. Os testes foram executados no reator TRIGA Mark I de 100 kW do Centro do Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear da NUCLEBRÁS, em Belo Horizonte.

ABSTRACT

The design, construction and testing of a self-powered neutron detector (SPN) and associated electronics are described. Several tests were performed giving information about dielectrical properties of detector and cable, gamma spectra induced in the detector through reactor irradiation, detector response as a function of neutron flux, current stability and reproductibility with the neutron flux. The gamma and neutron sensitivities were also evaluated, by means of thermoluminescent dosimeters and gold foils as references. The test results are presented and show that the detector response is reliable. The gamma and neutron sensitivities are in agreement with those found in the available literature. Nevertheless, a ceramic insulated cable should be employed for permanent use in a reactor. The tests were performed in a 100 kW TRIGA Mark I reactor at the Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear of NUCLEBRAS, in Belo Horizonte, Brazil.

I. INTRODUÇÃO

Os detectores auto-alimentados ("Self-powered") vem sendo crescentemente utilizados como instrumentação do núcleo ("in-core") em reatores nucleares de potência tanto para mapeamento de fluxo como para monitoração de segurança contra excesso de queima ("burnup") no combustível [1-4].

A configuração típica de um detector deste tipo é coaxial, consistindo de um eletrodo interno chamado emissor e um eletrodo externo (em geral a própria carcaça ou revestimento) chamado coletor. Separando os dois eletrodos existe um material isolante, usualmente óxido de alumínio ou magnésio.

Um cabo transmite a corrente formada no detector até um circuito eletrônico de amplificação e processamento do sinal. Em geral, o cabo de ligação é bifilar, utilizando-se o segundo condutor para um circuito de eliminação das correntes indesejáveis formadas no próprio cabo, estabelecendo-se o chamado circuito de compensação. Por meio deste circuito, a corrente formada no cabo pela radiação é subtraída eletronicamente da corrente total (detector + cabo), resultando somente a parcela correspondente ao detector para o estágio de medição. A Figura I.1 esquematiza esse processo de compensação de forma simplificada.

Estes detectores podem ser classificados em dois grandes grupos dependendo do material utilizado nos eletrodos: detectores gama que respondem principalmente ao campo de raios gama do reator através de interações (γ, e) e os detectores de nêutrons que respondem preponderantemente ao campo neutrônico através de reações (n, β) ou (n, γ, e) [3-7].

Os detectores gama podem utilizar, como material para o emissor, chumbo, zircônio, inconel-600 e magnésio.

Os detectores de nêutrons auto-alimentados, chamados simplesmente "SPN", podem ainda, dependendo do tempo de resposta, serem classificados como prontos ou atrasados. Entre os primeiros incluem-se os de emissor de cobalto, gadolínio, platina, érbio, háfnio e cádmio, e entre os segundos, vanádio, ródio e prata.

Existem ainda detectores "SPN" utilizando urânio-235 como material para o emissor, consistindo assim câmaras de fissão sólidas tipo "Self-powered" [8,9].

Dependendo do país, os detectores "SPN" receberam uma variedade de denominações tais como: "Collectrons", "Strom elemente", "Neutronen-Betadetektoren", "PENA-(Primary Emission Neutron Activation) Detectors", "DCD- Détecteur a Charge Directe", "EDN" (Electron Emissive Neutron Detector), "SPND" e "Hilborn-Detektor", porém a designação "SPN" vem sendo consagrada nos últimos tempos.

De um modo geral, as principais vantagens dos "SPN" são [10]:

- baixo custo,
- simplicidade de operação e instrumentação de leitura,
- precisão e confiabilidade,
- baixa queima e longa vida,
- aptidão para operação contínua em ambiente de alto fluxo e temperatura,
- reprodutibilidade das características de saída do detector.

O presente trabalho, desenvolvido nas dependências do CDTN-Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear da NUCLEBRÁS, originou-se de uma conjunção de fatores motivadores que são apresentados a seguir:

- inexistência desse tipo de detector no CDTN,
- interesse em se conhecer e utilizar tal detector em face de seu crescente emprego nos reatores de potência em todo o mundo e em particular nos reatores PWR alemães (Angra-2 e 3),
- dificuldades para sua aquisição no exterior,
- disponibilidade dos principais materiais e equipamentos no CDTN para a realização de um protótipo,
- razoável bibliografia sobre o assunto já disponível e possibilidade de sua ampliação pela obtenção tanto no país como no exterior,
- relato de uma experiência bem sucedida de construção de um detector "SPN" rudimentar [8].

Como pontos fracos ressaltavam-se os seguintes:

- falta de experiência anterior na construção de detectores de um modo geral,
- dificuldades possíveis com impurezas eventualmente presentes nos materiais disponíveis bem como nas soldas necessárias,
- dificuldades na obtenção de um cabo bifilar adequado às condições de irradiação e ordem de grandeza das correntes envolvidas,
- pouca flexibilidade para o dimensionamento do detector em face do material disponível.

Como se desejava um detector de nêutrons de resposta pronta, a escolha do material para o emissor recaiu no cobalto por ser o único material disponível na forma e quantidade necessárias.

Para enfrentar nossa principal deficiência (falta de experiência construtiva) resolveu-se adotar, para cada parte do detector, uma estratégia de projeto-construção-teste-correção a cada passo, visando ir se adquirindo "know-how" à medida do progresso da construção.

Visando avaliar-se a viabilidade de nosso propósito, construiu-se um protótipo preliminar, repetindo-se basicamente o experimento descrito em [8].

Esse protótipo constituiu-se numa configuração coaxial de emissor de um fio de cobalto de diâmetro 0,381mm, e comprimento de 150 mm, um envoltório de inconel-600 para coletor/revestimento de diâmetro 4,763 mm, e como isolador utilizou-se o polietileno de isolamento de um cabo coaxial. Um conector tipo "SHV" foi soldado a esse conjunto para ligação mecânica e elétrica de um cabo coaxial, utilizando-se sua malha de blindagem como parte do circuito de medida que utilizava um pico-amperímetro.

Esse protótipo sofreu testes de bancada quanto às propriedades elétricas e depois testes com relação à radiação gama somente, e a de nêutrons e gamas, utilizando-se o reator IPR-R1. Simultaneamente desenvolvia-se um programa de cálculo utilizando-se os modelos matemáticos para o "SPN" [11]. Esses cálculos auxiliariam a fixação de alguns parâmetros que tinham possibilidade de serem variados.

Com os resultados animadores obtidos com esse protótipo, passou-se a desenvolver um protótipo melhorado.

O protótipo melhorado ("SPN-PM") está constituído por nove fios de cobalto do mesmo diâmetro e comprimento acima citado para o emissor, isolador de alumina previamente sinterizada e um coletor/revestimento de Inconel-600 idêntico ao acima citado.

Face às dificuldades de obtenção de um cabo bifilar com revestimento cerâmico, inicialmente efetuaram-se testes com dois cabos coaxiais colocados paralelamente, simulando a compensação do cabo. Mais tarde obteve-se um cabo bifilar nacional com isolamento de polietileno que tem sido utilizado, embora não seja o mais adequado às irradiações a que tem sido submetido.

O circuito eletrônico de amplificação e processamento do sinal de corrente incorporou alguns componentes modernos, e como visor digital utilizou-se a eletrônica de um multímetro digital "Keithley" por já conter um conversor A/D e saída para registrador contínuo ("Strip Chart").

Nos capítulos seguintes são descritos o projeto, construção e testes e apresentadas as medidas de sensibilidade gama e a nêutrons, bem como as curvas de calibração feitas.

A Figura I.1 mostra um esquema típico de um detector "SPN" e a Figura I.2, um detalhe de sua construção.

FIGURA 1.1 - ESQUEMA TÍPICO DE UM CONJUNTO DE MEDIÇÃO COM DETECTOR "SPN"

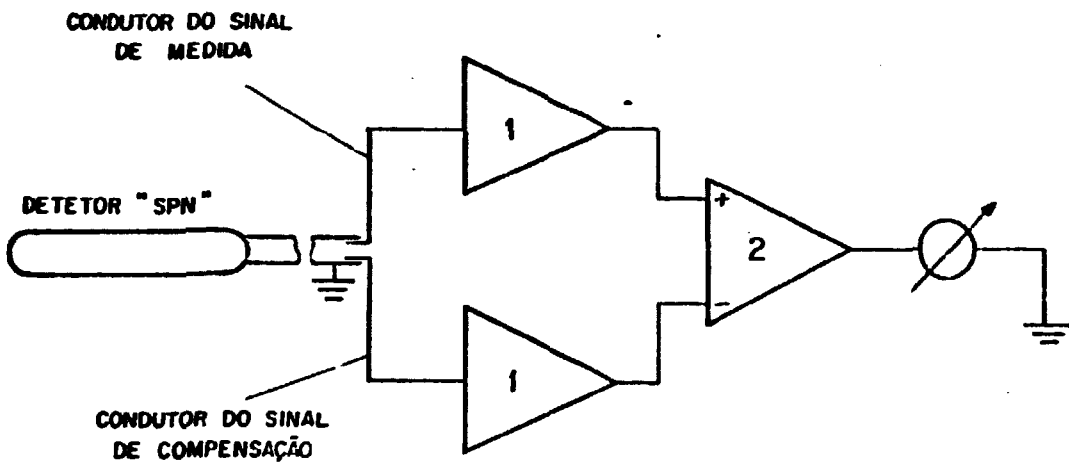
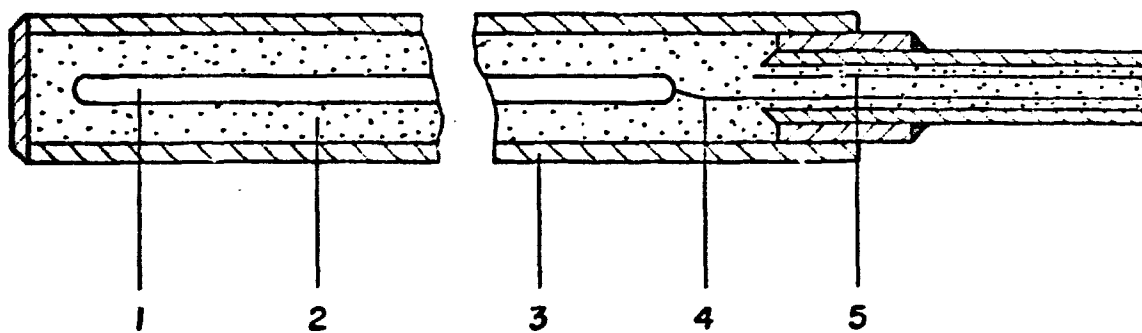


FIGURA I.2 - DETALHE DO "SPN"



- 1 EMISSOR
- 2 ISOLADOR
- 3 REVESTIMENTO COMO COLETOR
- 4 CONDUTOR DE SINAL
- 5 CONDUTOR DE COMPENSAÇÃO

II. ASPECTOS TEÓRICOS

Descrevem-se neste capítulo os principais processos físicos provocados por nêutrons e radiação gama no detector "SPN" e cabo, quando inseridos em um reator nuclear.

II.1 Princípios de Funcionamento

Se dois condutores separados por um isolador são expostos a um campo de nêutrons térmicos, então elétrons poderão ser emitidos porque a captura de um nêutron por um átomo do material do emissor pode resultar na formação de um núcleo radioativo que decai para um estado estável, emitindo partículas beta que constituirão uma corrente elétrica fluindo de um condutor para outro através do isolador.

No caso de um condutor de cobalto, a corrente é devida essencialmente a elétrons originados por efeito Compton e fotoelétrico a partir da auto-absorção de raios gama de captura no Co-59. Além disso, a corrente elétrica formada pelas partículas beta constituirá uma componente atrasada (governada pelo decaimento do cobalto ativado), que é indesejável no caso de um detector de resposta pronta e portanto deverá ser eliminada no circuito eletrônico de processamento de sinal. A Figura II.1 esquematiza todo o mecanismo de constituição da corrente no "SPN" [6].

O fluxo líquido de elétrons entre os condutores (também chamados de eletrodos) i.e., a magnitude da corrente

elétrica, em equilíbrio, é proporcional à intensidade do fluxo de nêutrons. Esta corrente poderá ser maior se o eletrodo emissor tiver grande seção de choque de ativação para nêutrons e o eletrodo coletor tiver pequena seção de choque.

Um estudo teórico [12] considera que no caso de detectores coaxiais, o isolador atua como reservatório de elétrons ou depósito de cargas espaciais. Seguindo-se à emissão de elétrons de um dos eletrodos metálicos, alguns deles alcançam o equilíbrio térmico dentro do isolador. Devido às armadilhas de carga e à estrutura de bandas de energia do isolador, estes elétrons gastam um tempo finito (tempo de residência) para atingir, através do isolador, o outro eletrodo. Isto permite a formação de cargas espaciais. Quando um campo elétrico de cargas espaciais torna-se muito forte, a emissão de elétrons entrará em equilíbrio, ou dito de outra forma, forma-se um pico de potencial elétrico negativo. Como existe uma simetria cilíndrica, o pico de potencial está localizado dentro do isolador, como esquematiza a Figura II.2.0 vetor campo elétrico possui direção oposta de cada lado do pico.

O mecanismo da corrente elétrica pode ser explicado assim: os elétrons de ambos eletrodos que perdem toda sua energia cinética antes de atravessarem o pico de potencial são repelidos para sua origem, e os que atravessarem, são forçados, pelo campo elétrico, para o eletrodo oposto.

Assim, supondo que o pico de potencial seja uma superfície imaginária de diâmetro d_p , somente os elétrons que conseguem atravessá-la contribuem para a corrente no detector. Infere-se daí a existência de uma energia cinética mínima (cha

mada E_{\min}) que os elétrons deverão possuir para atravessar esta barreira de potencial [13].

II.2 Modelo Matemático

Um modelo matemático para a representação de todos fenômenos que proporcionam o surgimento da corrente de um "SPN" de resposta pronta pode ser expresso como [11]:

$$I_e = e \left[\frac{V}{L} \int_0^{E_{n,\max}} \Sigma(E_n) \phi(E_n) f(E_n) F(E_n) dE_n \right] \times \\ \times \left[\sum_{i=1}^2 \int_0^{E_{\gamma,\max}} \epsilon_i(E_\gamma) P_i(E_\gamma) Y(E_\gamma) dE_\gamma \right]$$

onde: I_e - corrente do detector em Amperes por centímetro de comprimento do emissor

e - carga do elétron = $1,602 \times 10^{-19}$ (A s)/elétron

V - volume do emissor, em cm^3

L - comprimento do emissor em cm

E_n - energia do nêutron incidente

$E_{n,\max}$ - máxima energia dos nêutrons incidentes

E_γ - energia do raio gama de captura de nêutron

$E_{\gamma,\max}$ - máxima energia dos raios gama de captura de nêutron.

A primeira expressão entre colchetes acima representa a taxa de captura de nêutrons por unidade de comprimento.

to do emissor. A segunda, representa a probabilidade P_c desses nêutrons serem convertidos em elétrons que contribuem efetivamente para a corrente do detector. A seguir são explicados os demais termos da expressão acima.

$\Sigma(E_n)$ - seção de choque macroscópica de captura de nêutron do material do emissor na energia de nêutron E_n em cm^{-1} ;

$\phi(E_n)$ - fluxo diferencial de nêutrons na energia de nêutron E_n em nêutrons/(cm^2 seg unidade de energia);

$f(E_n)$ - fator de auto-blindagem para nêutrons do emissor na energia de nêutron E_n ; $0 < f(E_n) \leq 1$

$F(E_n)$ - fator de depressão de fluxo do emissor na energia de nêutron E_n ; $0 < F(E_n) \leq 1$

$\epsilon_i(E_\gamma)$ - eficiência de escape de elétron, i.ê., a probabilidade de um elétron Compton ($i = 1$) ou um foto-elétron ($i = 2$) produzido dentro do emissor por um raio gama pronto de captura com energia E_γ , escapar do emissor, atravessar o isolador e atingir o coletor;

$P_i(E_\gamma)$ - probabilidade de primeira colisão de raios gama prontos de captura no emissor, i.ê., a probabilidade de produção de um elétron por interação Compton ($i = 1$) ou fotoelétrica ($i = 2$) de um raio gama com energia E_γ ;

$Y(E_\gamma)$ - rendimento ("yield") de raios gama de captura, i.ê., o número de raios gama por unidade de energia gama por nêutron capturado no emissor.

Para facilidade de cálculos, valores dos termos da equação acima foram tabulados (Tabelas II.1 e II.2) [11]. Para as necessárias ponderações nas seções de choque foi utilizado

um típico espectro de nêutrons de reator a água leve.

Esse modelo define várias sensibilidades unitárias, a saber:

$$S_{abs} = \frac{I_e}{\phi_{tot}} \quad - \text{ sensibilidade unitária absoluta}$$

$$S_n = \frac{I_e}{\phi_{th}} \quad - \text{ sensibilidade unitária normal}$$

$$S_{fast} = \frac{I_{fast}}{\phi_{fast}} \quad - \text{ sensibilidade unitária para nêutrons rápidos}$$

$$S_{th} = \frac{I_{th}}{\phi_{th}} \quad - \text{ sensibilidade unitária para nêutrons térmicos}$$

onde:

ϕ_{tot} - fluxo total integrado sobre todas energias de nêutrons;

ϕ_{th} - porção do fluxo de nêutrons integrado desde energia zero até a energia de corte efetiva do cádmio (0,414 ev);

ϕ_{fast} - porção do fluxo de nêutrons integrado acima de 0,414 ev, até a maior energia de nêutrons que ocorrer;

I_e - corrente total do detector;

I_{fast} - parcela de corrente do detector que resulta da absorção de nêutrons rápidos com energia além de 0,414 ev;

I_{th} - parcela de corrente do detector que resulta da absorção de somente nêutrons térmicos.

As correntes acima são todas por unidade de comprí

mento do emissor.

O programa desenvolvido com base nesse modelo calcula todas as sensibilidades acima, além das relações de correntes I_1/I_e e I_2/I_e , onde o índice 1 refere-se a corrente proveniente de elétrons Compton e o índice 2, a corrente devida a foto-elétrons apenas.

De acordo com esse cálculo, verifica-se a grande predominância da contribuição do efeito Compton (99,7%) sobre a do efeito fotoelétrico na formação da corrente total, no caso dos materiais utilizados no presente trabalho. A referência [14] também confirma este resultado.

II.3 Composição do Sinal dos Detectores "SPN"

O sinal de um detector ("SPN") é composto essencialmente dos seguintes componentes:

a) sinal pronto devido a nêutrons - i_p

Elétrons são originados, por efeito Compton e foto-elétrico, pela radiação gama de captura neutrônica;

b) sinal atrasado devido a nêutrons - i_v

Elétrons provenientes de decaimento β^- e da emissão γ do material ativado;

c) sinal gama - i_γ

Elétrons são originados, por efeito Compton e foto-elétrico, por radiação gama externa ao detector.

A soma dessas componentes mais a contribuição de correntes originadas no cabo fornece a corrente total do con-

junto (Figura II.3):

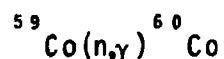
$$i_t = i_p + i_v + i_\gamma + i_{MK} - i_{KK}$$

A Figura II.3 mostra um esquema da composição do sinal do detector.

Os processos mencionados ocorrem tanto no emissor como no isolador, coletor, revestimento e condutores do cabo. Através da escolha dos materiais para emissor, coletor, isolador e condutores do cabo, bem como da geometria, é assegurado na construção do detector que a componente de corrente do emissor devida à interação com nêutrons prevaleça sobre todas as outras componentes e seja responsável pela parte principal da corrente total.

II.3.1 Sinal pronto devido a nêutrons

Na interação de nêutrons com o emissor de cobalto são emitidos raios gama através da reação (n, γ) .



A desexcitação do núcleo composto do Co-60 para o estado fundamental produz um espectro complexo de raios gama de captura neutrônica com quase cem raios gama, com energias variando de 0,06 a 7,49 Mev. A Figura II.4 mostra o decaimento após a captura de um nêutron pelo Co-59. A Tabela II.3 exi

be algumas dessas energias e intensidades [15].

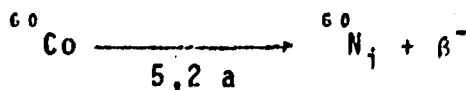
Esta radiação gama (com energia média de 1,6 Mev) libera elétrons no emissor e isolador por efeito Compton e foto-elétrico, que pela constituição geométrica movem-se preferencialmente em direção ao coletor (direção positiva de corrente). Se a energia dos elétrons for suficiente para saírem do emissor e: a) atingirem o coletor, ou b) serem parados no isolador, isto causa o aparecimento de uma carga positiva no emissor em relação ao coletor. Se ligarmos eletricamente emissor e coletor, circulará uma corrente elétrica que pode ser medida.

Como a desexcitação do núcleo composto do Co-60 é um processo instantâneo, esta corrente é pronta, i.é, ela será somente limitada pelo circuito de medida, seguindo, sem atraso, as variações do fluxo de nêutrons.

Esta componente do sinal é, para vários detectores (diversos materiais do emissor com mesma geometria), dependente apenas da seção de choque de ativação para nêutrons térmicos e da densidade do emissor.

II.3.2 Sinal atrasado devido a nêutrons

O núcleo composto decai para o estado fundamental do Co-60, que é emissor β^- , decaindo com meia vida de 5,2 anos para o Ni-60:



O núcleo decaindo para um estado excitado, volta ao estado fundamental emitindo radiação gama. Dessa forma, no decaimento β^- resultam elétrons e radiação gama. A radiação gama contribui novamente, por efeito Compton e foto-elétrico, para a criação de elétrons e com isso para a intensidade da corrente elétrica.

A energia das partículas β é de 0,3 MeV, o que implica num correspondente pequeno alcance, de modo que apenas os elétrons de um pequeno volume do emissor contribuem para o sinal atrasado.

A energia dos gamas que acompanham o decaimento β (1,17 e 1,33 MeV) liberam a contribuição essencial da componente de sinal atrasado. Este sinal é proporcional à fluência de nêutrons e será condicionado pela meia vida do Co-60.

A componente de sinal atrasada, devida à longa meia-vida do nuclídeo que a originou, pode ser tratada como um "background" que é fácil de ser eliminado eletronicamente.

Outro produto formado é o Co-61 que, devido a pequena seção de choque de ativação do Co-60, é formado em pouca quantidade, liberando pequena corrente.

A Figura II.5 mostra o decaimento do Co-61.

II.3.3 Sinal gama

A intensidade da radiação gama que, do exterior, atinge o detector é maior do que a radiação gama de captura nêutrons do Co, por exemplo, a qual é responsável pela parte

pronta do sinal.

Em consequência disto haverá também uma corrente do emissor para a carcaça que é maior do que a proporcionada pela reação (n, γ) . A radiação gama externa também libera elétrons na carcaça, que se movem para o emissor. Estas correntes compensam-se, portanto, de modo que a sensibilidade do detector a γ externos, vista na totalidade, é pequena [16].

A sensibilidade gama do detector é dependente de sua geometria e do número atômico do material do emissor. Com referência à geometria, interessa a relação entre a superfície do emissor e a superfície interna do coletor do detector [14]. Para diminuir a sensibilidade gama é necessário aumentar a relação entre o diâmetro do emissor e o diâmetro interno do coletor. Em função do número atômico do material do emissor encontra-se, por exemplo para detectores da AB ATOMENERGI (diâmetro do emissor 2 mm e revestimento de Inconel $Z = 27,1$), a relação empírica [16]:

$$i_{\gamma, E} = \alpha_E Z_E^{1,5}$$

$$i_{\gamma, H} = \alpha_H Z_H^{1,5}$$

onde:

Z - número atômico;

$i_{\gamma, E}$ - corrente do emissor para o coletor;

$i_{\gamma, H}$ - corrente do coletor para o emissor;

α - fator de proporcionalidade.

$\alpha_E = 7 \times 10^{-20} \text{ A R}^{-1} \text{ h}$ por cm de comprimento do emissor;

$\alpha_H = 9,1 \times 10^{-20} \text{ A R}^{-1} \text{ h}$ por cm de comprimento do coletor.

Assim pode-se compreender que os detectores com emissor de Co ou V ($Z = 27$ e 23 respectivamente) mostram uma corrente gama líquida negativa (da carcaca para o emissor) e com emissor de Rh ($Z = 45$) será sempre positiva. A Figura II.6 mostra um gráfico do sentido da corrente do "SPN" em função do número atômico do material do emissor para a geometria e o coletor citados.

II.4 Relação de Queima do Detector

Através da ativação do Co-59 altera-se a concentração dos núcleos disponíveis do emissor e com isso a sensibilidade a nêutrons do "SPN". Esta perda de sensibilidade, chamada de queima, pode ser estimada pela relação abaixo [17]:

$$I_t = I_0 \exp(-k_\phi \bar{\sigma} \phi t)$$

onde:

I_t é o valor de corrente num tempo t para uma intensidade de fluxo de nêutrons constante;

I_0 é a corrente no instante $t = 0$

k_ϕ é uma constante que depende do efeito da queima na auto-blindagem e depressão de fluxo de nêutrons, bem co-

mo da gradual redução do número de átomos ativáveis (este valor a rigor não é uma constante, mas para baixo valor de queima pode ser assim considerado);

$\bar{\sigma}$ é a seção de choque de ativação por átomo;

ϕ é a intensidade de fluxo de nêutrons.

A Tabela II.4 mostra os valores de queima para três tipos de detectores (Vanádio, Ródio e Cobalto) para um fluxo de nêutrons de $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. [16].

II.5 Cabo de Conexão do Detector ao Circuito de Processamento de Sinal

O cabo de conexão do detector ao circuito eletrônico de medida é um elemento importantíssimo do conjunto.

Esse cabo, além de transmitir correntes elétricas muito pequenas, deve suportar um ambiente de temperatura e radiação que podem degradar suas propriedades físicas, comprometendo os resultados de medida. Além disso, movimento ou vibração do cabo pode gerar atritos entre as superfícies internas, resultando num desequilíbrio de cargas entre condutor e isolador. Uma corrente resultante desse atrito (corrente triboelétrica) irá fluir até ser restabelecido o equilíbrio. Correntes piezoelétricas podem ser originadas por tensão mecânica aplicada a um isolador suscetível (p.ex. "Teflon"), de vez que a força aplicada altera a capacidade interna levando à distribuição de cargas [18].

Por outro lado, a radiação forma cargas nos condu

tores, isolador e envoltório do cabo, estabelecendo-se correntes que devem ser mantidas num mínimo através de criteriosa seleção dos materiais ou canceladas eletronicamente através de um circuito de compensação.

II.5.1 Correntes induzidas no cabo pela radiação

A radiação devida a nêutrons ou gama provoca o surgimento de correntes nos componentes do cabo. A geração dessas correntes segue prontamente a radiação externa ou é atrasada de acordo com a meia-vida dos nuclídeos ativados. Os nêutrons causam as seguintes ocorrências no cabo:

a) Ativação de núcleos atômicos no envoltório

As partículas beta oriundas da desintegração desses núcleos fornecem sempre uma parcela de corrente negativa (sentido do envoltório para o condutor do cabo). A fim de se evitar essa parcela, o envoltório não deverá possuir nuclídeos com grande seção de choque para reação (n, γ) . A radiação gama de captura neutrônica produz elétrons Compton tanto no envoltório, o que acarreta uma parcela de corrente negativa, quanto no isolador e nos condutores internos do cabo, cujas parcelas serão sempre positivas [16].

b) Ativação de núcleos atômicos no isolador

Tendo em vista que a escolha dos materiais isolantes é restrita (Al_2O_3 , MgO e BeO), a corrente positiva resultante do decaimento beta terá de ser tolerada.

O fato dessa corrente ser positiva advém principalmente dos seguintes motivos:

- como indica a Figura 11.2 (cuja informação se aplica ao cabo que deve, no caso ideal, ter o mesmo material de isolamento que o detector), a barreira de carga espacial se localiza mais próxima aos condutores do que ao envoltório (coletor). Esse fato é verificado experimentalmente para o detector [12]. Devido a essa assimetria, um número maior de partículas beta originadas no isolante serão dirigidas para o coletor.

- o fluxo de nêutrons se reduz da periferia para o interior do isolador devido às interações com o material constitutivo (fenômeno conhecido como depressão de fluxo).

A radiação gama, originada pela captura de nêutrons no isolador, produz novamente as mesmas frações de correntes que a radiação gama de captura acima citada.

A radiação externa produz elétrons Compton tanto no envoltório quanto no isolador. A contribuição dos elétrons liberados no envoltório do cabo é, novamente, negativa, e a dos elétrons produzidos no isolador é, preponderantemente, positiva.

Dependendo das condições de montagem, a radiação devida a nêutrons ou a radiação gama contribuirá mais para a corrente total que flui em um condutor do cabo, e a corrente será positiva ou negativa.

Por exemplo [16], "se o detector com o cabo estiverem dentro de um tubo protetor de diâmetro 6 mm e espessura de parede 1 mm, a corrente total em um condutor será pequena e negativa, i.é, os elétrons que atingem os condutores internos vindos do exterior do condutor serão preponderantes." Caso o detector com o cabo estejam fixados externamente a um tubo portador, a corrente total em um dos condutores será i-

gualmente pequena, porém positiva, ou seja, haverá um fluxo maior de elétrons do condutor para a carcaça do que na direção oposta. No entanto, se o cabo estiver livre dentro do reator, sem que haja diminuição do fluxo de nêutrons por parte dos materiais estruturais, resultará uma grande corrente total positiva no cabo.

II.5.2 Dependência da resistência elétrica do cabo com a temperatura e radiação

A resistência de isolamento de um cabo com isolador cerâmico do tipo citado no item precedente, pode ser dividida em duas componentes principais: uma dependente da temperatura (R_t) e a outra da radiação (R_r) [19]:

$$R_{tot} = \left(\frac{1}{R_t} + \frac{1}{R_r} \right)^{-1}$$

onde R_t e R_r são determinados empiricamente por:

$$R_r = 3,3 \times 10^{15} T^{-3/2} P_Y^{-0,81}$$

$$R_t = \exp(10400/T + 6,6) \quad 300 < T < 750 \text{ K}$$

ou

$$R_r = 4100 T^{-3/2} P_Y^{-0,81} \exp(18,8 + 8300/T)$$

$$R_t = \exp(18200/T - 3,3) \quad 750 < T < 1100 \text{ K}$$

$$P_Y = \text{taxa de dose gama em rad s}^{-1}$$

Num fluxo integrado ϕt de nêutrons rápidos, sendo R_0 a resistência do cabo à temperatura ambiente em $\Omega.m$, a resistência de isolamento do cabo é dada por:

$$R = R_0 \exp \left(3,6 - \frac{2300}{T} + 0,12 \phi t \times 10^{-20} \right)$$

A Figura II.7 mostra a dependência da resistência de isolamento de um conjunto "SPN" com isolamento de óxido de magnésio em função de temperatura e radiação.

II.6 Influência da Resistência de Isolamento do Conjunto no Sinal de Medida

As características operacionais dos detectores ("SPN") são influenciadas principalmente pelo valor das resistências de isolamento. Por resistências de isolamento entende-se as resistências dos isoladores entre o fio do emissor e o coletor no detector, entre o fio de compensação e a blindagem (coletor) do cabo e entre o fio de sinal e o fio de compensação do cabo.

O estado físico do material de isolamento (alumina no detector e polietileno no cabo) determina assim o valor dessas resistências.

Como estágio inicial do processamento de sinal do detector é utilizado um amplificador conversor de corrente para tensão. A Figura II.8 mostra um diagrama do circuito incluindo o primeiro estágio, onde R_{fs} representa a resistência

de isolamento global (detector + cabo).

Pela análise do esquema dessa figura, verifica-se que V_A (tensão de saída do estágio) é dada por:

$$- V_A = \frac{- R_g}{1 + \frac{R_g}{R_{is} A}} \left(i_E + \frac{V_{off}}{R_{is}} \right)$$

onde:

R_g - resistência de realimentação negativa

R_{is} - resistência de isolamento global

i_E - corrente do detector

V_{off} - tensão de "offset" do amplificador operacional

A - constante de ganho do amplificador operacional (aproximadamente 10^4).

Pela expressão acima, observa-se a influência da tensão de "offset" V_{off} e da resistência de isolamento R_{is} na tensão de saída do estágio.

Caso a resistência de isolamento seja muito maior do que a resistência de realimentação negativa, e, através do circuito externo de compensação de "offset" se faça $V_{off} \rightarrow 0$, tem-se:

$$\frac{R_g}{R_{is} A} \rightarrow 0 \quad \text{e} \quad \frac{V_{off}}{R_{is}} \rightarrow 0$$

o que implica em:

$$V_A = R_g i_E$$

ou seja, obtêm-se uma linearidade entre a tensão de saída do

estágio e a corrente do detector.

Caso R_{is} diminua, ocorrerá:

1) a tensão de saída do estágio ficará falseada dependendo da relação V_{off}/R_{is} A,

2) se R_{is} tornar-se suficientemente pequena, o amplificador ficará completamente com deriva.

No caso da diminuição da resistência do isolamento, o erro de medida pode ser apenas diminuído através da redução da tensão de "offset", porém nunca eliminado.

Dessa forma, a resistência de isolamento deve ser sempre maior do que R_g . No caso de um valor de R_g de $10^6 \Omega$, o valor de R_{is} , no caso ideal, não deve nunca cair abaixo de $10^9 \Omega$ [20].

FIGURA II.1 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA COMPOSIÇÃO DA CORRENTE DO DETECTOR "SPN" [6]

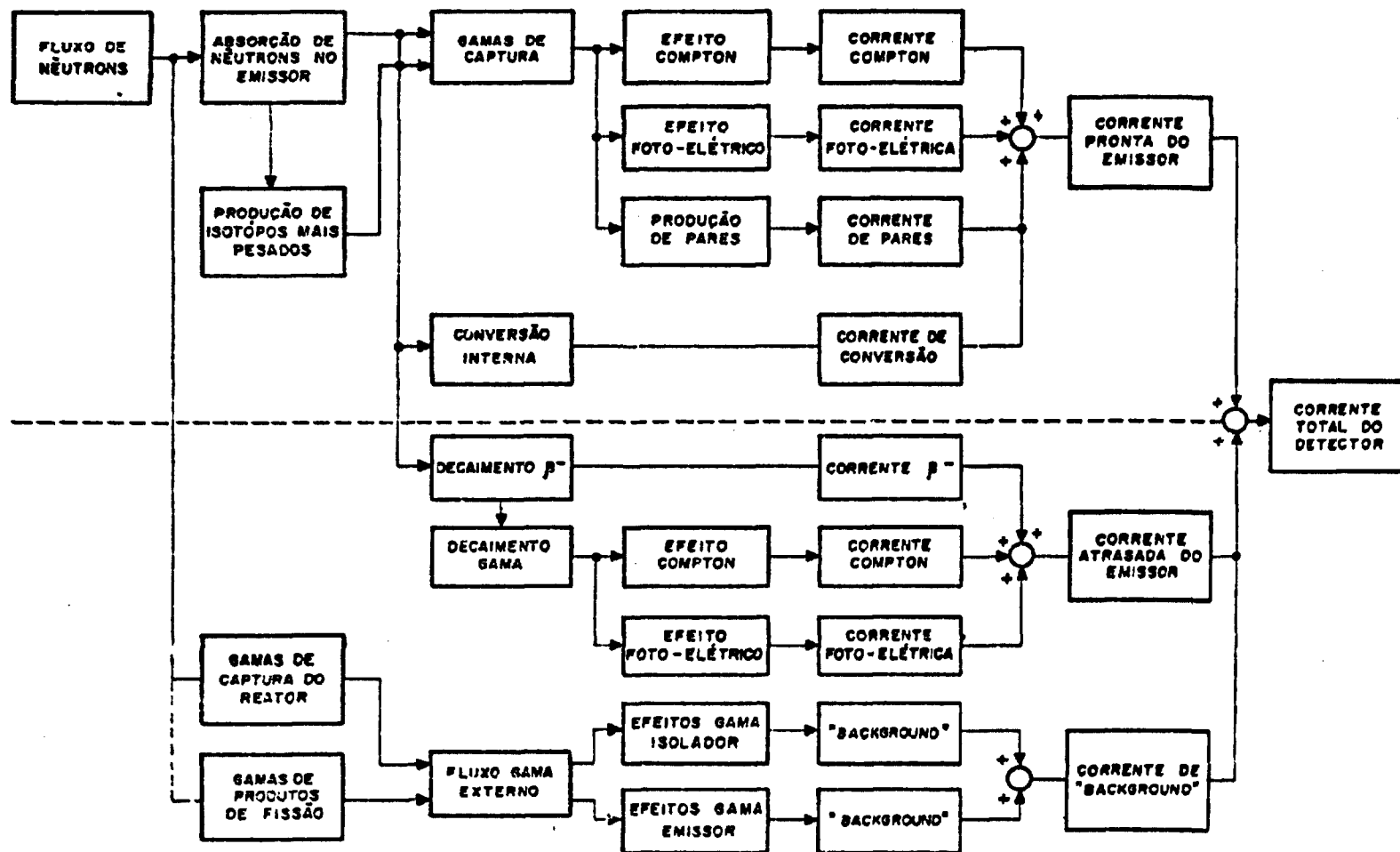
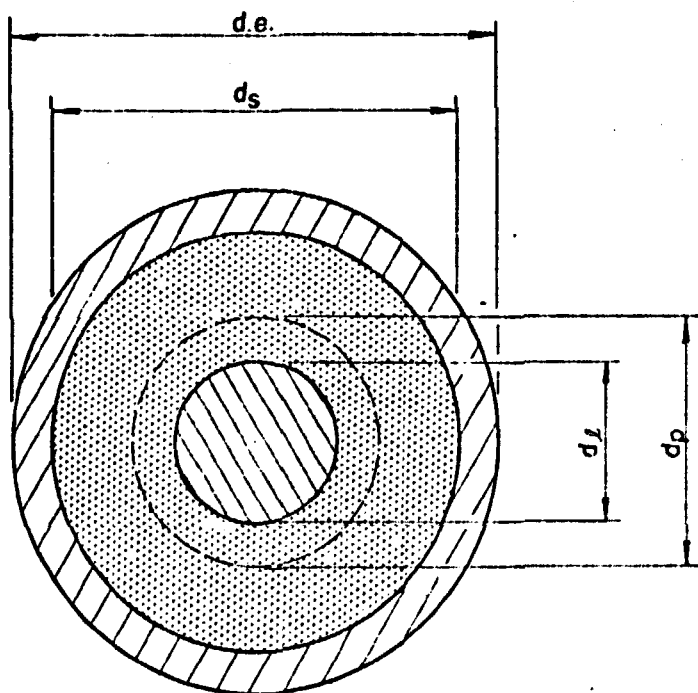


FIGURA II.2 - LOCALIZAÇÃO (d_p) DO PICO DE POTENCIAL DA CARGA ESPACIAL DENTRO DO ISOLADOR DE UM DETECTOR COAXIAL [12]



d_l = diâmetro do emissor

d_s = diâmetro interno do coletor

d_p = localização do pico de potencial da carga espacial

d_e = diâmetro externo do coletor

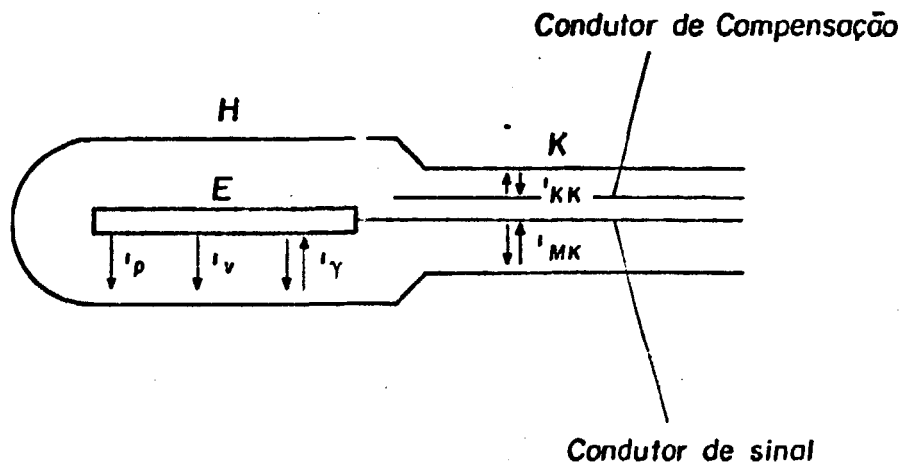
TABELA II.1 - DADOS NEUTRÔNICOS DE ENTRADA PARA CÁLCULO DA TAXA DE CAPTURA DE NÊUTRONS [11] (FOI UTILIZADO UM TÍPICO ESPECTRO DE NEUTRONS DE REATOR A ÁGUA LEVE)

		Grupo de energia de nêutron i =						
		Grupos rápidos				Grupos térmicos		
		1	2	3	4	5	6	7
		Intervalo de energia, ΔE (eV)						
		$1.49 \times 10^7 -$ 1.11×10^5	$1.11 \times 10^5 -$ 2.61×10^3	$2.61 \times 10^3 -$ 2.38	2.38-0.414	0.414-0.075	0.075-0.025	0.025-0.0
		Grupos de fluxo médio, ϕ_j [$n/(cm^2 \text{ sec})$]						
		0.378	0.12258	0.18845	0.08206	0.12732	0.07464	0.02701
Cobalt	$\Sigma(E_n)$	0.00047	0.03414	0.47003	0.56794	1.50165	2.577	4.81157
	$f(E_n)$	0.99993	0.99548	0.94221	0.9311	0.83662	0.74226	0.60582
	$F(E_n)$	0.99998	0.99725	0.9679	0.96344	0.90376	0.84516	0.73914

TABELA II.2 - PARÂMETROS DE CALCULO DO DETECTOR DE COBALTO [11]

Número de grupo de energia de raio gama	\bar{E}_γ (MeV)	Yield, $\gamma(\bar{E}_\gamma)$	Σ_1 (cm ⁻¹)	Σ_2 (10 ⁻² cm ⁻¹)	P_1	P_2 (10 ⁻²)	ϵ_1	ϵ_2
1	0.2115	0.28	0.9691	26.933	0.10907	2.997	0.0	0.0
2	0.3809	0.39	0.7838	4.207	0.09247	0.49	0.0	0.0
3	0.606	0.1848	0.6466	1.146	0.07788	0.136	0.00165	0.0852
4	0.8634	0.0912	0.5504	0.485	0.06717	0.056	0.03335	0.18952
5	1.1505	0.0418	0.4783	0.263	0.05894	0.032	0.08808	0.30587
6	1.3471	0.0213	0.441	0.194	0.05463	0.023	0.13125	0.38381
7	1.5527	0.0848	0.4089	0.15	0.05088	0.018	0.17853	0.46223
8	1.9771	0.1121	0.3577	0.099	0.04483	0.012	0.27959	0.61204
9	2.168	0.025	0.3398	0.086	0.04263	0.01	0.32534	0.67292
10	2.3363	0.0723	0.3248	0.076	0.0409	0.009	0.36534	0.7226
11	2.6004	0.0444	0.3048	0.065	0.03849	0.008	0.42669	0.79167
12	2.8748	0.0286	0.2868	0.056	0.03632	0.007	0.46609	0.84819
13	3.1362	0.0484	0.2719	0.049	0.0345	0.006	0.53708	0.88107
14	3.3922	0.0405	0.2589	0.044	0.03291	0.005	0.58103	0.90216
15	3.6912	0.0585	0.2454	0.039	0.03126	0.005	0.62401	0.9201
16	3.9199	0.0279	0.2361	0.036	0.03012	0.004	0.65291	0.93023
17	4.1212	0.0339	0.2286	0.034	0.02919	0.004	0.67456	0.9376
18	4.3674	0.0215	0.2201	0.031	0.02814	0.004	0.69736	0.94465
19	4.661	0.0485	0.2108	0.029	0.027	0.003	0.72185	0.95202
20	4.9103	0.1435	0.2036	0.027	0.02611	0.003	0.7397	0.95679
21	5.1407	0.0373	0.1975	0.025	0.02534	0.003	0.75496	0.96048
22	5.3164	0.0152	0.1931	0.024	0.02479	0.003	0.76505	0.96327
23	5.5553	0.1451	0.1851	0.022	0.0238	0.002	0.78308	0.96757
24	5.9637	0.0785	0.1785	0.021	0.02298	0.002	0.79715	0.96922
25	6.0924	0.0055	0.1759	0.02	0.02265	0.002	0.80314	0.97193
26	6.4541	0.0627	0.1691	0.019	0.02179	0.002	0.81681	0.97464
27	6.7051	0.085	0.1646	0.018	0.02124	0.002	0.82548	0.97642
28	6.9077	0.097	0.1613	0.017	0.02081	0.002	0.81393	0.97712
29	7.1727	0.065	0.1571	0.017	0.02028	0.002	0.83992	0.9793
30	7.4871	0.0314	0.1524	0.016	0.01969	0.002	0.84837	0.98082

FIGURA II.3 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DOS SENTIDOS DAS CORRENTES NO DETECTOR "SPN" E CABO



H - Revestimento do detector (coletor)

E - Emissor

K - Cabo

i_t - Corrente total (não representada)

i_p - Componente de corrente pronta de reação (n, γ)

i_v - Componente de corrente atrasada dos produtos de ativação

i_γ - Componente originada por radiação gama externa ao detector

i_{MK} - Corrente devida a diversos efeitos de nêutrons e radiação gama no condutor de sinal do cabo

i_{KK} - Corrente devida a diversos efeitos de nêutrons e radiação gama no condutor de compensação do cabo

Corrente positiva: Corrente do emissor ou dos condutores do cabo para o revestimento

Corrente negativa: Corrente do revestimento para o emissor ou para os condutores do cabo

FIGURA II.4 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO DECAIMENTO DO Co^{60} APÓS CAPTURA DE NÉUTRON NO Co^{59} [15]

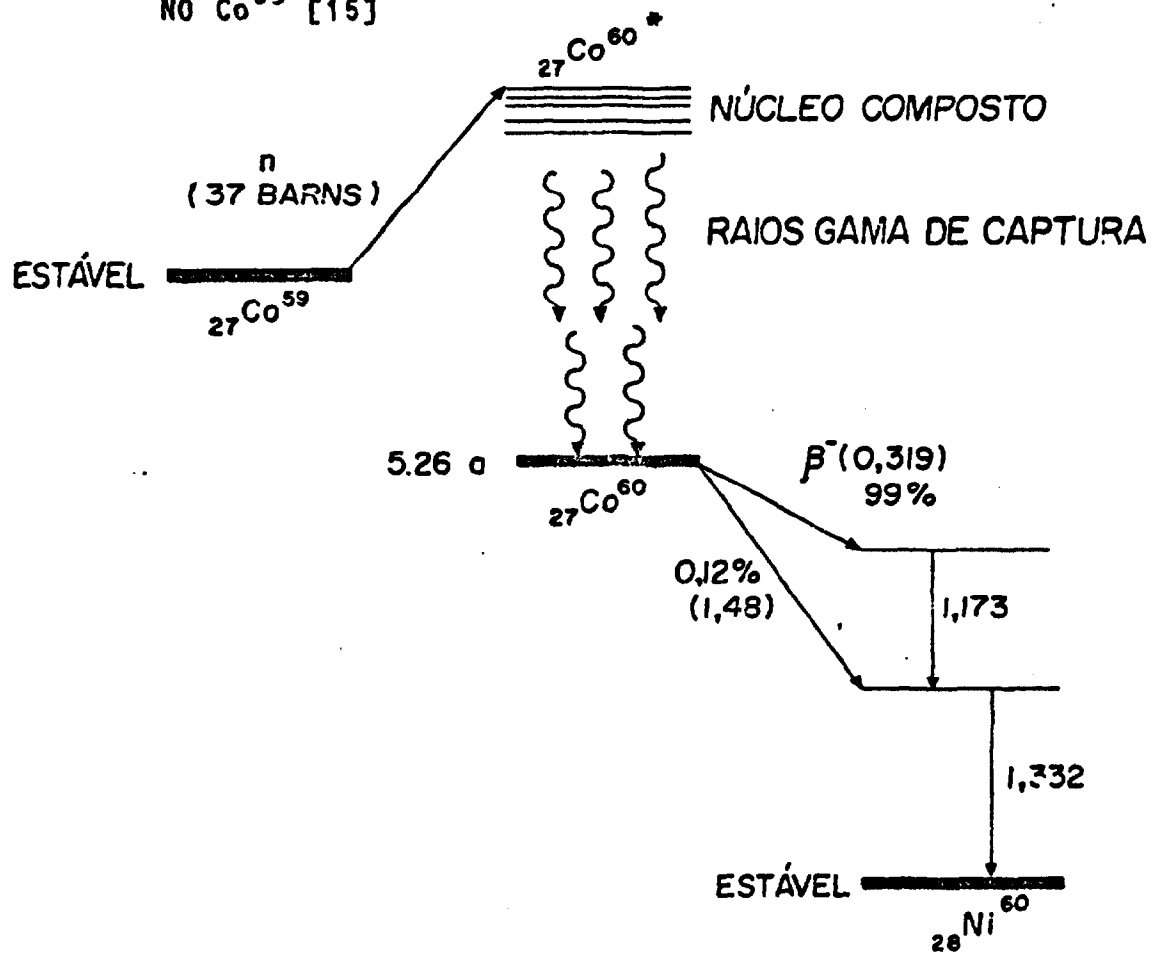


TABELA II.3 - ENERGIAS E INTENSIDADES DE RAIOS GAMA DE CAPTURA DE NÊUTRONS TÊRMICOS NO COBALTO ATÊ 1,85 MeV [12]

E_{γ} MeV	I_{γ} por 100 capturas de nêutrons
1.8511(15)	1.33(28)
1.8292(15)	4.30(72)
1.8054(15)	0.62(21)
1.8004(15)	0.92(30)
1.7852(15)	0.57(19)
1.7735(15)	0.92(22)
1.6910(15)	1.13(23)
1.5152(15)	5.50(115)
1.5069(15)	1.55(36)
1.3619(15)	0.54(18)
1.3326(15)	1.06(22)
1.2621(15)	0.44(14)
1.2376(15)	0.77(25)
1.2156(15)	1.34(28)
1.2068(15)	0.60(15)
1.1728(15)	0.79(22)
1.1027(15)	0.57(16)
1.0915(15)	0.91(22)
1.0226(15)	0.53(14)
1.0038(15)	0.39(11)
0.9634(15)	0.37(10)
0.9449(15)	2.10(45)
0.9298(15)	1.33(28)
0.9011(15)	0.89(22)
0.8836(15)	0.47(13)
0.8540(15)	0.24(8)
0.8280(15)	0.25(8)
0.7852(15)	4.20(69)
0.7269(15)	1.80(30)
0.7170(15)	2.30(57)
0.7104(15)	1.56(33)
0.6800(15)	0.53(13)
0.6654(15)	0.16(5)
0.6009(15)	0.13(4)
0.5557(15)	9.8 (16)
0.5110(15)	2.20(46)
0.4967(15)	5.0 (8)
0.4837(15)	1.66(34)
0.4607(15)	1.17(24)
0.4472(15)	7.3 (12)
0.4353(15)	1.26(26)
0.3909(15)	8.1 (13)
0.3495(15)	0.17(5)
0.3368(15)	0.27(6)
0.2769(15)	12.0 (20)
0.2541(15)	2.30(39)
0.2296(15)	21.0 (35)
0.2188(15)	0.20(8)
0.1958(15)	0.62(13)
0.1590(15)	6.1 (11)
0.0580(15)	>1.7

FIGURA II.5 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO DECAIMENTO DO Co^{61} APÓS CAPTURA DE NEUTRON NO Co^{60}

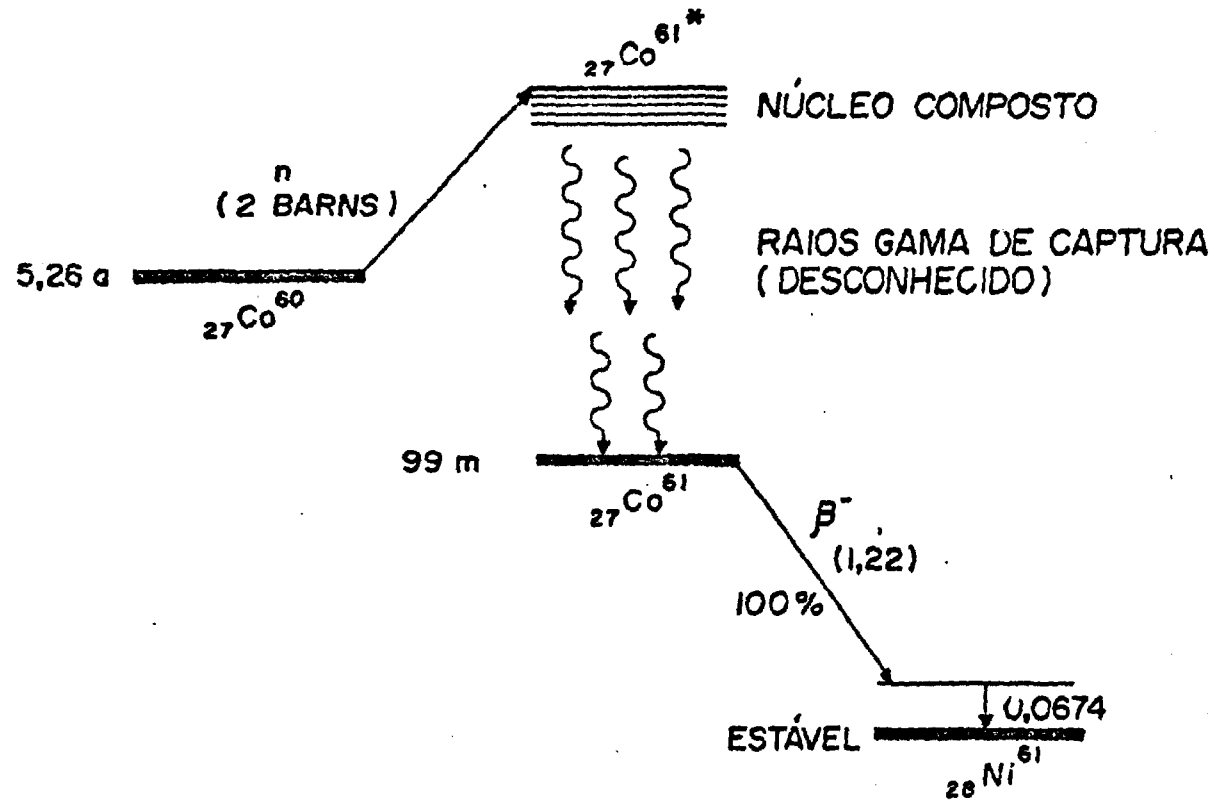


FIGURA II.6 - SENTIDO DA CORRENTE GAMA LÍQUIDA DE UM "SPN" EM FUNÇÃO DO NÚMERO ATÔMICO DO MATERIAL DO EMISSOR [19]

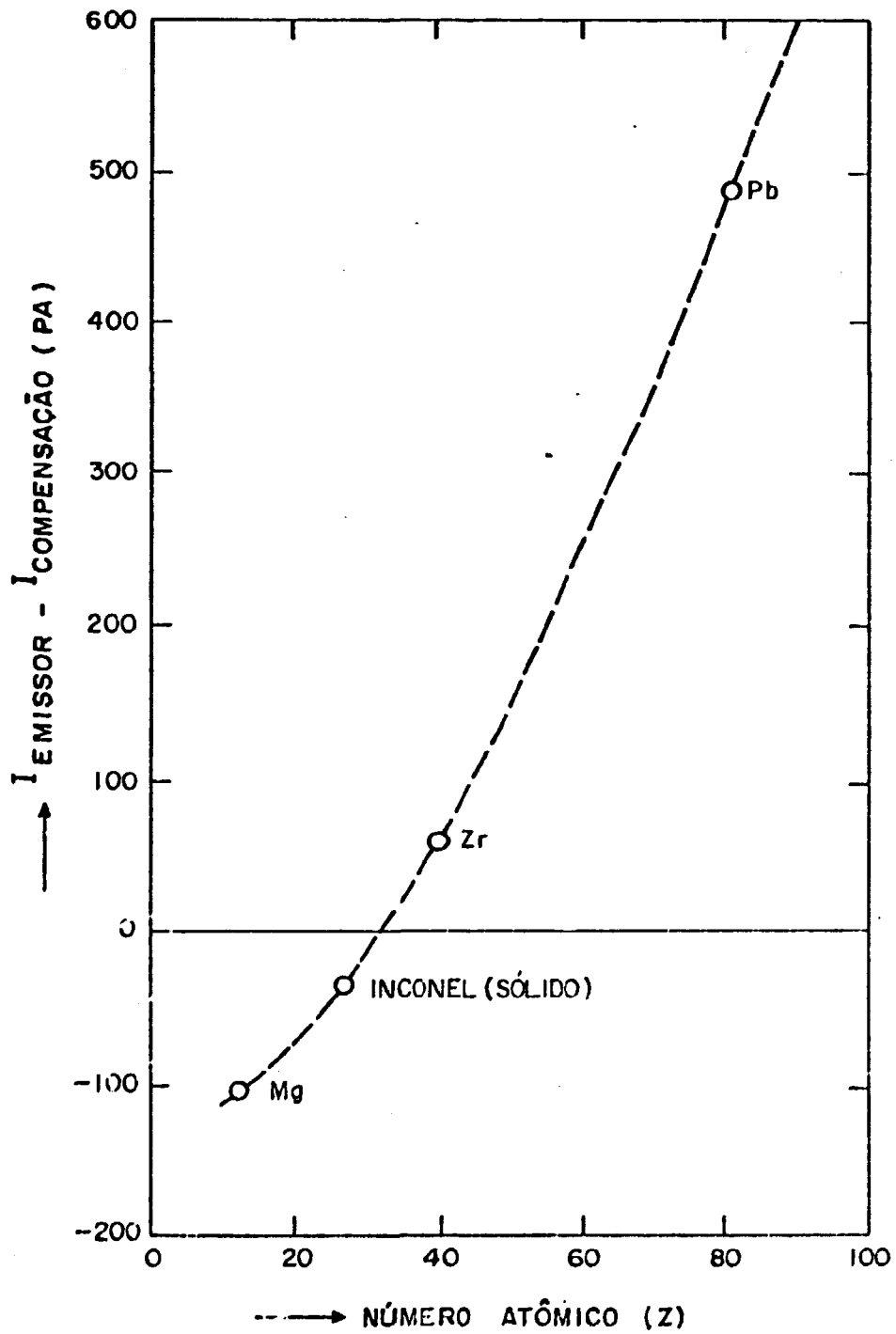
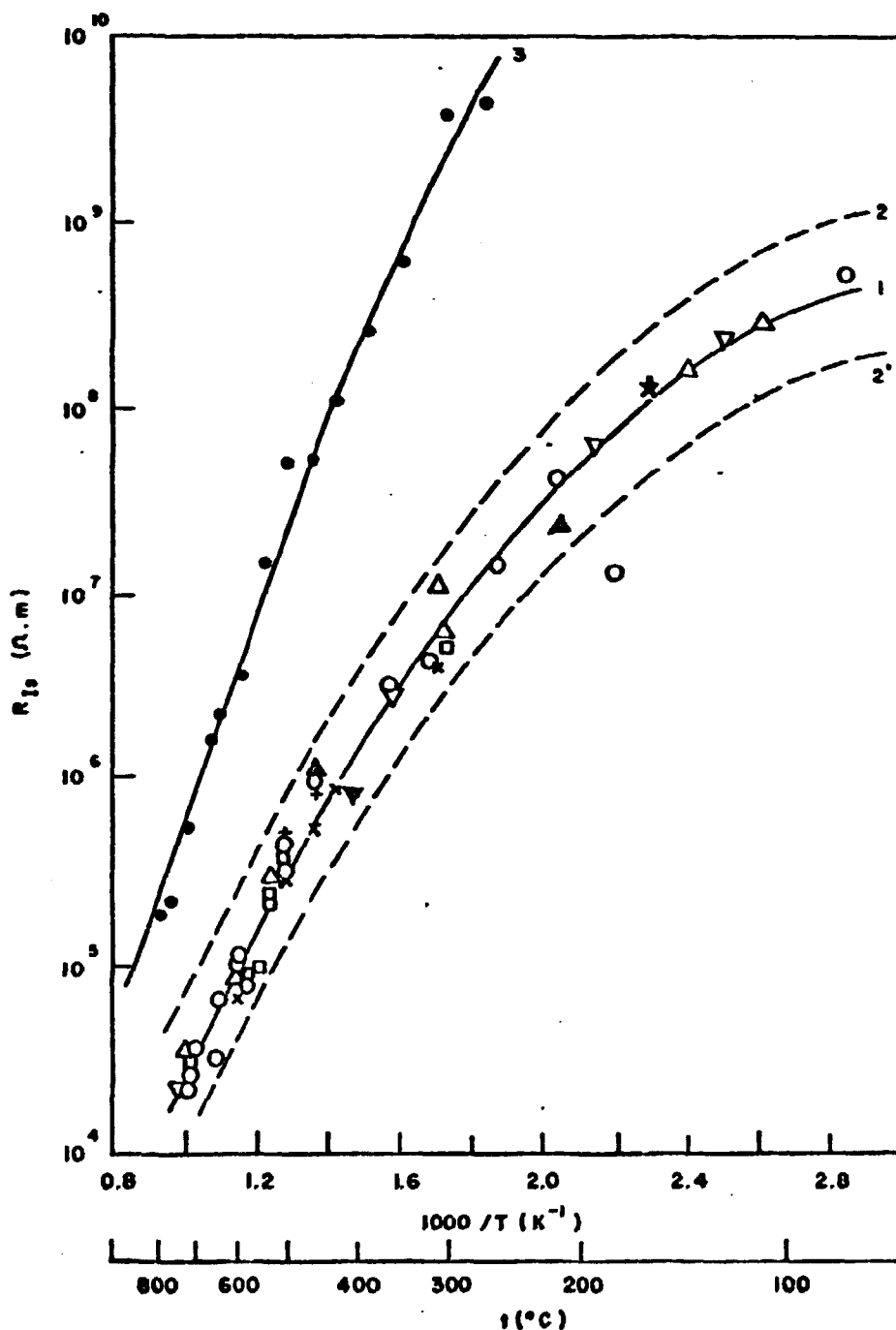


TABELA II.4 - VALORES DE QUEIMA PARA TRÊS TIPOS DE
DETECTORES "SPN" [16]

Emissor	Taxa de queima a um fluxo de nêutrons de $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (%/mês)
Vanádio	0,12
Cobalto	1,0
Ródio	3,9

FIGURA II.7 - DEPENDENCIA DA RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO DE UM CONJUNTO "SPN" COM ISOLADOR DE ÓXIDO DE MAGNÉSIO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E RADIAÇÃO

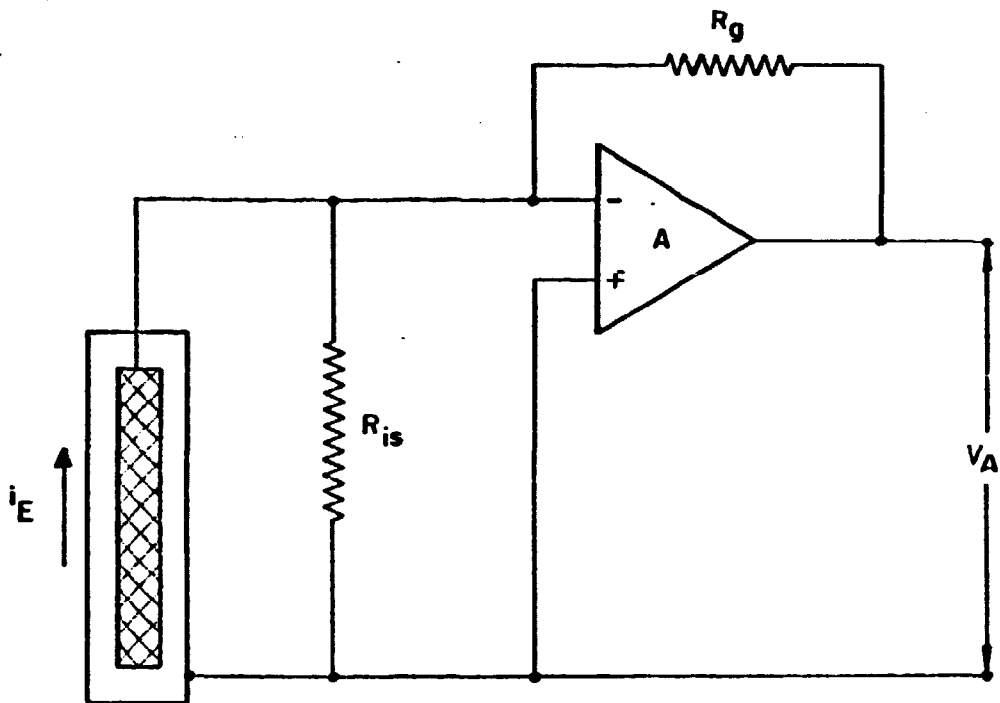


Os diferentes símbolos se referem a pontos experimentais com taxas de dose gama e fluxos de nêutrons variáveis entre os limites abaixo.

Todas as curvas foram calculadas com fórmulas empíricas. A curva 1 mostra o comportamento do detector em um campo misto de radiação gama e nêutrons com taxas de doses de $2,8 \times 10^3$ a $1,4 \times 10^5$ R.h^{-1} e um fluxo de nêutrons de $1,7 \times 10^{12}$ a $8,5 \times 10^{13}$ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

As curvas 2 e 2' fornecem os limites de confiança com um coeficiente de confiança de 0,99. A curva 3 foi obtida fora de um campo de radiação [19].

FIGURA II.8 - DIAGRAMA ELÉTRICO DE AMPLIFICAÇÃO DE CORRENTE DO CONJUNTO "SPN"



Legenda:

- i_E - Corrente do Detector
- R_{is} - Resistência de isolamento global (Detector + Cabo)
- A - Amplificador operacional com ganho de aproximadamente 10^4
- R_g - Resistência de realimentação negativa
- V_{off} - Tensão de "offset" do amp.oper. (não representada)
- V_A - Tensão de saída do circuito amplificador

III. CONSTITUIÇÃO DO CONJUNTO "SPN"

Foram construídos dois protótipos de detector "SPN". Com o primeiro visava-se demonstrar a viabilidade de sua construção em nossas instalações além de fornecer subsídios para o segundo protótipo que foi o definitivo.

Em face da dificuldade de obtenção de um cabo de sinal adequado, optou-se pela adaptação de um conector ao detector para permitir a utilização de cabos provisórios até a solução do problema.

Embora o primeiro protótipo tenha funcionado satisfatoriamente, o isolador de polietileno utilizado deteriora-se muito rapidamente com a radiação, o que limita muito sua vida útil, além de apresentar vários isótopos ativáveis em sua constituição [21].

O segundo protótipo já utilizou isolador de alumina além de se procurar um aumento na sensibilidade a nêutrons.

A seguir descreve-se a construção dos dois protótipos, bem como algumas características do cabo bifilar utilizado.

III.1 Detectores

Os detectores em configuração cilíndrica coaxial, compõem-se de um eletrodo central (emissor) envolto em um material isolante, encerrados em um revestimento que também serve como outro eletrodo (coletor).

O primeiro protótipo tem como emissor um fio de cobalto de 0,381 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, isolador em forma de tubo de polietileno (retirado do próprio cabo de sinal) com diâmetro interno de 0,8 mm e externo de aproximadamente 3,35 mm, e coletor de Inconel 600 com diâmetro interno de cerca de 3,35 mm e externo de 4,763 mm e comprimento total de 152,4 mm (comprimento útil de 150 mm). Entre o emissor e o isolador existe um espaço preenchido com ar seco de aproximadamente 0,21 mm.

A Figura III.1 mostra um corte transversal do primeiro protótipo.

Como resultado da experiência obtida com o primeiro protótipo e a disponibilidade dos materiais, montou-se o segundo protótipo utilizando-se para o emissor um conjunto formado por 9 fios de cobalto com o mesmo diâmetro e comprimento acima citados. Como isolador foi utilizado um tubo (fechado em uma das extremidades) de alumina de alta pureza, já sinterizada, com diâmetro interno de 1,536 mm, diâmetro externo de 2,942 mm e comprimento de 150 mm. Como coletor um tubo de Inconel 600 idêntico ao do protótipo anterior.

Devido às dificuldades na obtenção de materiais, teve-se de tolerar espaços vazios entre os componentes (emissor-isolador-revestimento). Estes espaços foram preenchidos com ar atmosférico seco. A influência desse volume de ar no desempenho do detector é um aumento da sensibilidade gama do detector [6].

A Figura III.2 mostra um corte transversal do segundo protótipo.

A Tabela III.1 resume os dados dos materiais utilizados.

Em ambos protótipos, um conector tipo "SHV" foi soldado ao detector para permitir a conexão de um cabo para transmissão do sinal. No segundo protótipo o conector foi soldado a uma luva de latão que por sua vez foi soldada ao revestimento do detector.

As soldagens entre o emissor e pino de sinal do conector, em ambos protótipos, foram executadas com solda branca comum. No segundo protótipo, a soldagem da luva de latão ao conector e ao revestimento foi executada com solda prata. Essas soldagens de baixo ponto de fusão foram adotadas porque a soldagem por fusão, que seria ideal, implicaria na confecção de um conector especial utilizando materiais com pontos de fusão compatíveis com o do Inconel e do cobalto, além de possuir boas propriedades elétricas, mecânicas e à radiação, o que estava fora de nossas possibilidades. Por outro lado, sabe-se de antemão que não ocorrem temperaturas comparáveis à de fusão dessas soldas nos locais de testes dos detectores no reator IPR-R1.

A escolha do conector recaiu no tipo "SHV" por apresentar, dentre todos os disponíveis, as melhores propriedades de isolamento.

A Figura III.3 mostra o primeiro protótipo montado e a Figura III.4 os componentes do segundo protótipo.

III.2 Cabo de Ligação do Detector ao Circuito de Medida

A pequena ordem de grandeza da corrente medida necessita de um cabo com qualidades especiais: constante de isolamento alta, alta rigidez dielétrica, boas propriedades mecânicas, e baixa seção de choque de ativação para minimizar o sinal de "background".

Os cabos para este tipo de detector, utilizados em reatores de potência, empregam como materiais constituintes, inconel para condutor interno e externo (revestimento) e alumina como isolante.

Como a aquisição de um cabo com estas características é muito difícil no mercado nacional, utilizou-se provisoriamente um cabo bifilar de fabricação nacional da Pirelli, modelo ICD-50, com isolamento em polietileno que, em testes preliminares, mostrou-se satisfatório.

A Tabela III.2 esquematiza e fornece dados levantados sobre a constituição do cabo bifilar utilizado.

III.3 Circuito Eletrônico de Processamento do Sinal

As partes componentes essenciais do circuito de amplificação e processamento de sinal são:

- um amplificador operacional para a corrente do emissor e outro para a corrente de compensação do cabo, que efetua a amplificação e conversão corrente-tensão,

- um amplificador de diferença que executa eletrô

nicamente a diferença das tensões do estágio anterior,

- um amplificador de saída com fator de amplificação continuamente ajustável,

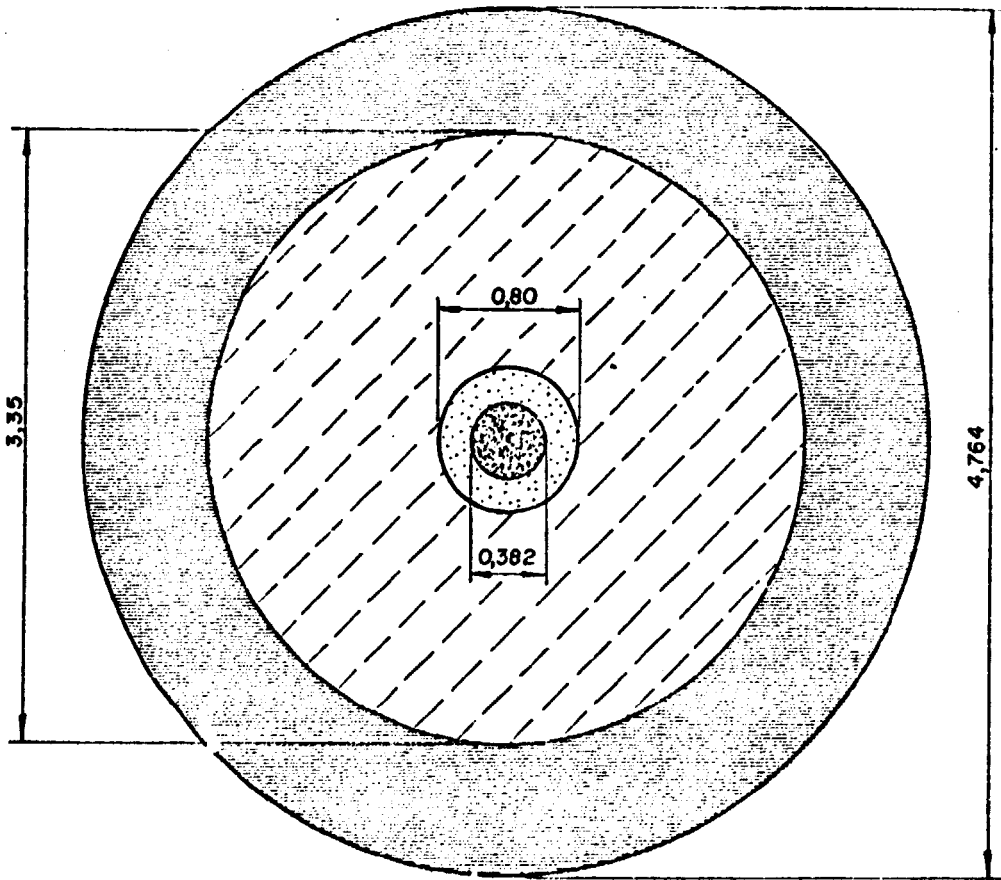
- um amplificador de correção para compensação de "background" (eliminação da parcela devida à ativação do Co-60),

- uma saída digital e

- um registrador contínuo "Strip Chart".

A Figura III.5 mostra um esquema de blocos do circuito.

FIGURA III.1 - CORTE TRANSVERSAL DO PROTÓTIPO I







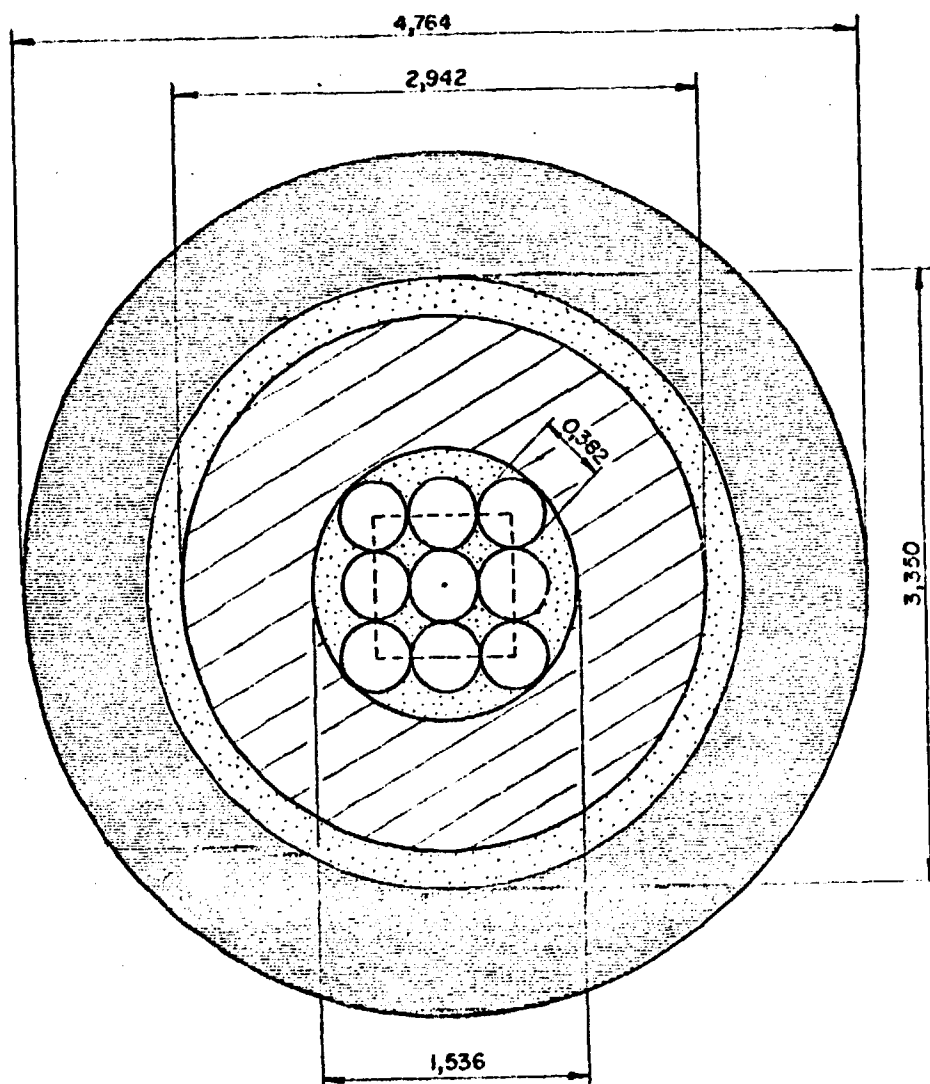
-  INCONEL 600
-  POLIETILENO
-  AR
-  COBALTO

FIGURA III.2 - CORTE TRANSVERSAL DO PROTÓTIPO II







-  INCONEL 600
-  AR
-  ALUMINA
-  COBALTO

TABELA III.1 - DADOS E DIMENSÕES DOS MATERIAIS UTILIZADOS NOS DOIS PROTÓTIPOS

Protó-tipo	Compo-nente	Material	Pureza (%)	Forma	Dimensões				Relações		Procedência
					Diâmetros		Seção Reta (mm ²)	Comprimento efetivo (mm)	$\frac{S_E}{S_C}$	$\frac{V_{\text{vasios}}}{V_{\text{total}}}$ (%)	
					Interno (mm)	Externo (mm)					
I	Emissor	Cobalto	99,366	Fio	-	0,381	0,114	150	0,114	2,3	Reactor Experiments Inc. Cabo Coaxial 59/U Alpha Wire Omega Engineering, Inc.
	Isolador	Poliétileno	-	Tubo	0,80	3,35	8,3				
	Coletor	Inconel 600	(*)	Tubo	3,353	4,763	8,988				
II	Emissor	Cobalto	99,366	9 fios	-	1,143 (efetivo)	1,026 (efetivo)	150	0,341	16,0	Reactor Experiments, Inc. W.Haldenwanger-Tech. Keramik GmbH & Co.KG Omega Engineering, Inc.
	Isolador	Alumina	99,7	Tubo	1,536	2,942	4,945				
	Coletor	Inconel 600	(*)	Tubo	3,353	4,763	8,988				

(*) Análise por Espectrometria de Raios-X feita no CDTN não detectou impurezas presentes

S_E - Superfície lateral do emissor

S_C - Superfície lateral interna do coletor

V - Volume

FIGURA III.3 - PROTÓTIPO I DO "SPN" MONTADO

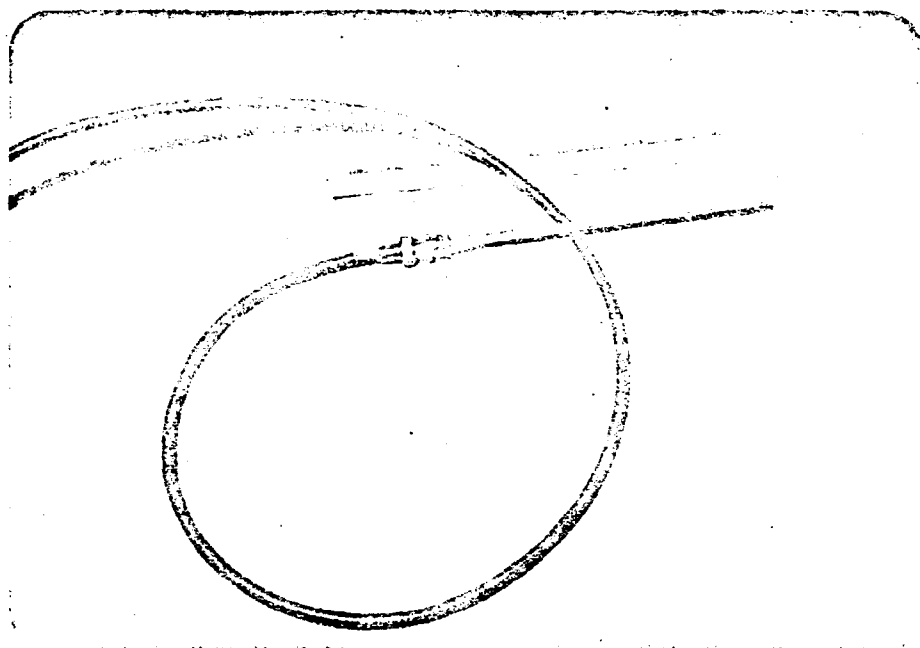


FIGURA III.4 - COMPONENTES DO PROTÓTIPO II DO "SPN"

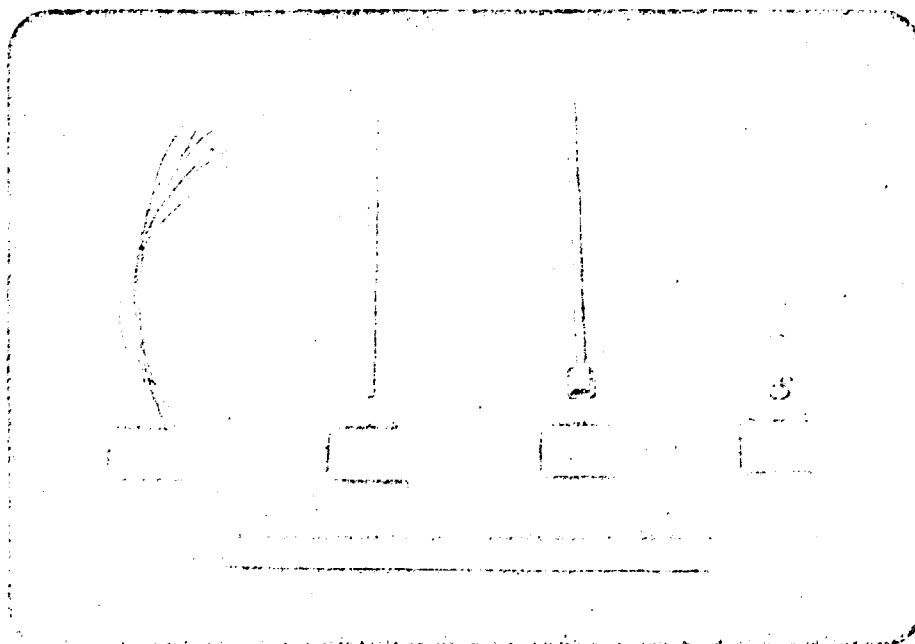
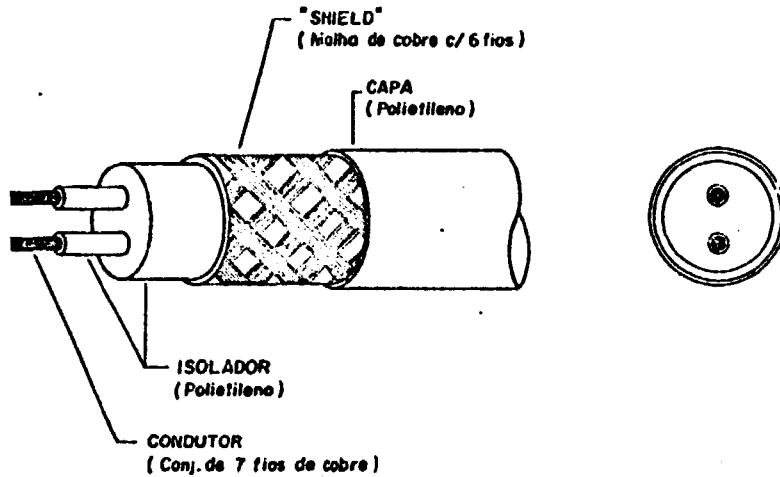
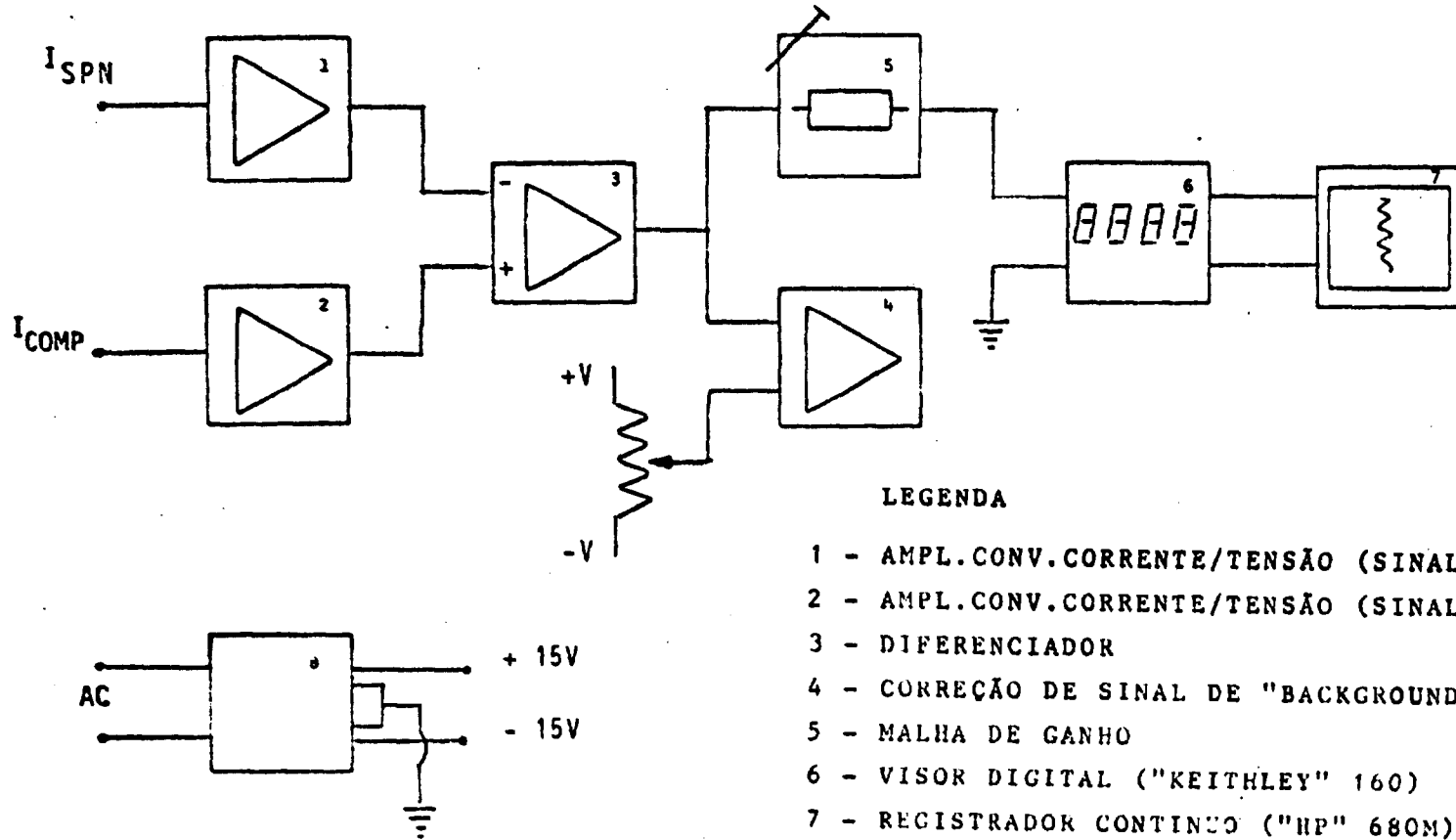


TABELA III.2 - DADOS LEVANTADOS SOBRE O CABO PIRELLI ICD-50



Componente	Diâmetros		Peso por unidade de comprimento	
	Interno	Externo	(g/cm)	(%)
	(mm)	(mm)		
Condutor: (cobre) Conjunto 7 fios	-	0,4	0,07	6
Blindagem: (cobre recoberto) Malha de 6 fios	-	0,18	0,34	26
Isolador: (poliétileno) Tarugo menor (em torno do condutor)	...	3,2	0,42	33
	-	7,4		
Conjunto				
Capa: (poliétileno)	-9	-10	0,45	35
Totais			1,29	100

FIGURA III.5 - DIAGRAMA EM BLOCOS DO CIRCUITO ELETRÔNICO DO "SPN"



LEGENDA

- 1 - AMPL. CONV. CORRENTE/TENSÃO (SINAL DO "SPN")
- 2 - AMPL. CONV. CORRENTE/TENSÃO (SINAL COMPENSAÇÃO)
- 3 - DIFERENCIADOR
- 4 - CORREÇÃO DE SINAL DE "BACKGROUND"
- 5 - MALHA DE GANHO
- 6 - VISOR DIGITAL ("KEITHLEY" 160)
- 7 - REGISTRADOR CONTÍNUO ("HP" 680M)
- 8 - FONTE ALIMENTAÇÃO ("BURR-BROWN" 527)

IV. TESTES E CALIBRAÇÕES COM O SEGUNDO PROTÓTIPO

Vários testes foram necessários para comprovar a adequação da montagem do detector e possibilitar sua utilização, juntamente com o cabo de sinal, no reator IPR-R1.

A seguir descrevem-se os testes de verificação e os testes operacionais do detector definitivo.

Os valores de medida foram, sempre que possível, retirados dos registros gráficos correspondentes, visando-se com isso a obtenção de valores médios representativos da medida.

Antes de qualquer medida, o sinal do detector é "zerado" atuando-se no potenciômetro de correção de "background" (Ver Figura III.5), de modo a eliminar-se o sinal devido à ativação do detector.

IV.1 Testes com o Detector

Os testes com o detector estão divididos em testes de bancada para verificação de propriedades dos componentes e da montagem e testes operacionais do conjunto, incluindo o circuito eletrônico, no referido reator.

IV.1.1 Testes de verificação da montagem

Para verificação da montagem do detector foram fei

tos testes de resistência dielétrica do isolamento com auxílio de um megômetro e radiografias incluindo os pontos de soldagem.

Com as radiografias visou-se verificar o estado da solda interna do emissor ao pino do conector, integridade e alinhamento dos componentes após a etapa de montagem final.

Uma amostra do revestimento de Inconel 600 foi submetida à análise por espectrometria de energia de raios X para comprovação de sua composição. O Anexo IV.1 mostra o certificado dessa análise.

Os testes acima citados resultaram satisfatórios.

A Figura IV.1 mostra o positivo das radiografias feitas em posições deslocadas entre si de 90° .

Após a irradiação do detector no reator IPR-R1 (Ver item IV.1.2), fez-se uma varredura por espectrometria gama com detector de Ge-Li, com passo de 5 mm, de toda sua extensão, incluindo a região das soldas, procurando-se identificar possíveis impurezas ativáveis nos seus constituintes.

A Figura IV.2 ilustra esse procedimento, realizado em um dispositivo construído no Laboratório de Física de Reatores para fazer medidas de atividade em varetas ou barras. Essas medidas são feitas em pontos definidos, através de uma fenda estreita (5 mm, no caso presente) e o dispositivo permite deslocar o objeto de modo a se obter uma varredura de atividade ao longo de seu comprimento [22].

Nas Figuras IV.3 e IV.4 são mostrados os espectros gama de dois pontos do detector, um corresponde a meio comprimento e o outro à região das soldas, com a identificação dos principais picos de absorção total. A Figura IV.5 mostra o es-

pectro gama do "background" ambiente.

Esses picos foram localizados com auxílio do programa "GAMAN" [23].

IV.1.2 Testes de desempenho operacional

a - Testes sob Fluxo Gama Puro

Antes de se testar o detector sob radiação de nêutrons, procurou-se verificar sua resposta à radiação gama pura. Tentativas com fontes gama resultaram negativas devido à baixa intensidade dessas fontes. O dispositivo de irradiação gama do LABRE.CN ("Gamma-Cell") não pôde ser utilizado devido à dificuldades de acesso do cabo de sinal.

Dessa forma, optou-se por utilizar o fluxo gama do reator IPR-R1 desligado. Como o circuito eletrônico de processamento de sinal ainda não estava pronto, para medida das correntes utilizou-se um pico-amperímetro Keithley modelo 410-C acoplado a um registrador contínuo. A Figura IV.5 esquematiza o circuito de medida básico.

Como o revestimento do detector também é parte integrante do circuito eletrônico de medida (coletor), visando-se evitar perturbações nas medidas o detector foi introduzido num receptáculo porta-amostras de poliestireno de uso no reator, o qual também serve como posicionador.

De vez que o medidor de corrente possui apenas uma entrada de sinal, foi necessário alternar-se as leituras das correntes do sinal do "SPN" e do fio de compensação do ca

bo, fazendo-se a diferença entre elas manualmente. Também foram feitas medidas com os dois condutores ligados em série.

O local dessas medidas foi o tubo central (seco) do reator, e a Figura IV.7 mostra o posicionamento do detector. As medidas foram feitas à meia-altura do núcleo do reator.

A Tabela IV.1 mostra os valores obtidos de 2 testes de resposta do conjunto à radiação gama do reator. Nessa tabela também mostra-se a corrente medida simultaneamente à exposição de três dosímetros termo-luminescentes para obtenção da sensibilidade gama do detector (Ver Seção IV.4).

b - Testes sob Fluxo de Nêutrons e Gama

O principal objetivo deste teste é comparar a resposta do "SPN" à do canal linear do IPR-R1 a vários níveis de potência. Para isso utilizou-se um registrador contínuo de dois canais; num deles colocou-se o sinal do canal linear (depois do estágio de amplificação), e no outro o sinal proveniente do "SPN" (saída do pico-amperímetro "Keithley" ou do circuito eletrônico de processamento de sinal).

Foram realizados vários testes procurando-se explorar cada uma das características abaixo:

- resposta a vários níveis de potência
- reprodutibilidade da resposta para alguns níveis de potência
- estabilidade do sinal em potência constante
- tempo de resposta a súbitas inserções ou retiradas de barras de controle do reator.

A Figura IV.8 mostra um gráfico da tensão de saída do circuito eletrônico de medição em função da potência do reator (até 1 kW) obtida do canal linear, no tubo central do reator.

A Figura IV.9 mostra um gráfico idêntico ao anterior para potências desde 0,5 a 10 kW no mesmo local.

Para potências mais elevadas não é possível a utilização do tubo central seco. Assim, o detector foi inserido num tubo seco posicionado ao lado da câmara de ionização do canal linear do reator (Figura IV.10), obtendo-se os dados para o gráfico de resposta em função da potência mostrado na Figura IV.11 com potências desde 1 a 100 kW (potência nominal do IPR-R1).

A Figura IV.12 mostra um registro do sinal do canal linear conjuntamente com o sinal de corrente do "SPN" numa operação típica com potências variáveis. Por ocasião deste teste ainda se utilizava um cabo coaxial para transmissão da corrente do "SPN".

A Tabela IV.2 resume os valores obtidos em dois experimentos a vários níveis de potência do reator. Nesses testes foram medidas simultaneamente as correntes do sinal do detector e de compensação do cabo e a tensão de saída do circuito eletrônico de processamento de sinal. Em alguns níveis de potência (monitorados pelo canal linear do reator) foram repetidas as medidas visando-se observar sua reprodutibilidade. Com os dados dessa tabela construiu-se o gráfico experimental de tensão de saída do circuito eletrônico em função da corrente do detector (obtida por diferença entre as correntes medi-

das de sinal total e a de compensação do cabo - Figura IV.13).

A Figura IV.14 mostra o registro do teste de estabilidade da resposta do "SPN" comparada com a do canal linear do reator. Nesse registro o fundo de escala para tensão do sinal do canal linear foi de 5 V e o do sinal do "SPN", 1 V. Para se evitar ruídos devidos à utilização do dispositivo pneumático de irradiação de amostras do reator, utilizou-se um transformador de isolamento na alimentação do circuito eletrônico. Contudo, alguns sinais espúrios foram registrados devidos à esbarrões inadvertidos no cabo de conexão do detector. Esse teste durou cerca de 8 horas à potência de 100 kW.

A Figura IV.15 compara os registros do sinal do "SPN" ao do canal linear quanto ao tempo de resposta para súbitas inserções de reatividade positiva e negativa no reator. A velocidade do papel nesse teste foi de 1,25 cm/seg. Deve-se observar que a pena do sinal do "SPN" tem um afastamento físico da outra de cerca de 3 mm, riscando atrasada em relação à outra com essa mesma diferença.

IV.2 Testes com o Circuito Eletrônico de Processamento de Sinal

O circuito eletrônico de processamento de sinal foi testado em bancada quanto à sua resposta às correntes na entrada.

Para se obter correntes de ordem de grandezas mais próximas possíveis daquelas a serem obtidas com o detector,

foi necessário utilizar-se um circuito com resistores de precisão de alto valor ôhmico (500 e 50 M Ω). Como fonte de tensão utilizou-se uma fonte marca Hewlett-Packard, modelo 6220 B e, como monitores de tensão aplicada e corrente, um voltímetro marca Data Precision, mod. 2540 e um picoamperímetro marca Keithley mod. 610 C.

A Tabela IV.3 mostra os valores obtidos no teste.

As Figuras IV.16 e IV.17 mostram os gráficos da tensão de saída do circuito eletrônico em função da entrada de corrente do "SPN" e de compensação do cabo, respectivamente.

IV.3 Testes com o Cabo de Sinal

Antes de ser utilizado no reator, uma amostra do cabo bifilar foi analisada por espectrometria de raios X.

A Figura IV.18 mostra o espectro obtido com a identificação dos elementos encontrados.

Outra amostra foi irradiada no tubo central do reator IPR-R1 a 100 kW por 67 minutos e depois submetida a uma análise por espectrometria gama com detector de germânio de alta pureza. A Figura IV.19 mostra uma parte do espectro com a identificação de alguns picos de absorção total e a Figura IV. 20 o espectro do "background" do ambiente.

Visando-se verificar a degradação do cabo com a irradiação acumulada, outra amostra foi colocada na mesa giratória do reator e irradiada por cerca de 7 meses até atingir

um fluxo integrado de nêutrons tērmicos de cerca de 5×10^{17} nvt (nêutrons/cm²).

Após a retirada procurou-se testar suas propriedades dielétricas e mecânicas. O teste com megôhmetro foi satisfatório, i.ê. o isolamento mantinha suas propriedades dielétricas, porém o material liberava pó e apresentava-se quebradiço, espatifando-se a uma leve flexão. Além disso, apresentava uma cor amarelada característica em lugar da cor branca original.

Após utilização em potência alta no reator, a monitoração do cabo acusou uma grande atividade induzida pela radiação na extremidade inserida no reator, o que dificultou sua manipulação e armazenamento.

IV.4 Calibrações

IV.4.1 Determinação da sensibilidade gama

A determinação da sensibilidade gama do "SPN" somente foi possível utilizando-se o tubo central do reator IPR-R1 desligado, de vez que fora do núcleo (no tubo seco ao lado da câmara de ionização do canal linear do reator) o fluxo gama é muito baixo e as medidas de corrente efetuadas nesse local se igualam às obtidas fora do reator ("background").

Os resultados de leitura dos dosímetros termoluminescentes (DTL's) parecem indicar existir uma atenuação radial do fluxo gama de cerca de 400 vezes do tubo central para o po

ço do reator.

Para medida da exposição gama do "SPN" utilizaram-se dosímetros termoluminescentes (DTL's) colocados juntamente com o detector, fazendo-se a medida da corrente do detector. Os valores de taxa de exposição lidos dos DTL's são correlacionados com a corrente do "SPN".

Os DTL's utilizados são do tipo LiF marca Harshaw, mod.TLD-700, com resposta na faixa de energia desde Raios X a alguns Mev e faixa de exposição desde mR a 10^5 R, e insensíveis a nêutrons.

A Tabela IV.4 exhibe os valores de corrente medidos e taxas de exposição dos DTL's, bem como a sensibilidade gama estimada.

IV.4.2 Determinação da sensibilidade a nêutrons térmicos

Para a determinação da sensibilidade do detector a nêutrons térmicos é necessária uma medida absoluta de fluxo de nêutrons no local do detector, a uma potência suficientemente alta para que o fluxo gama presente seja comparativamente desprezível.

Assim optou-se pelo método da ativação [24] utilizando-se folhas de ouro para medida de fluxo de nêutrons. Para medida da resposta a nêutrons epitérmicos foi feita também uma medida de razão de cádmio para a folha de ouro. Para isso, duas folhas nuas foram irradiadas a potência de 50 e 100 kW e outra sob cádmio a 100 kW.

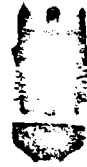
Para determinação da atividade induzida nas folhas utilizou-se um sistema monocanal com detector de NaI(Tl).

Os valores de tensão de saída do circuito do "SPN" foram retirados do gráfico em função da potência do reator (Figura IV.10).

Os valores de corrente do "SPN" foram retirados do gráfico "Tensão Saída x Corrente do "SPN" (Figura IV.12).

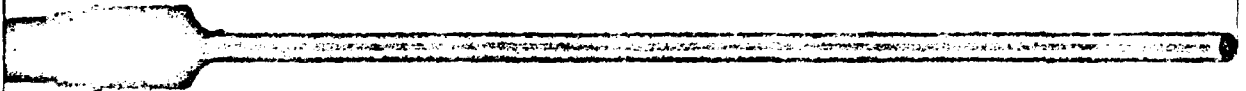
A Tabela IV.5 mostra os dados das folhas de ouro, dados de irradiação e atividade medida, bem como a correspondente corrente e tensão de saída do circuito do "SPN" e os valores de sensibilidade a nêutrons térmicos.

FIGURA IV.1 - RADIOGRAFIAS DO DETECTOR "SPN" INCLUINDO O CONECTOR

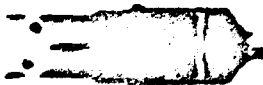


DETETOR SPN
 LADFRE PD
 DIETS PD 02285
 3WIN TO CH 0
 80 KV SMA
 19 03 85 00ZY

DETETOR SPN
 LADFRE PD
 DIETS PD 02285
 3WIN TO CH 90
 180 KV SMA 90
 19 03 85 00ZZ



90



19 03 85 00ZZ

ANEXO IV.1 - CERTIFICADO DE ANÁLISE DE UMA AMOSTRA DO REVESTIMENTO DO DETECTOR "SPH"



CENRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR
Centro Universitário - Pesquisas - Tel. 451 5122 - Telex 0311173
CP 3941 - CEP 30.000 Belo Horizonte - MG - Brasil

CERTIFICADO DE ANÁLISES Nº GQ6574

Orgão emissor:
SUPED/GTCQ

Data:
01/01

Solicitante:

LABFRE.PD/DITES.PD/DETR.PD

Materiais recebidos:

Inconel

Referência:

LABFRE.PD 004/85

Serviço solicitado:

Análise quantitativa ^{para} especificação do Inconel (600 ou outro).

Procedência:

Omega (EUA)

Orgão executor:
DIEMI.PD

Procedimento/Resultados

Amostra	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo	Ti
SPN-PM-01/85	16,2	7,3	76,7	ND	ND	ND

OBSERVAÇÕES

1. ND = não detectado
2. Método analítico utilizado
- espectrometria de energia de raios X
3. Resultados obtidos por comparação com padrões de Inconel 600, 625 e 718
4. Incerteza experimental da ordem de 10%

EXECUÇÃO DA ANÁLISE

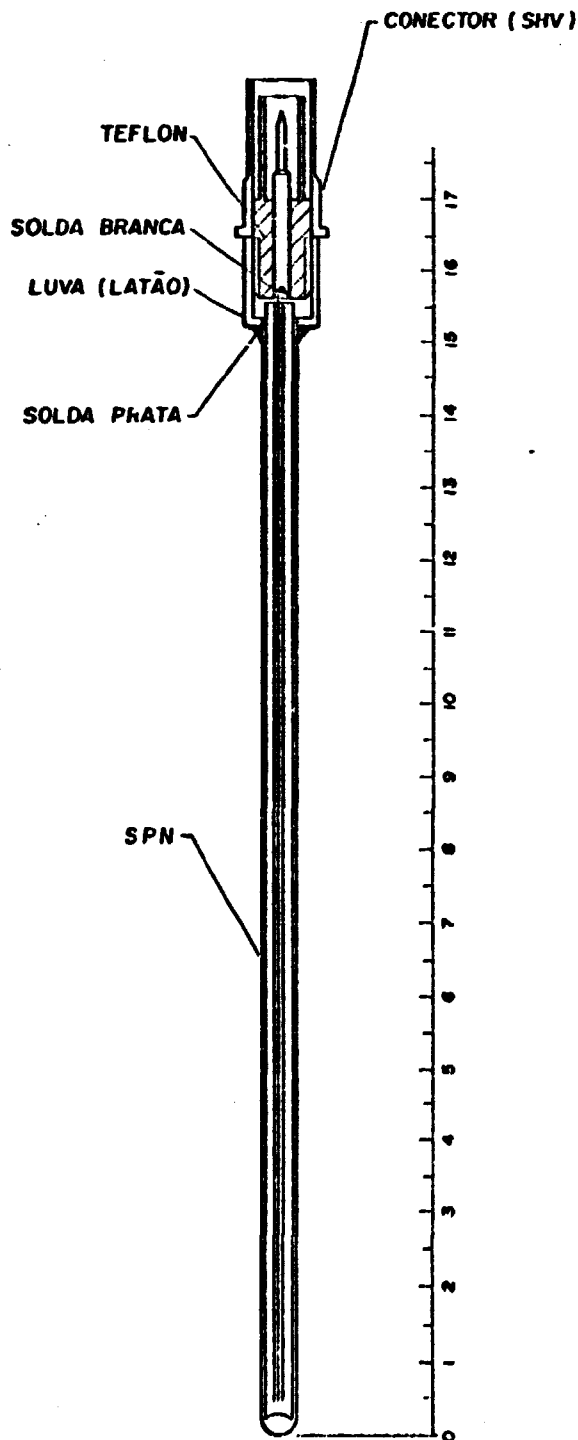
Clecio Campi Murta
Clecio Campi Murta

Divisão de Estudos Minerais

Belo Horizonte, 06 de setembro de 1985
Grupo Técnico de Garantia da Qualidade

Paulo de Tarso M. Gomide
Paulo de Tarso M. Gomide
CRQ 2300142 - 2ª Reg. MG

FIGURA IV.2 - DETECTOR "SPN" - PM - ESQUEMA PARA ESPECTROMETRIA GAMA

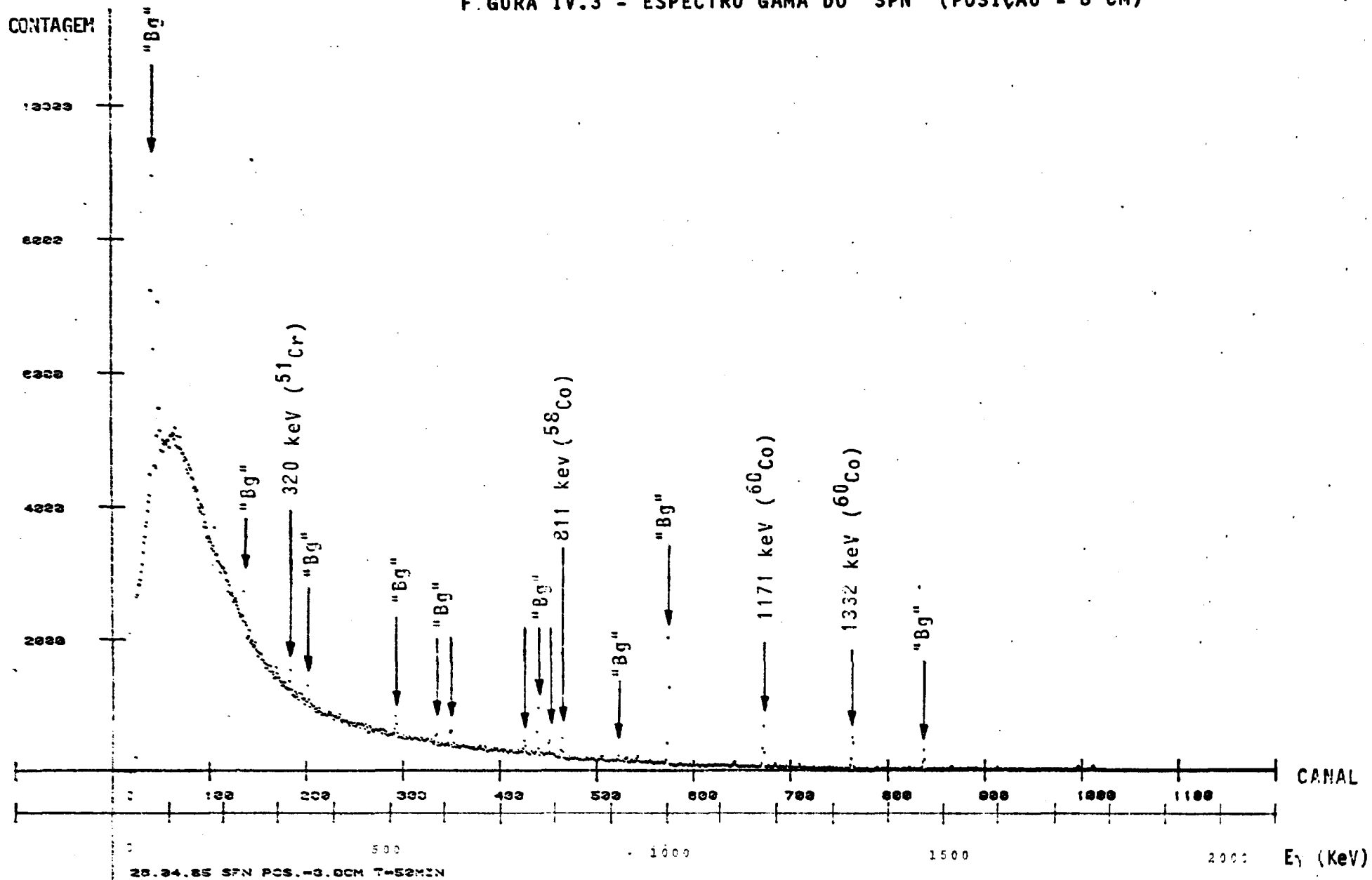


CONSTITUIÇÃO :

EMISSOR : COBALTO
ISOLADOR : ALUMINA
COLETOR : INCONEL - 600

Escola : 1:1

FIGURA IV.3 - ESPECTRO GAMA DO "SPN" (POSIÇÃO = 8 CM)



28.04.85 SPN POS. = 8.0CM T=52MIN

CORTAGEM

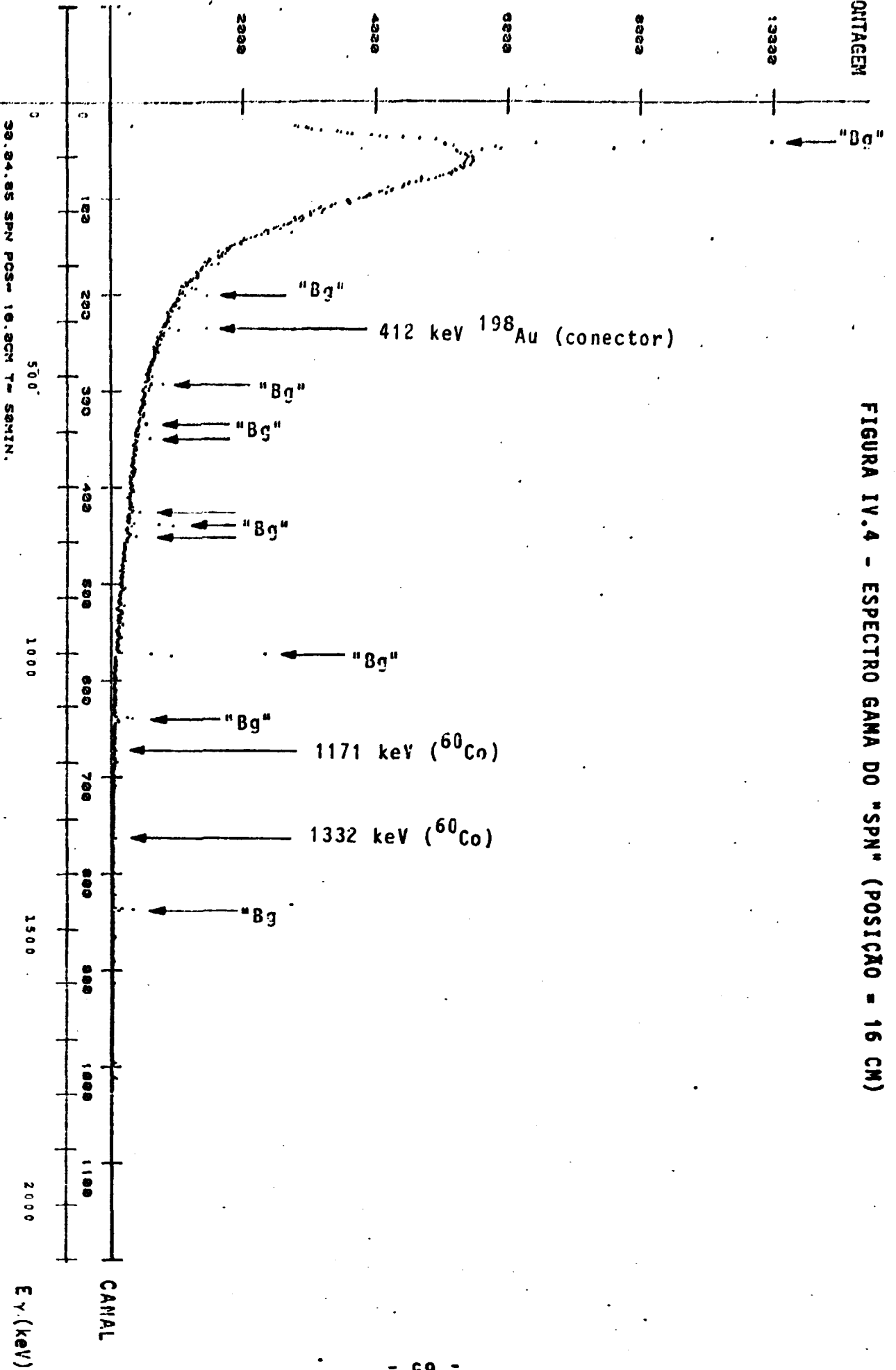


FIGURA IV.4 - ESPECTRO GAMA DO "SPN" (POSICAO = 16 CM)

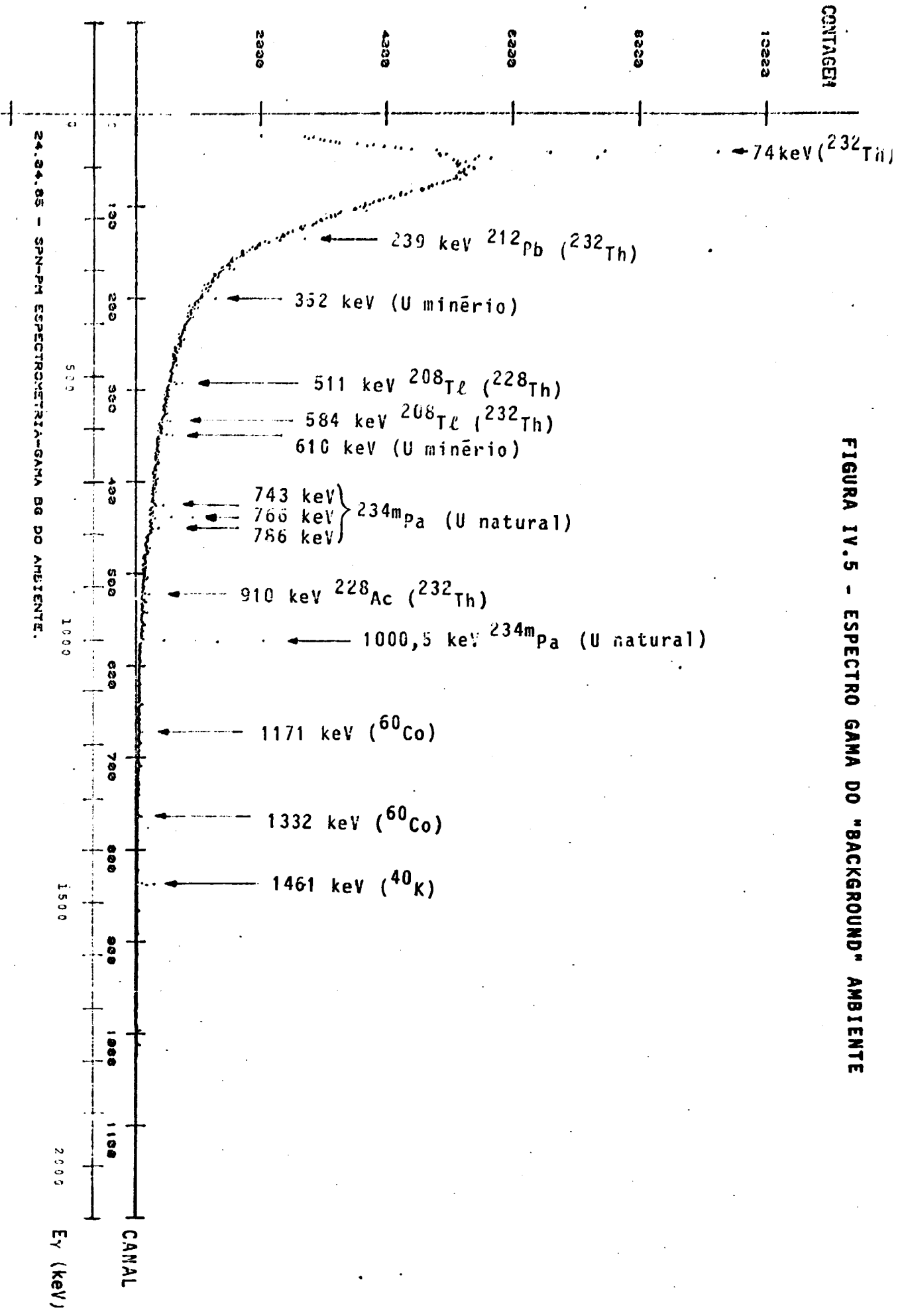


FIGURA IV.5 - ESPECTRO GAMA DO "BACKGROUND" AMBIENTE

FIGURA IV.6 - ESQUEMA DO CIRCUITO DE MEDIÇÃO COM PICO AMPERÍMETRO

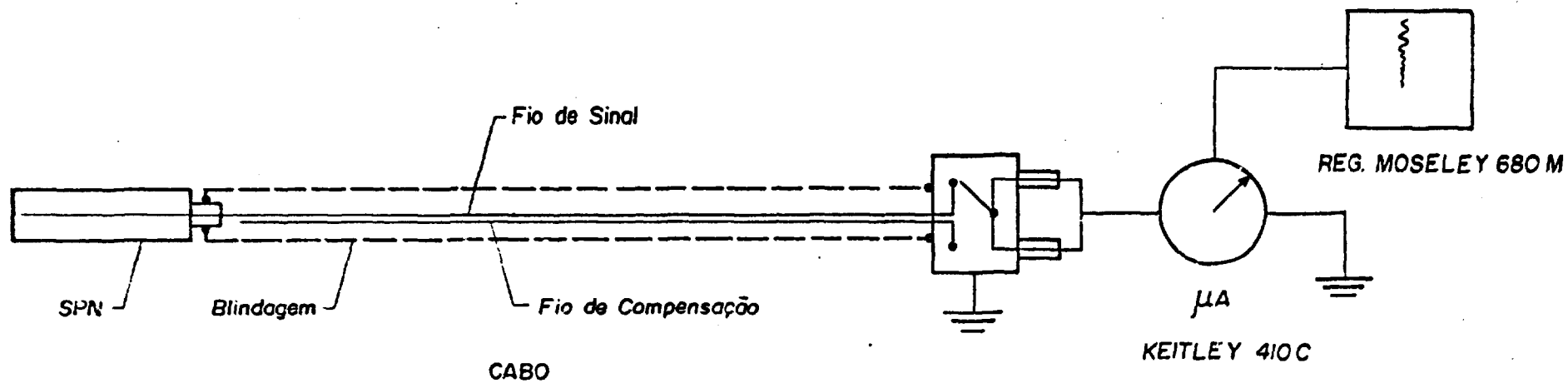
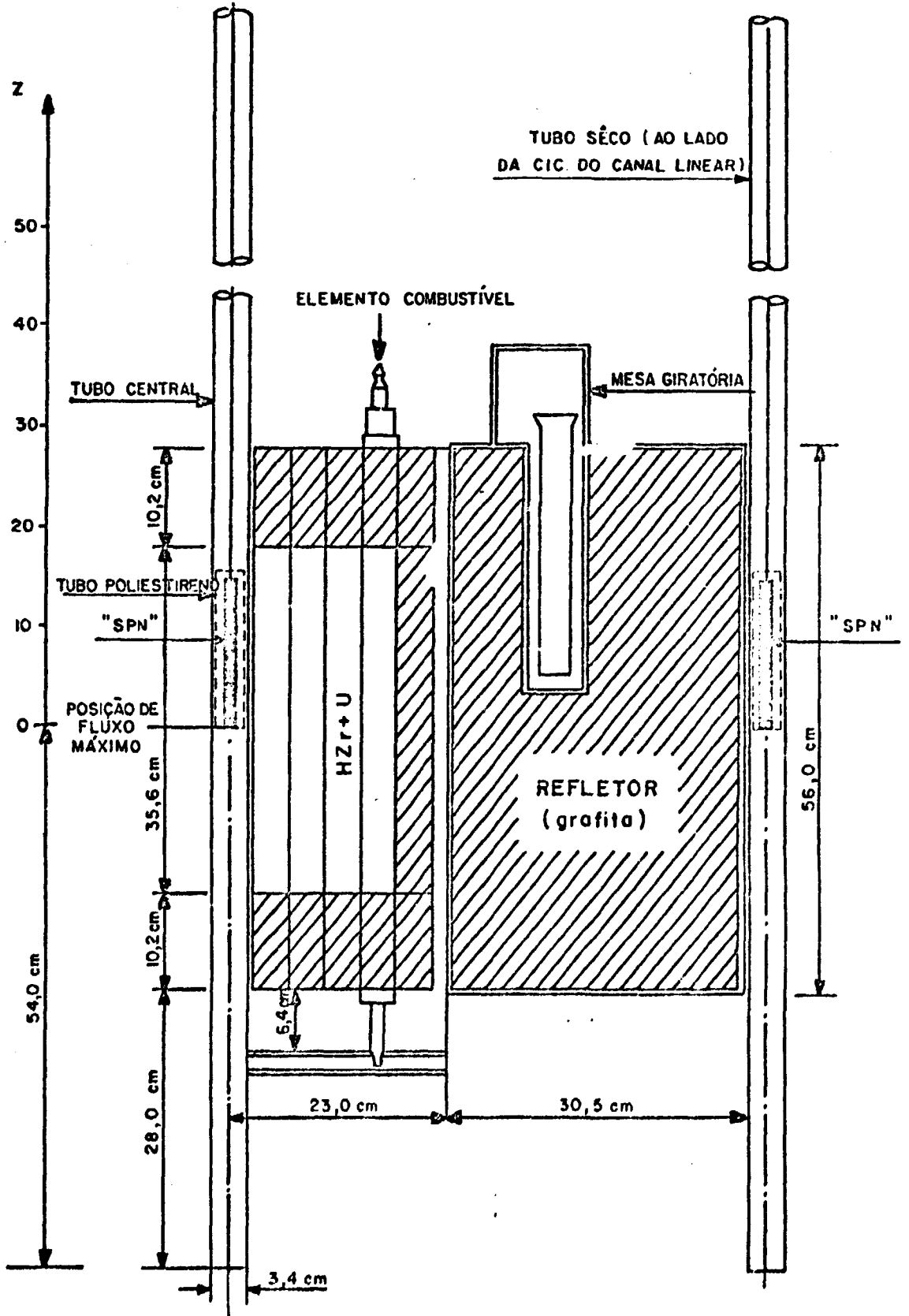


FIGURA IV.7 - CORTE VERTICAL DO NUCLEO DO IPR-R1 MOSTRANDO OS DOIS LOCAIS DE POSICIONAMENTO DO "SPN"



- 69 -

TABELA IV.1 - TESTES DE RESPOSTA DO CONJUNTO "SPN" AO "BACKGROUND" AMBIENTE E FLUXO GAMA DO REATOR IPR-R1 DESLIGADO

Local dos Testes: Tubo Central (Seco)

Data	Elementos testados	Posição Z* (cm)	Corrente medida (A) x 10 ⁻¹³	Observações
29.05.85	Condutor sinal	Fora do reator	+ 1,25	Condição anterior do reator: Funcionamento 1 h - 100 kW Intervalo desde o desligamento: 24 h Corrente de "Background": $i_{Bg,SPN} = -0,1 - (1,50) =$ $= -1,4 \times 10^{-13} \text{ A}$ Corrente devida a Gama: $i_{\gamma,SPN} = -40 - (-25) =$ $= -15 \times 10^{-13} \text{ A}$ $i_{\gamma,SPN} = -30 - (-14) =$ $= -16 \times 10^{-13} \text{ A}$
	Condutor comp.	"	+ 1,50	
	Condutores série	"	+ 1,50	
	Condutores série com o "SPN"	"	- 0,1	
	Condutor sinal	0	- 14	
	Condutor comp.	"	- 12	
	Condutores série	"	- 25	
Condutores série com o "SPN"	"	- 40		
Condutores sinal com o "SPN"	"	- 30		
31.05.85	Condutor sinal	Fora do reator	+ 2,5	Condição anterior do reator Funcionamento 2,5 h - 100 kW Intervalo desde o desligamento: 16 h Corrente devida a Gama: $i_{\gamma,SPN} = -60 - (-25) =$ $= -35 \times 10^{-13} \text{ A}$ $i_{\gamma,SPN} = -46 - (-16) =$ $= -30 \times 10^{-13} \text{ A}$
	Condutor Comp.	"	+ 2,4	
	Condutor sinal	0	- 16	
	Condutor comp.	"	- 14	
	Condutores série	"	- 25	
	Condutores série com o "SPN"	"	- 60	
	Condutor sinal com o "SPN"	"	- 46	
Condutores série	10	- 9,2		
Condutores série com o "SPN"	"	- 13		

* Ver Figura IV.7 para o posicionamento.

FIGURA IV.8 - TENSÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO ELETRÔNICO DO "SPN" EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA REGISTRADA PELO CANAL LINEAR DO REATOR IPR-R1 (DE 0 A 1 KW)

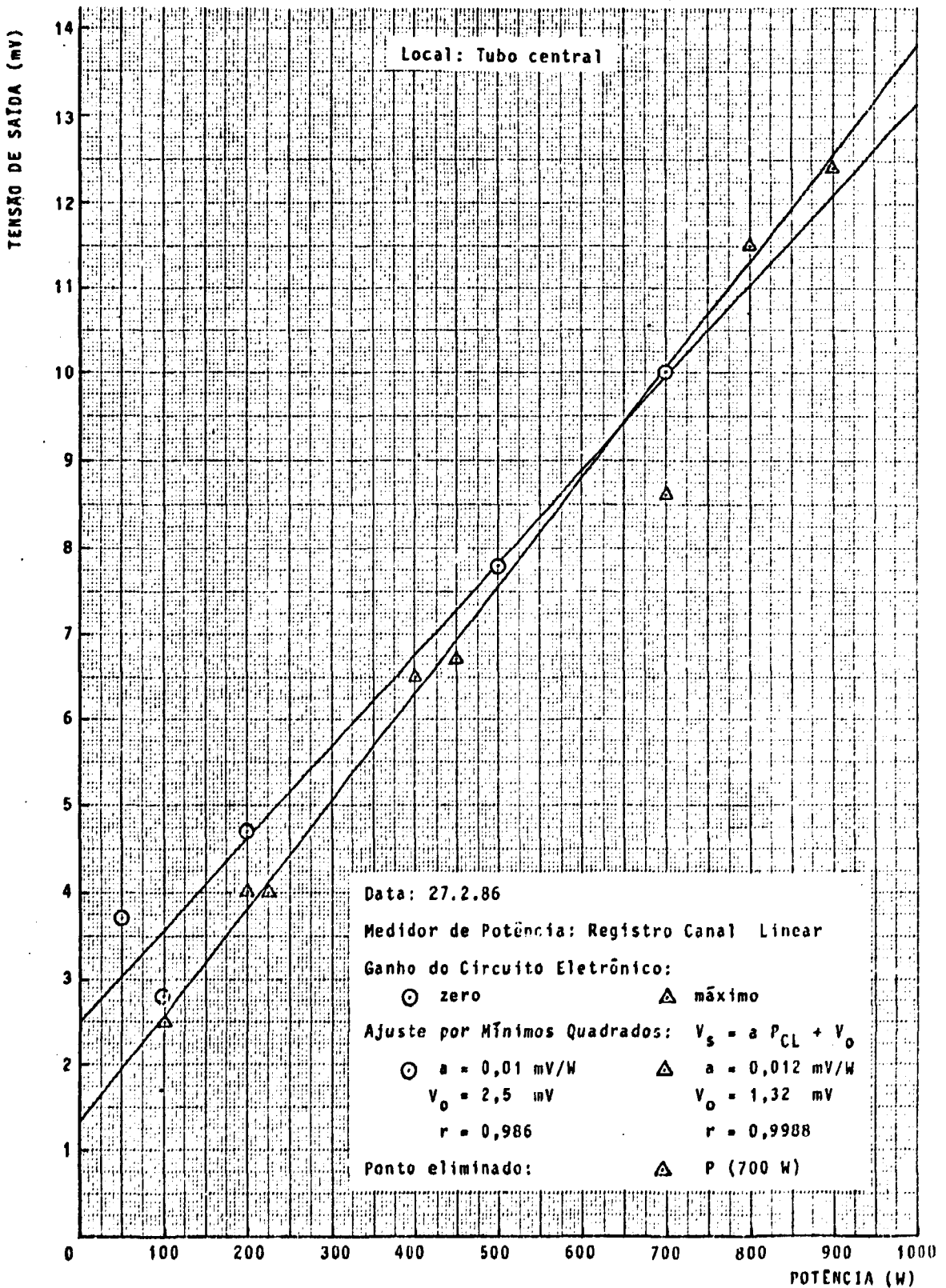


FIGURA IV.9 - TENSÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO ELETRÔNICO DO "SPN" EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA REGISTRADA PELO CANAL LINEAR DO REATOR IPR-R1 (DE 0,5 A 10 kW)

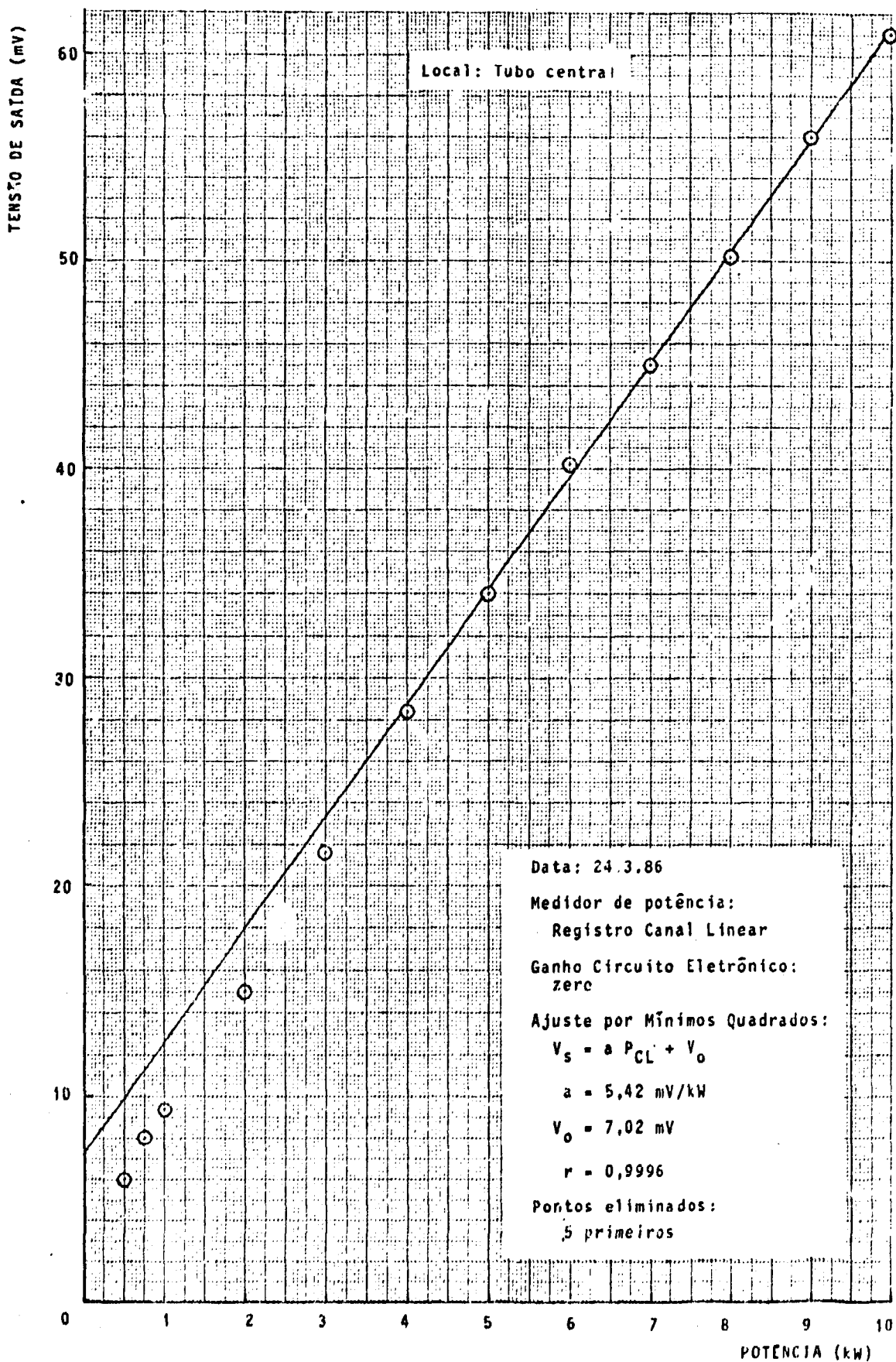
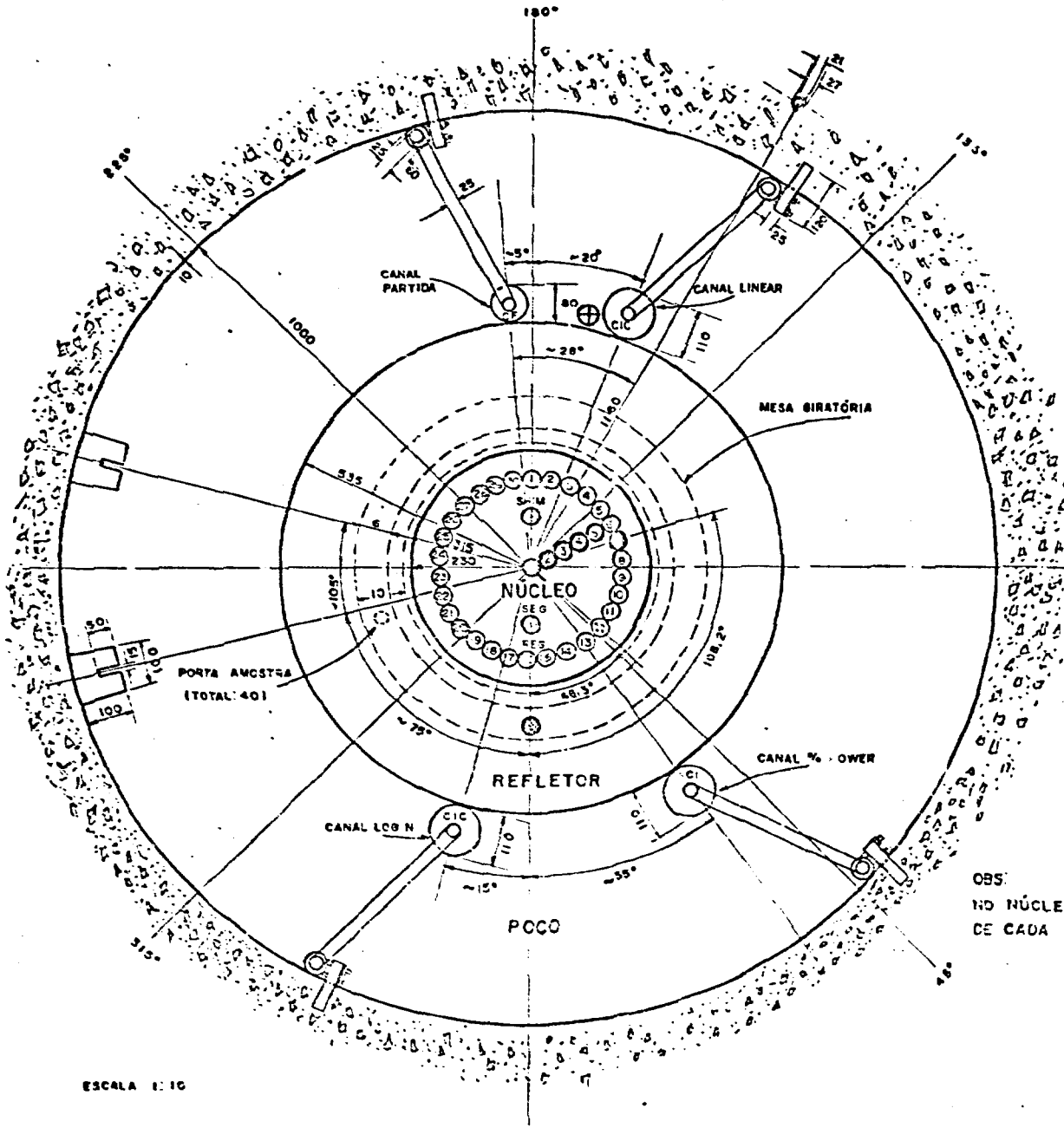


FIGURA IV.10 - CORTE HORIZONTAL DO REATOR TRIGA



LEGENDA

- ELEMENTO COMBUSTIVEL.
- ELEMENTO DE GRAFITA.
- ⊗ BARRA DE CONTROLE.
- ⊗ TUBO CENTRAL.
- ⊗ TERMINAL DO TUBO PNEUMÁTICO.
- FONTE DE NÊUTRONS.
- ⊗ TUBO DE ACESSO À MESA GIRATÓRIA.
- CF - CÂMARA DE FISSÃO.
- CIC - CÂMARA DE IONIZAÇÃO COMPENSADA.
- CI - CÂMARA DE IONIZAÇÃO NÃO COMPENSADA.
- ⊕ TUBO SECO COM O "SPN"

OBS: NO NÚCLEO CONSTA APENAS UM ELEMENTO COMBUSTIVEL DE CADA ANEL.

ESCALA 1:10

FIGURA IV.11 - TENSÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO ELETRÔNICO DO "SPN"
EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA REGISTRADA PELO CANAL
LINEAR DO REATOR IPR-R1 (DE 1 A 100 kW)

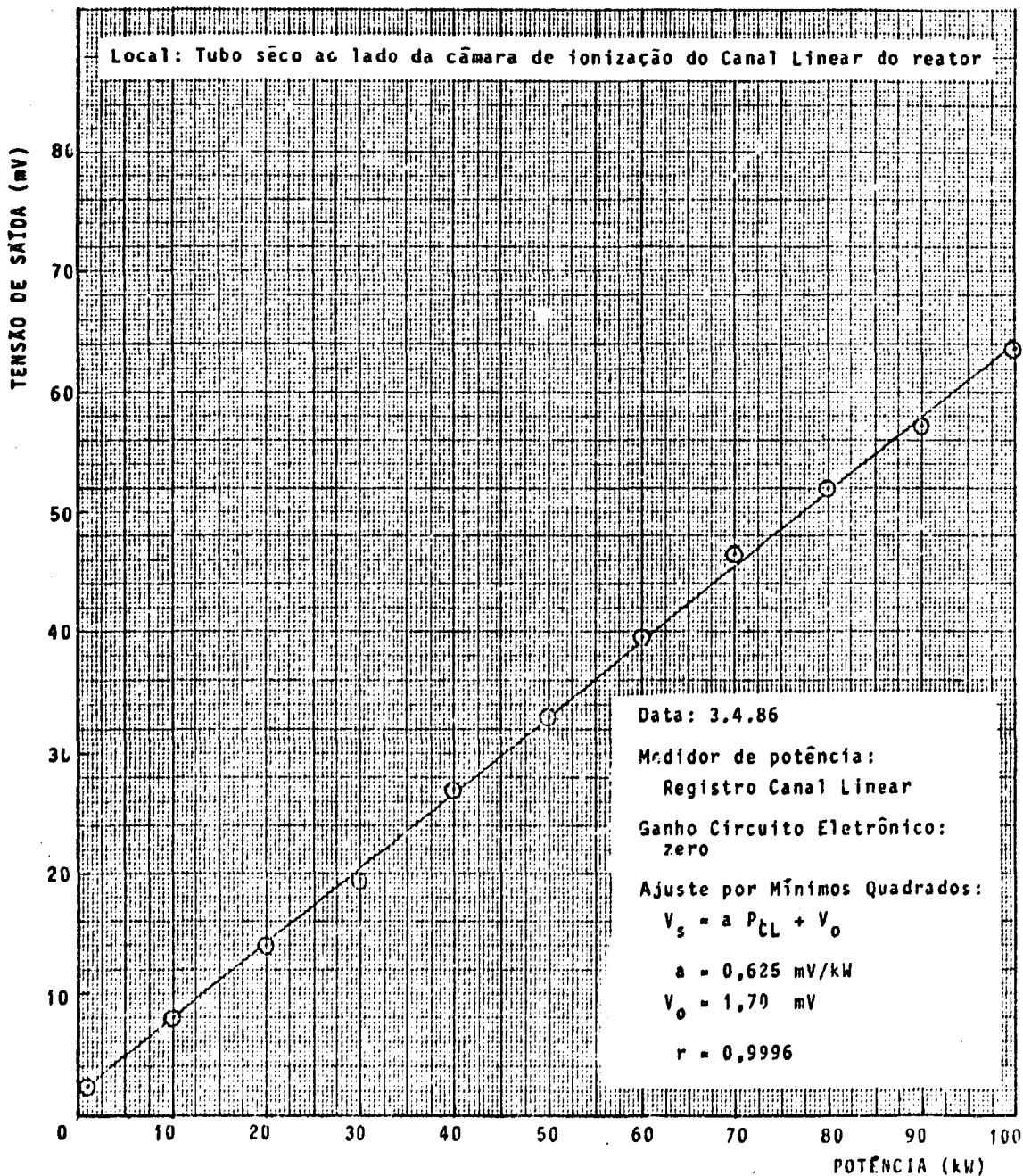


FIGURA IV.12 - REGISTRO DO SINAL DO CÂNAL LINEAR DO REATOR IPR-R1
E DA CORRENTE DO "SPN"

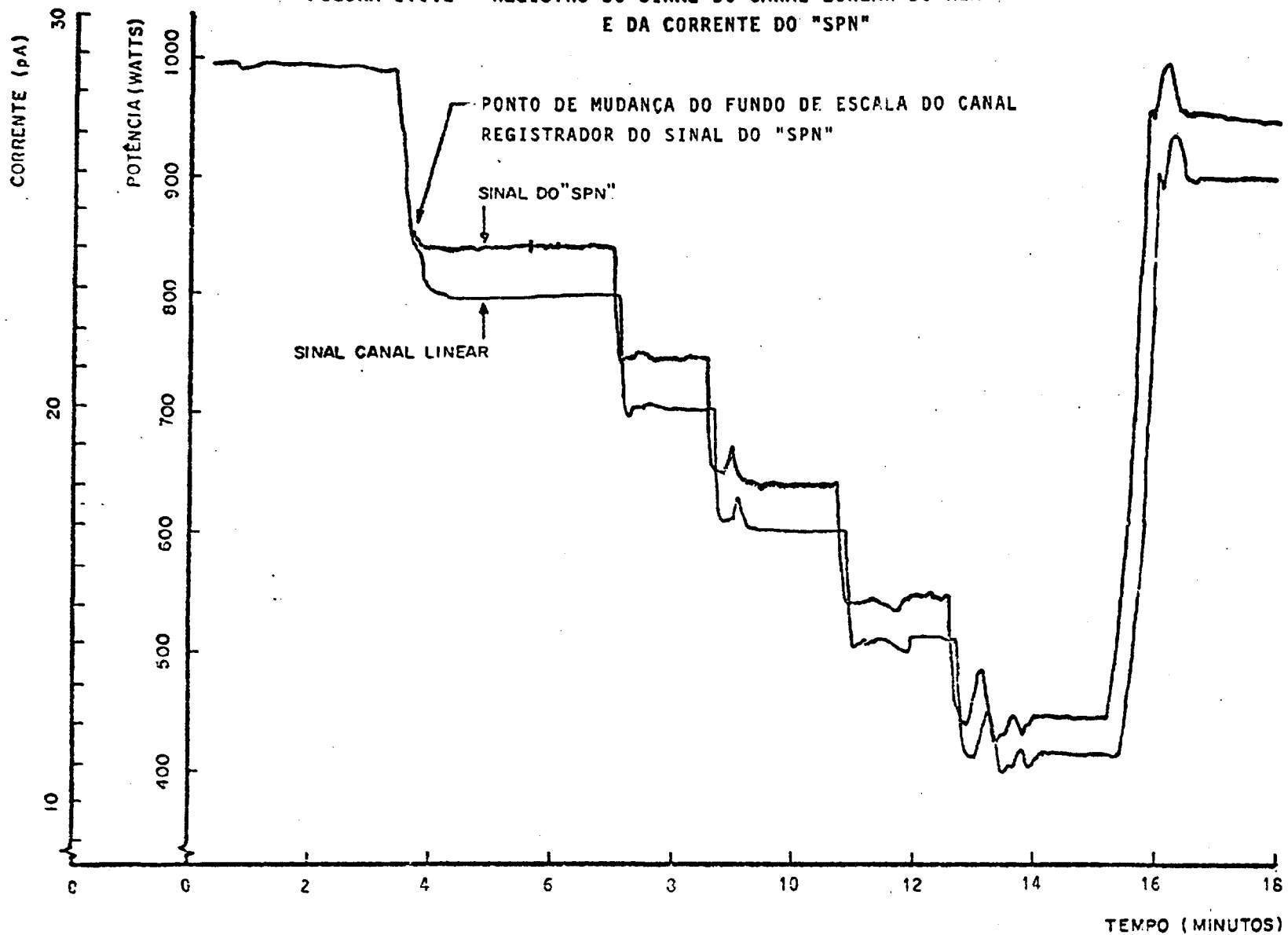


TABELA IV.2 - RESUMO DAS MEDIDAS DE CORRENTE E TENSÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO ELETRÔNICO DE PROCESSAMENTO DE SINAL

Potência (kW)	i_{tot} (A) x 10 ⁻¹¹	i_{comp} (A) x 10 ⁻¹¹	i_{SPN}^* (A) x 10 ⁻¹¹	V _{saída} (mv)	Observações
1	0,17	0,15	0,02	2,5	
10	1,65 2,0	- 0,38	1,44	8	
20	3,7 3,95	- 0,55	3,28	14	
30	6,0 6,0	- 0,62	5,38	19,6	Refrig.ligada
40	8,35	0,65	7,7	27	3/4/86
50	10,5 10,6	... 0,92	9,63	33	
60	13,2 -	0,72 -	12,48	39,3	3/4/86
70	15,2 15,6	1,25 1,12	14,22	46,5	
80	18,0	1,25	16,75	51,5	3/4/86
90	20,0	1,9	18,10	57,0	3/4/86
100	23,0 23,5	1,9 ...	21,35	63,6	Refrigi.ligada

Observações: Nas seções da tabela com linha dupla, a primeira corresponde a 3/4/86 e a segunda a 4/4/86.

O símbolo (-) significa que não foi feita medida.

O símbolo (...) significa valor não confiável por não se ter atingido uma clara estabilização do registro.

* Valor obtido por diferença : $i_{tot} - i_{comp}$.

Os valores de corrente e tensão acima são em valor ab soluto.

FIGURA IV.13 - TENSÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO ELETRÔNICO EM FUNÇÃO DA CORRENTE DO "SPN"

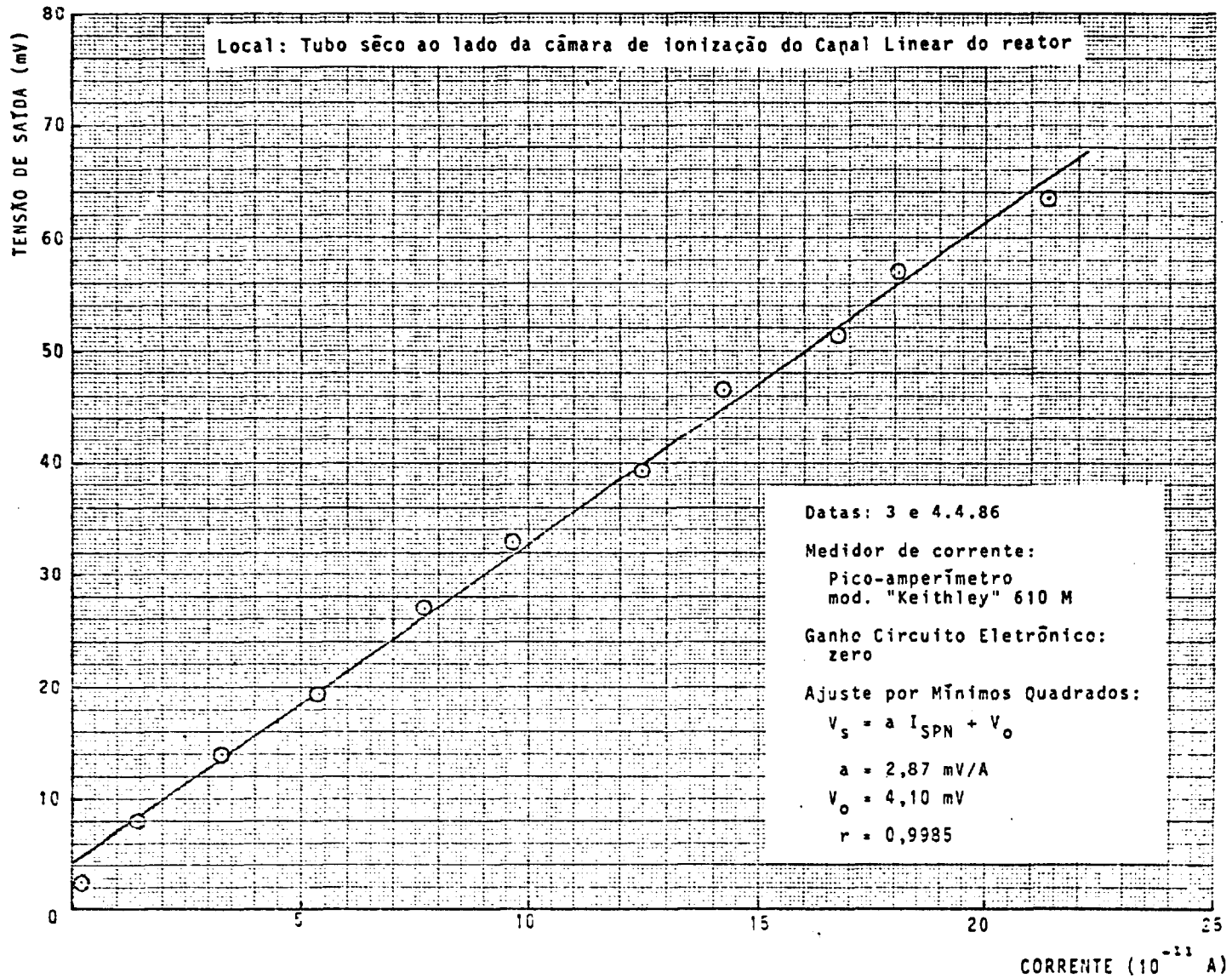


FIGURA IV.14 - TESTE DE ESTABILIDADE DA RESPOSTA DO "SPN"

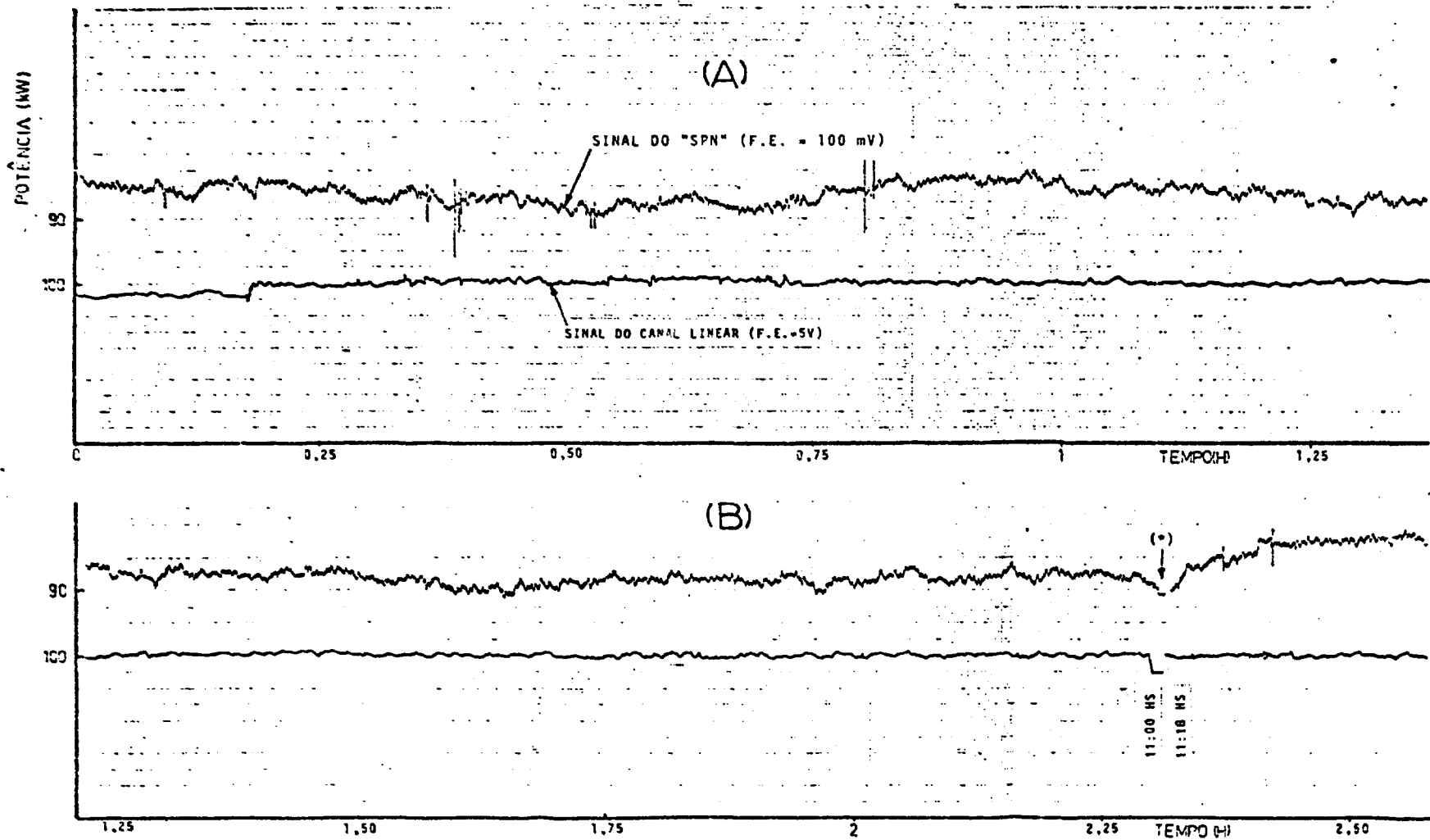


FIGURA IV.14 - CONTINUAÇÃO

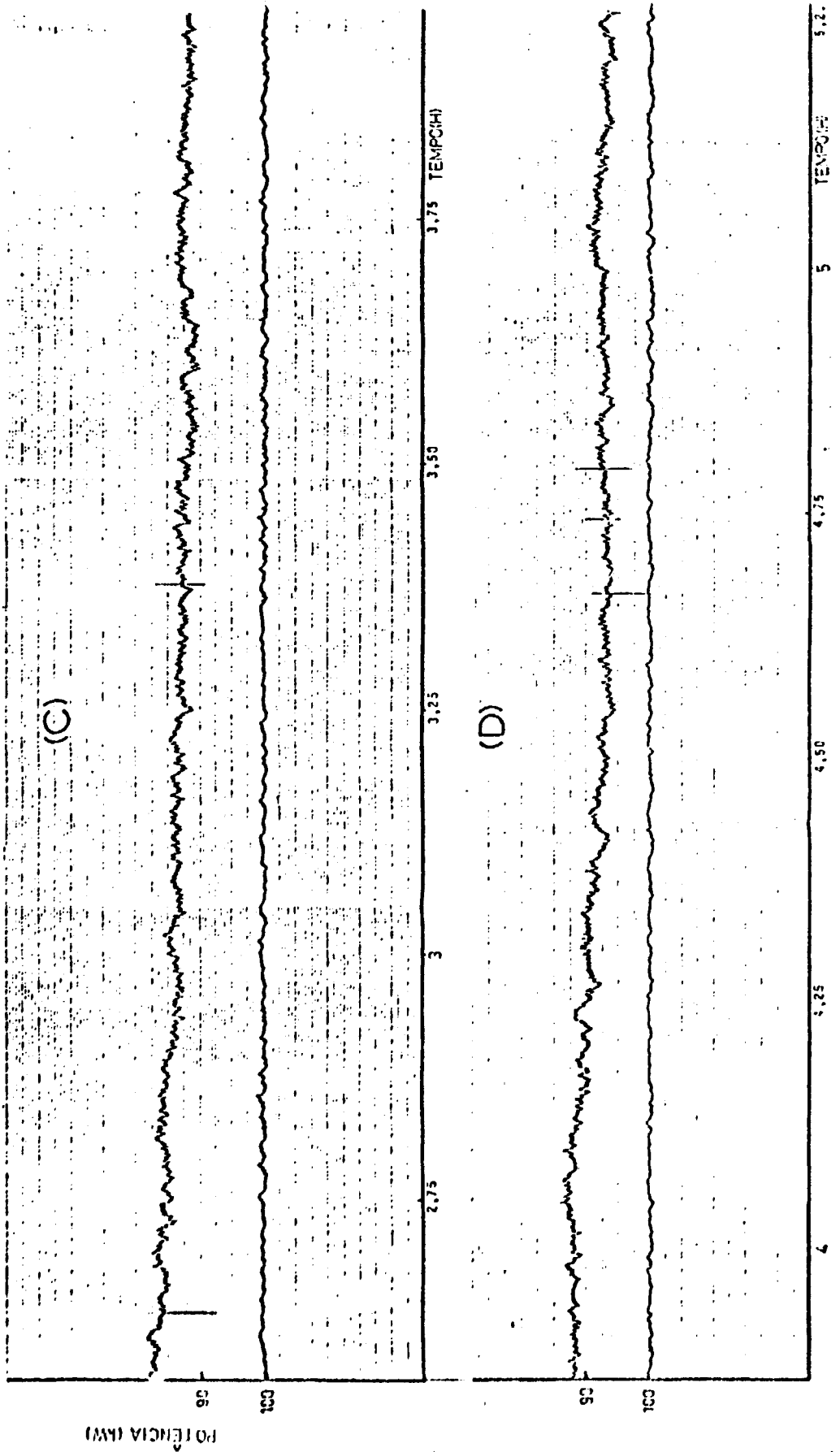


FIGURA IV.14 - CONTINUAÇÃO

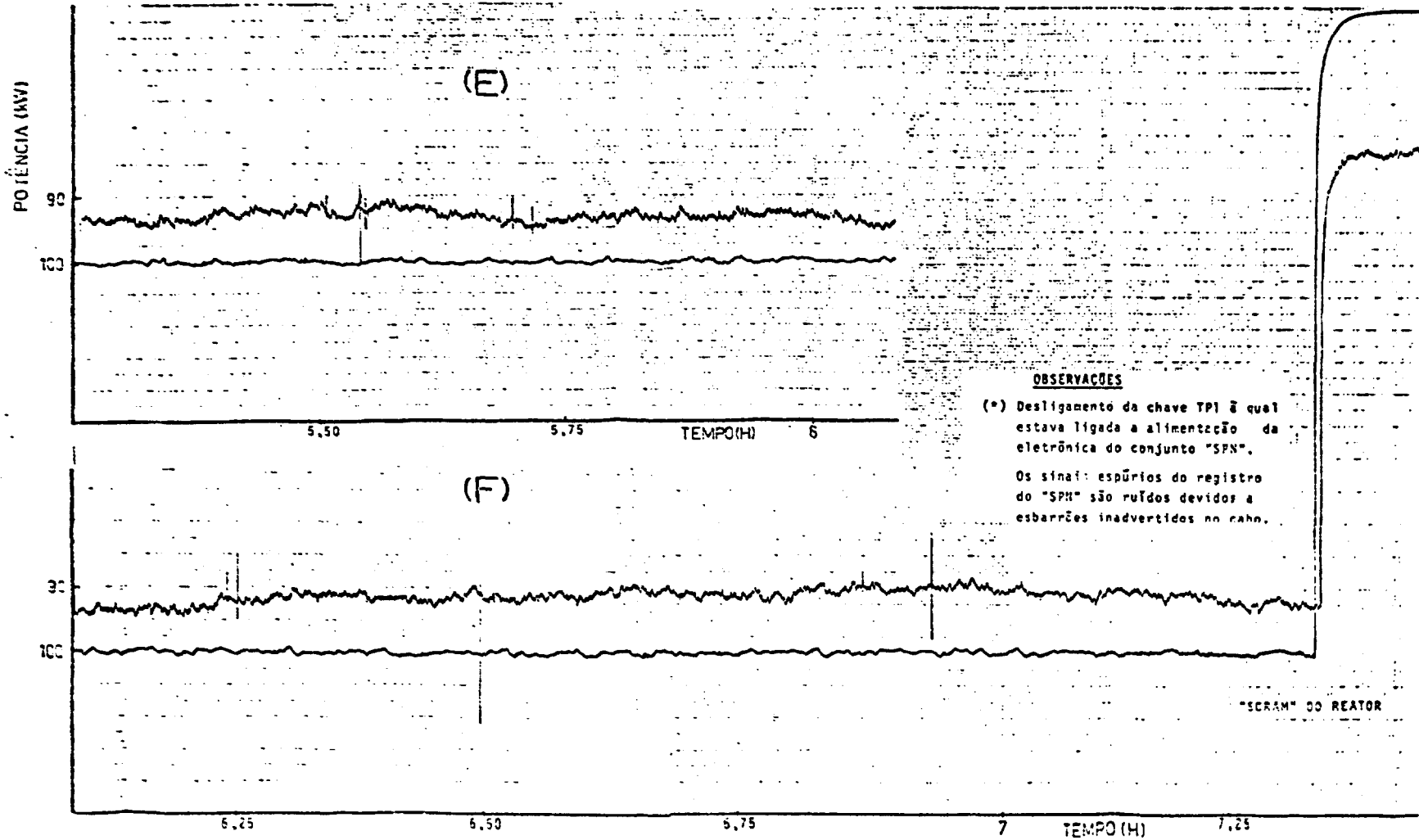


FIGURA IV.15 - TESTE DE TEMPO DE RESPOSTA DO "SPN" PARA INSERÇÕES DE REATIVIDADE POSITIVA E NEGATIVA

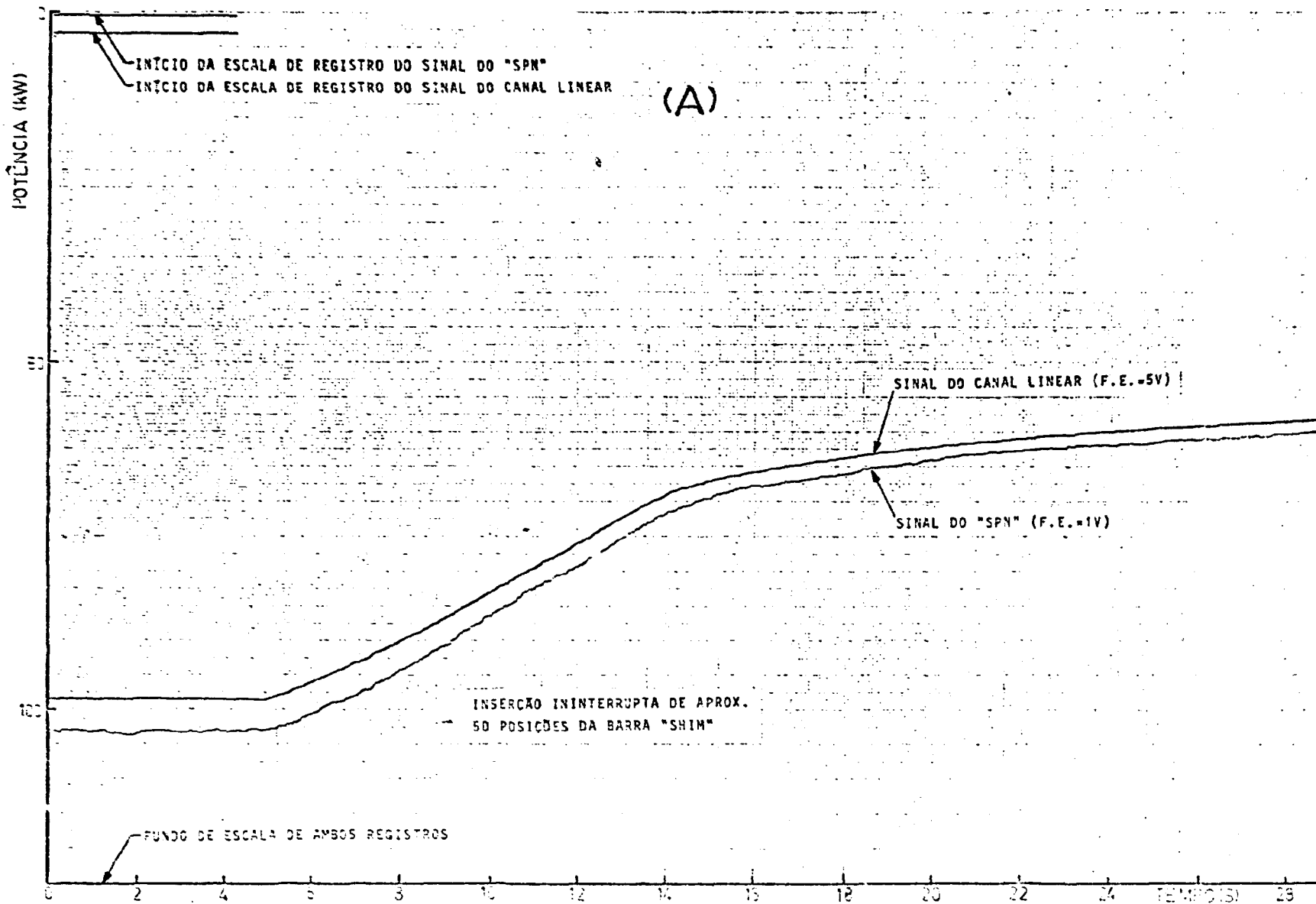


FIGURA IV.15 - CONTINUAÇÃO

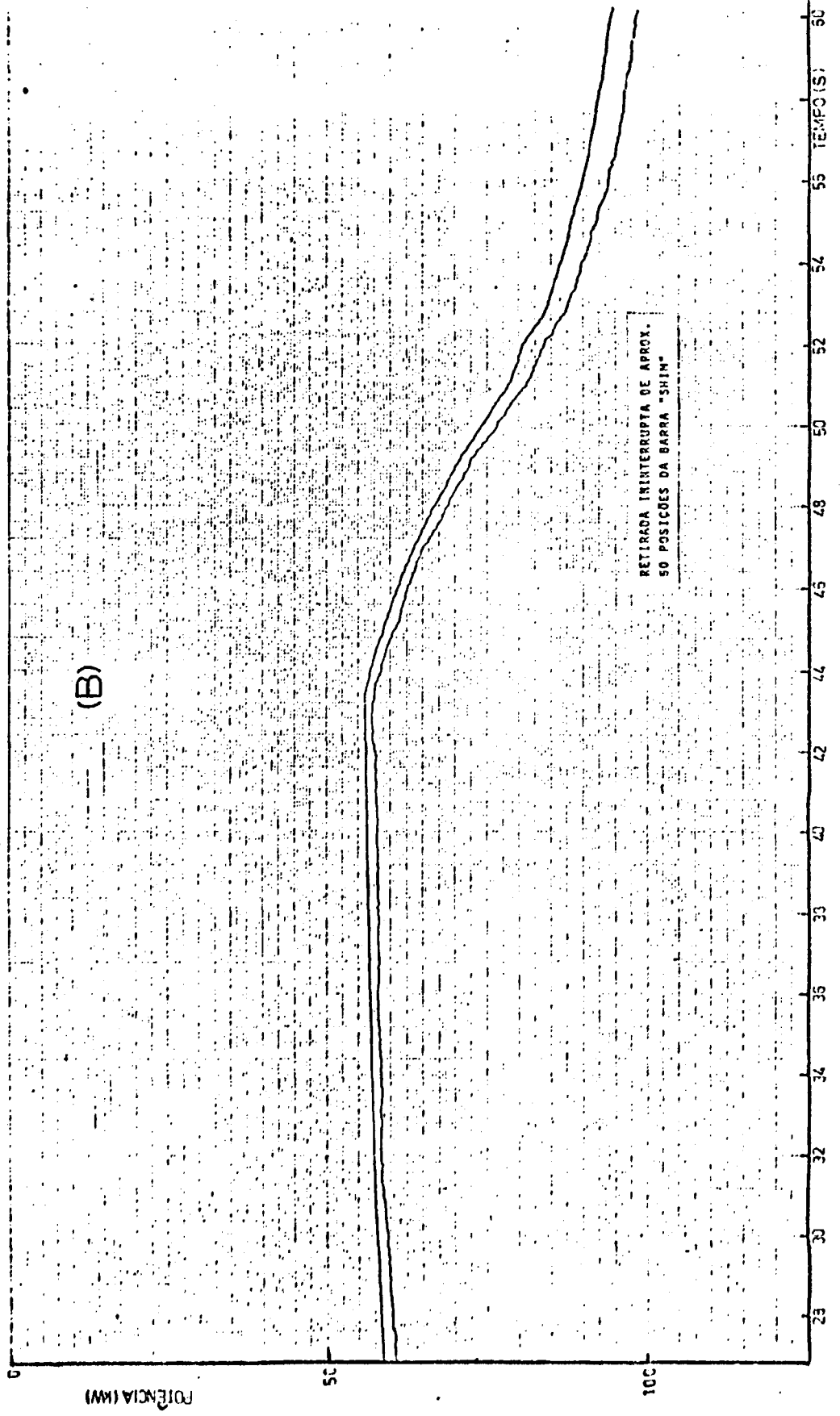


FIGURA IV.15 - CCNTINUAÇÃO

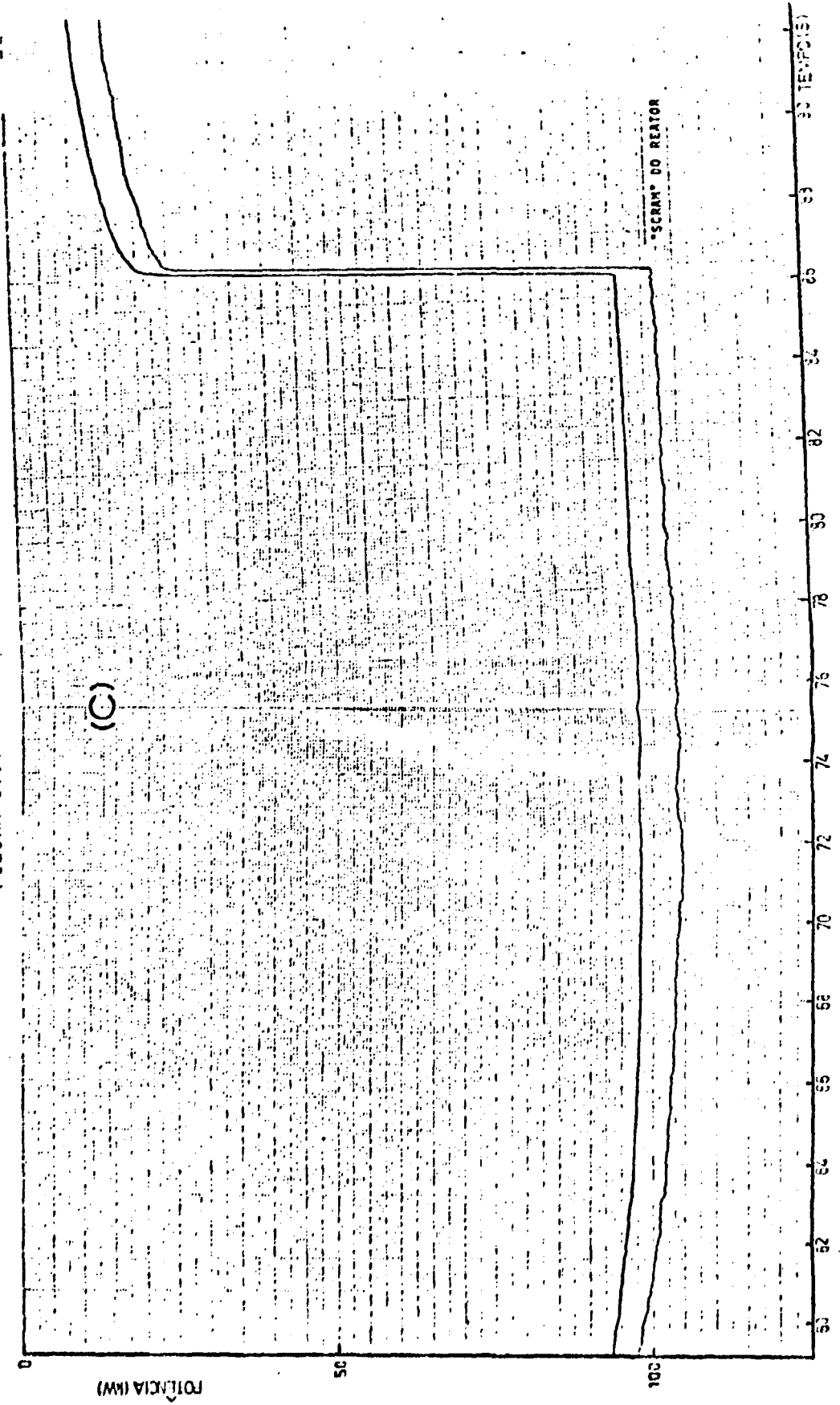


TABELA IV.3 - CALIBRAÇÃO DO CIRCUITO ELETRONICO EM BANCADA

Corrente medida (A) x 10 ⁻¹¹	Tensão de saída	
	Sinal (V)	Compensação (V)
0,1	0,04	0,05
0,2	0,09	0,10
0,3	0,14	0,15
0,4	0,19	0,21
0,5	0,24	0,26
0,6	0,30	0,31
0,7	0,35	0,36
0,8	0,40	0,41
0,9	0,45	0,46
1,0	0,50	0,51
2,0	1,01	1,03
3,0	1,52	1,54
4,0	2,05	2,06
5,0	2,57	2,58
10,0	5,11	5,12
15,0	7,45	7,75
30,0	11,65	12,45

EQUIPAMENTOS DE MEDIDA UTILIZADOS:

Fonte de Tensão "HP" Mod. 6220 B
Monitor de Tensão da Fonte "DATA PRECISION" Mod. 2540
Medidor de Corrente "KEITHLEY" Mod. 610 C
Resistores "VICTOREEN" de 500 e 50 M Ω

FIGURA IV.16 - TENSÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO ELETRÔNICO EM FUNÇÃO DA CORRENTE DO "SPN" NA ENTRADA-TESTE EM BANCADA

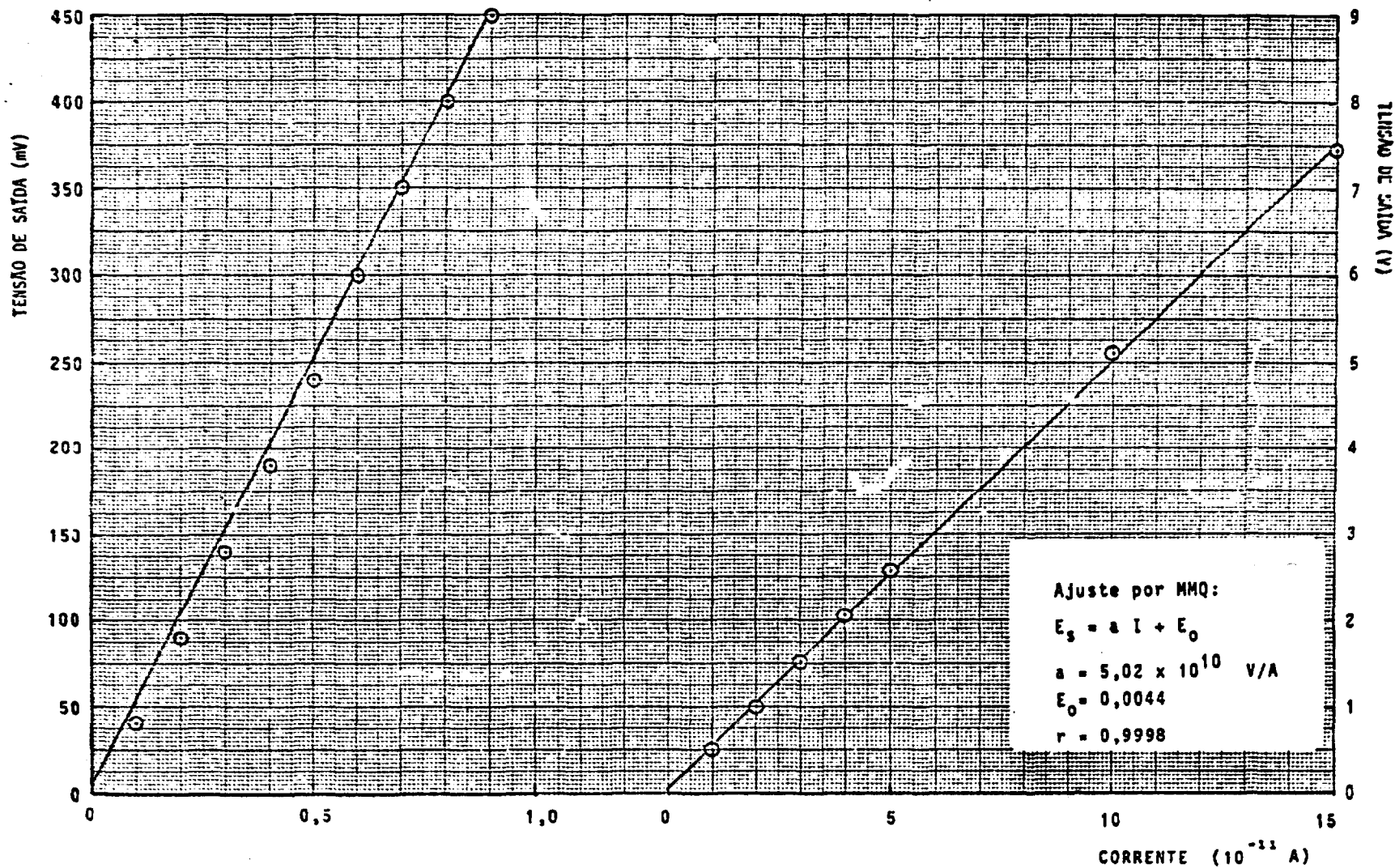


FIGURA IV.17 - TENSÃO DE SAÍDA DO CIRCUITO ELETRÔNICO EM FUNÇÃO DA CORRENTE DE COMPENSAÇÃO DO CABO NA ENTRADA-TESTE EM BANCADA

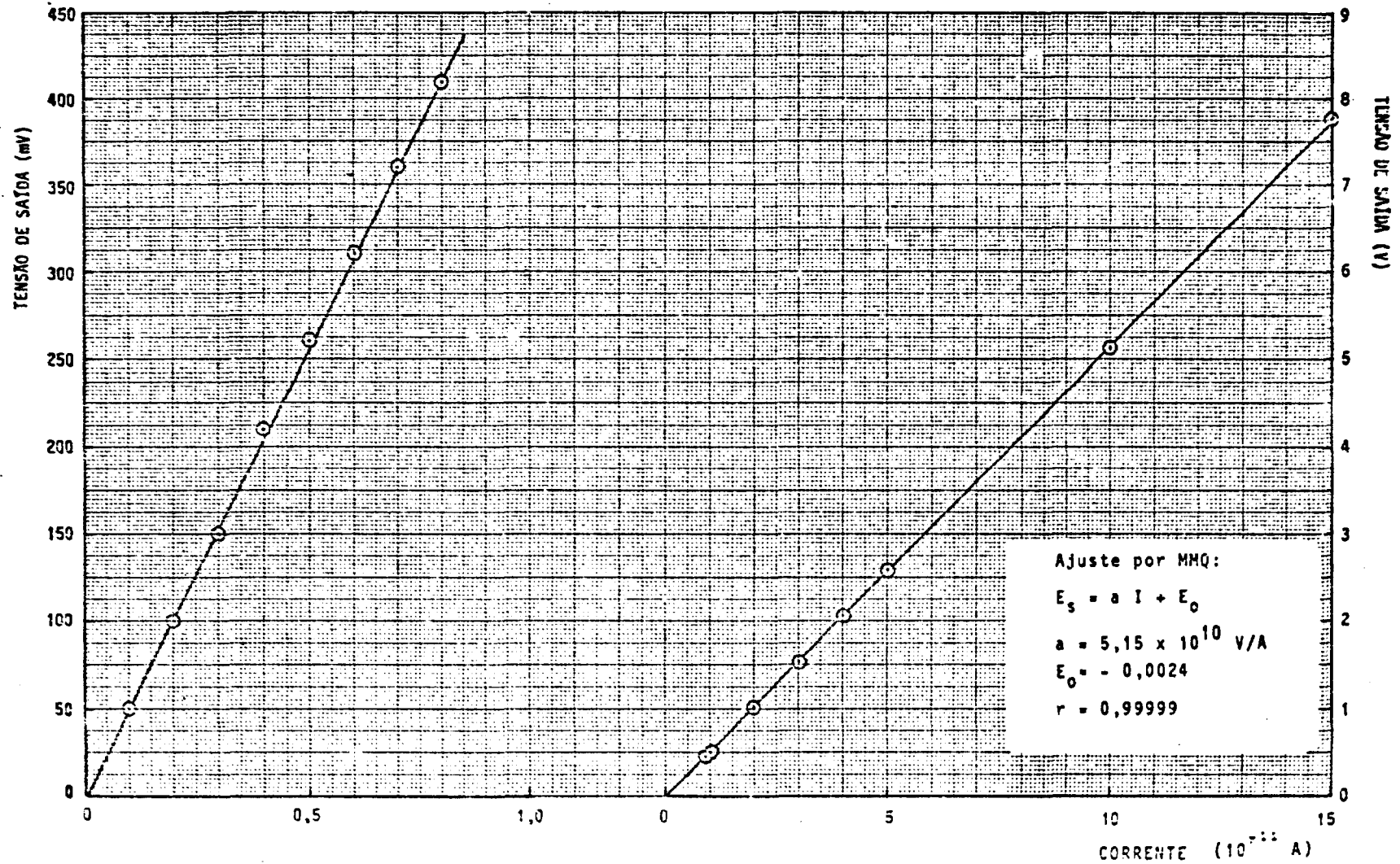


FIGURA IV.18 - ANÁLISE POR ESPECTROMETRIA DE RAIOS-X DE UMA AMOSTRA DO CABO BIFILAR

DATA: 28.08.85

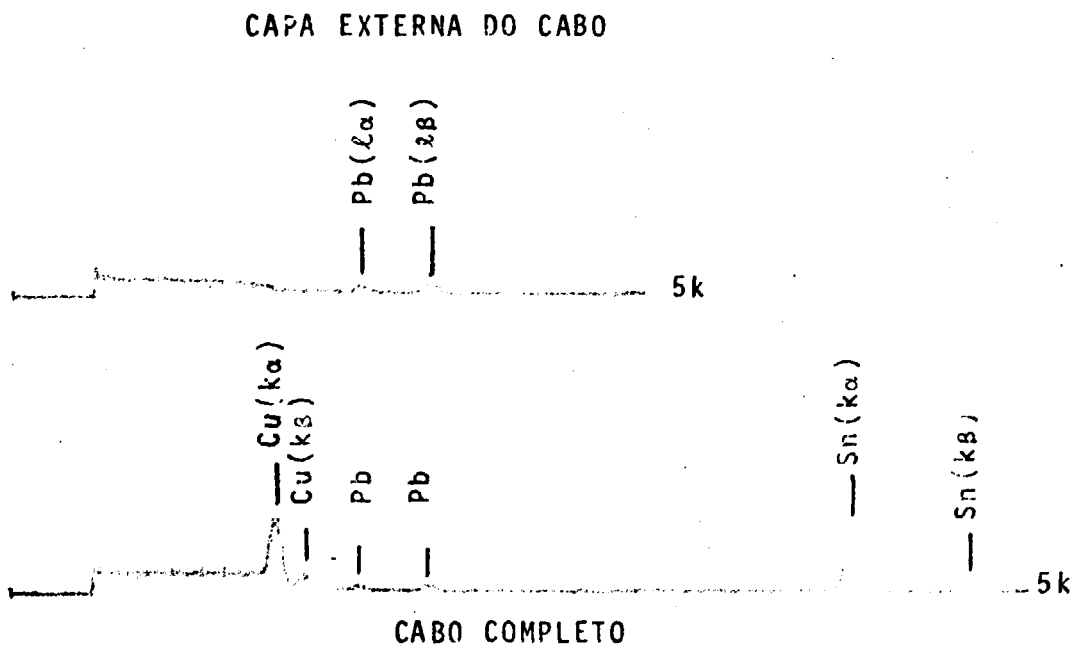


FIGURA IV.19 - ESPECTRO GAMA DE UMA AMOSTRA IRRADIADA DO CABO BIFILAR

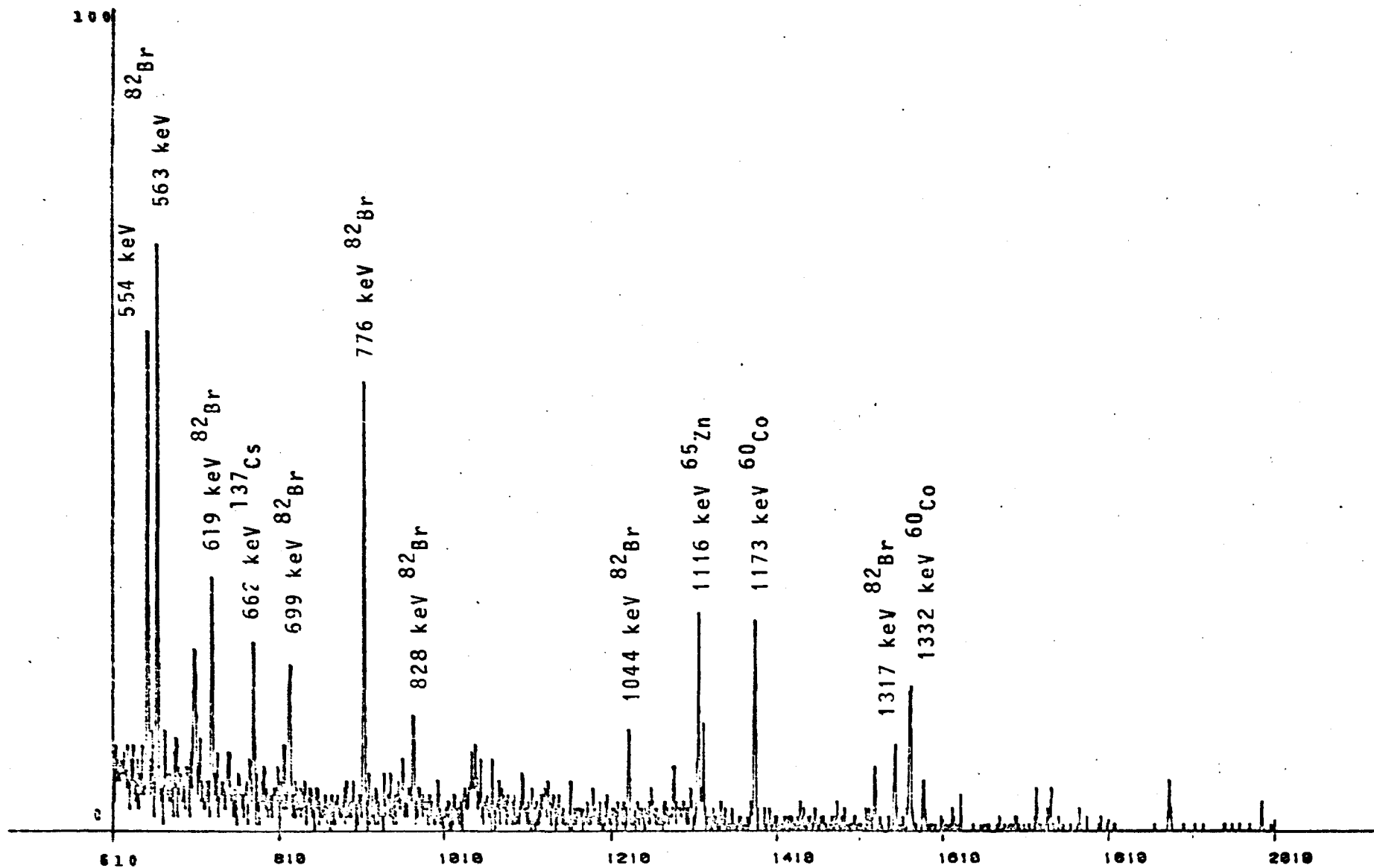
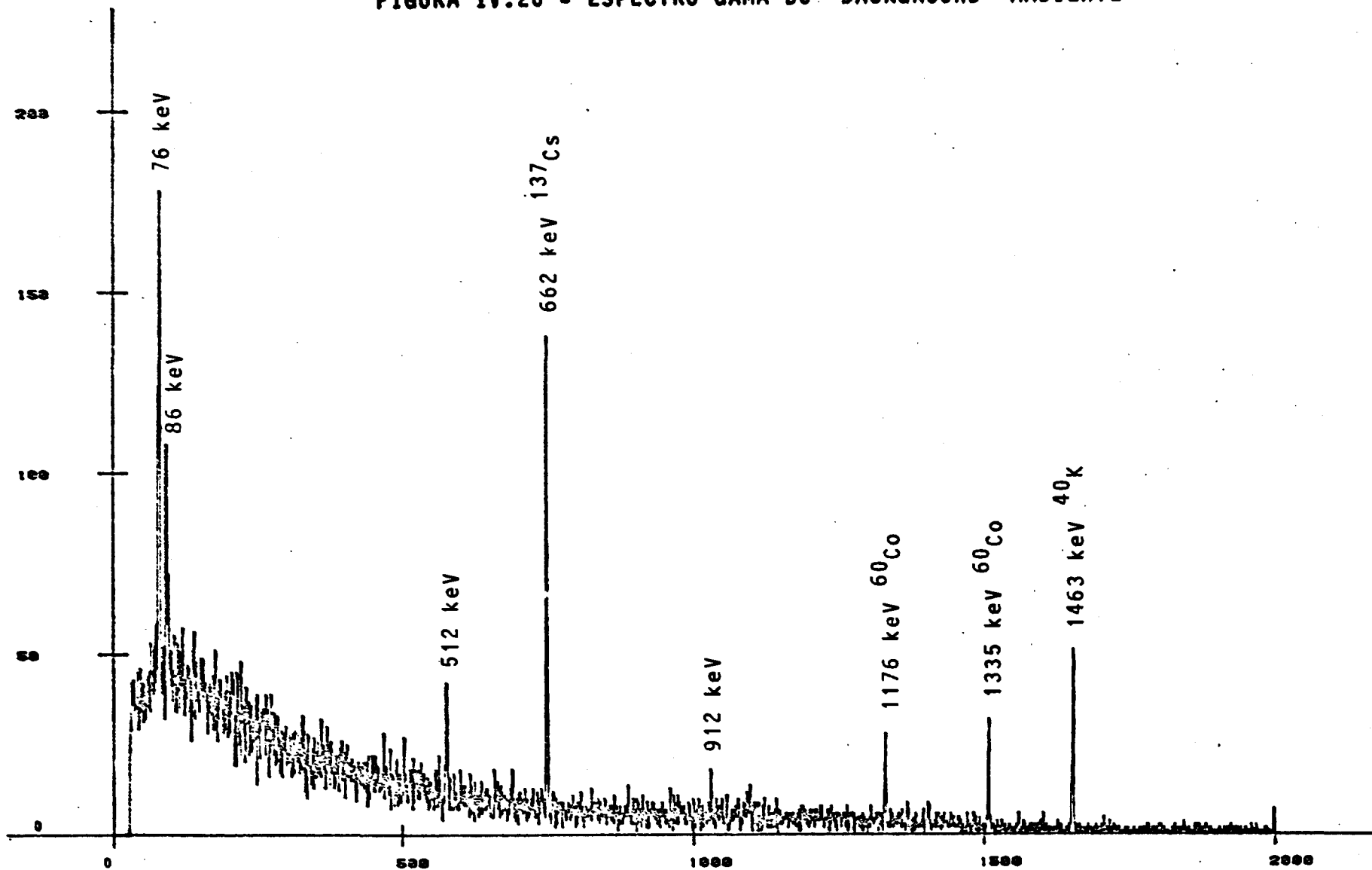


FIGURA IV.20 - ESPECTRO GAMA DO "BACKGROUND" AMBIENTE



BACKGROUND - HPGE - DATA: 17.09.85

TABELA IV.4 - VALORES MEDIDOS PARA OBTENÇÃO DA SENSIBILIDADE GAMA DO "SPN"

Data	DTL Nº	Localização ⁽¹⁾ (cm)	$\dot{\chi}$ (2) (Rh ⁻¹)	i_{SPN} (3) (A)	ϵ_{γ} (4) A/Rh ⁻¹	Observações
31.05.85	1	1	62.184	$-3,3 \times 10^{-12}$	$-6,8 \times 10^{-17}$	Local medida: tubo central reator
	2	7,5	50.246			" " " " "
	3	14	30.676			" " " " "
15.05.86	1	1	23	i_{BG} (5)	...	Local medida: tubo ao lado da Ci do canal
	2	7,5	23	-7×10^{-13} (6)	...	linear reator
	3	7,5	9.372		...	" " tubo central reator

(1) Em relação à extremidade do detector

(2) Precisão de leitura: $\pm 3\%$

(3) Obtido da Tabela IV.1

(4) Obtido da média das leituras dos DTL's

(5) Corrente igual à corrente de "background" do "SPN", medida fora do reator ($= + 34 \times 10^{-13}$)

(6) Corrente do "SPN" + Condutor compensação

TABELA IV.5 - VALORES MEDIDOS PARA OBTENÇÃO DA SENSIBILIDADE DO "SPN" A NEUTRONS TÈRMICOS

Ident. folha	Massa (g)	Potência irradiação (kW)	Tempo irradiação (min)	Atividade saturação (Bq)	Fluxo tÈrmico (n/cm ² s)	Tensão (1) (mv)	Corrente (2) (A)	ϵ_n	
								($\frac{mV}{n/cm^2 s}$)	($\frac{A}{n/cm^2 s}$)
YC	0,12432	50	20	$2,67 \times 10^9$	$6,66 \times 10^{10}$	33	$10,1 \times 10^{-11}$	$4,95 \times 10^{-10}$	$1,52 \times 10^{-21}$
M	0,12671	100	20	$5,80 \times 10^9$	$1,42 \times 10^{11}$	64	$20,9 \times 10^{-11}$	$4,51 \times 10^{-10}$	$1,47 \times 10^{-21}$
U*	0,12566	100	40	$3,75 \times 10^9$	-	-	-	-	-

(*) sob cãdmio (Razão de cãdmio = 15,4)

(1) obtido do gráfico Tensão Saída x Potência Reator (Figura IV.11)

(2) obtido do gráfico Tensão Saída x Corrente "SPN" (Figura IV.13)

V. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

O objetivo fundamental do trabalho - construção de um detector para utilização como instrumentação extra em alguns experimentos no reator IPR-R1 e a aquisição de experiência construtiva para desenvolvimento de outros detectores, eventualmente para utilização em reatores de potência - consideramos ter sido alcançado.

Idealmente, um detector com estas características deveria ser montado como um elemento terminal de um cabo, com isolamento cerâmico idêntico ao do detector, sem soldagens. O emissor do detector acoplado ao condutor de sinal do cabo, envolto pela alumina, seria sinterizado em uma única operação. O condutor de compensação terminaria logo na extremidade inicial do emissor (sem qualquer contacto físico entre ambos). O envoltório do detector seria diretamente acoplado ao envoltório do cabo (ou malha de blindagem dos condutores do cabo) que deveria ser do mesmo material. Com isto ficariam minimizados os problemas de contactos elétricos e materiais diferentes que podem influenciar as medidas. Na prática, dever-se-ia utilizar soldagens somente onde absolutamente necessário, e solda por fusão entre os dois materiais a serem ligados.

No caso do detector construído isto não foi possível e teve-se de tolerar, por exemplo, espaços vazios entre os componentes (emissor-isolador-revestimento) do detector, por se ter utilizado materiais de fabricação industrial (importados) existentes no CDTN. A influência destes espaços vazios seria um aumento da sensibilidade gama do detector o que, con

tudo, não pareceu prejudicar seu desempenho operacional, como pode ser visto na Tabela V.1 na comparação com detectores do mesmo tipo de outras procedências, descritos na bibliografia disponível.

Por outro lado, o cabo utilizado está longe das características ideais, mas, pelos testes feitos, espera-se uma vida útil de aproximadamente um ano sob irradiação contínua no local ao lado da câmara de ionização do canal linear do reator IPR-R1, devido ao comprometimento das propriedades físicas do material isolante sob irradiação.

Os vários testes feitos com o detector permitem concluir que:

- existe uma ponderável influência da radiação gama para potências inferiores a 5 kW (Figura IV.9). Este fato não é prejudicial à operação normal do detector de vez que, por suas características, este é empregado somente em potências altas, onde aquele efeito é desprezível;

- verifica-se a existência de ótima linearidade com o registro da potência do reator (lida no canal linear) para altas potências (Figura IV.11). Este fato assegura um possível emprego para este detector como auxiliar na monitoração de potência do reator;

- observa-se uma ótima fidelidade ao registro do sinal da câmara de ionização do canal linear do referido reator (Figura IV.12). Isto permite seu emprego para registro de variação de potência;

- verifica-se também estabilidade do seu sinal em irradiações longas em potência constante (Figura IV.14);

- observa-se uma resposta apropriada às variações de potência lentas e rápidas (Figura IV.15);

- as sensibilidades à radiação gama e a nêutrons do detector são comparáveis às dos detectores do mesmo tipo citados na bibliografia (Tabela V.1);

- observa-se também reprodutibilidade do sinal do detector (Tabela IV.2).

Por outro lado, comprovou-se também o sinal negativo da corrente devida somente à radiação gama, conforme mostra a Figura II.6.

O programa de cálculo desenvolvido mostra uma sensibilidade a nêutrons térmicos teórica ($S_n = 1,04 \times 10^{-22}$ A/cm.nv) bastante concordante com a medida experimental, qualificando dessa forma o modelo matemático do detector.

Não foi feita comparação do modelo desenvolvido com outro detector do mesmo tipo por não nos ter sido possível obter este último em tempo hábil.

Como continuação do trabalho visando a construção de um detector para uso em reatores de potência, serão necessários estudos mais desenvolvidos dos problemas a serem enfrentados tais como: temperatura e pressão, estanqueidade do detector, cabo especial, etc.

É importante a procura de fornecedor nacional para os materiais do detector bem como de um cabo com as características necessárias já citadas, além de isolamento cerâmico adequado, ou sua encomenda sob especificação.

Considera-se finalmente que, com a experiência obtida, a técnica de construção pode ser simplificada em pas-

os elementares e os componentes padronizados de modo a ser produzido em série.

TABELA V.1 - COMPARAÇÃO DAS SENSIBILIDADES GAMA E A NÊUTRONS DE DETECTORES "SPN" COM EMISSOR DE COBALTO E GEOMETRIA CILÍNDRICA

Identificação do detector	Diâmetro do emissor (cm)	Seção reta do emissor (cm ²)	Comprimento do emissor (cm)	Sensibilidades (por unidade de comprimento do emissor)		Observações	Ref.
				ϵ_{γ}/ℓ (A/Rh ⁻¹ cm ⁻¹)	ϵ_n/ℓ (A/nv cm ⁻¹)		
-	0,05	0,002	...	$-4,2 \times 10^{-21}$	$1,33 \times 10^{-11}$ 1)	1) em A/MW(th)in.	25
-	0,05	0,002	...	-	$1,2 \times 10^{-21}$		10
Co-SPN-D	0,1	0,008	12,5	$1,2 \times 10^{-19}$	$4,4 \times 10^{-23}$		26
5503-C	0,2	0,03	21	$2,7 \times 10^{-18}$ 2)	$2,6 \times 10^{-22}$	2) medido com fonte gama de Co-60	27
5503-C	0,2	0,03	21	$1,4 \times 10^{-18}$ 3)	$2,7 \times 10^{-22}$	3) medido em reator TRIÇA de 250kW	28
RM 50099-Co	0,2	0,03	21	$7,1 \times 10^{-19}$	$3,3 \times 10^{-23}$		29
-	0,2	0,03	21	$2,4 \times 10^{-18}$	$3,1 \times 10^{-22}$		16
Co(ABA)	0,2	0,03	..	$-2,9 \times 10^{-18}$ 4)	$2,68 \times 10^{-22}$	4) em A/Rad h ⁻¹ cm ⁻¹	6
Co 2	0,2	0,03	5	$-2,50 \times 10^{-16}$ 4)	$2,87 \times 10^{-22}$		6
SPN-PM	0,01	0,010	15	$-4,5 \times 10^{-18}$	$1,0 \times 10^{-22}$	Diâmetro e seção reta efetivos	

REFERENCIAS

- [1] DUCHENE, J. & VERDANT, R. Détecteurs de rayonnements pour les mēsures en coeur des rēacteurs de puissance. Saclay, CEA, Centre d'Etudes Nucleaires, 1979.(CEA-R-5021).
- [2] GOLDSTEIN, N.P. & CHEN, C.L. Gamma-sensitive self-powered detectors and their use for in-core flux-mapping. IEEE Trans.on Nuclear Science. NS-28 (1): 752-7, Feb. 1981.
- [3] WARREN, H.D. & SULCOSKI, M.F. Performance of prompt- and delayed responding self-powered in-core neutron detectors in a pressurized water reactor. Nucl.Sci. & Eng. 86 (1): 1-9, Jan.1984.
- [4] OBER, T.G. & GAVIN, P.H. Operational experience with self-powered in-core nuclear instrumentation. In: AMERICAN NUCLEAR SOCIETY WINTER MEETING, Washington, D.C. Oct.27-31, 1974. Proceedings... Windson, Connecticut, Combustion Engineering, 1974, 14p.
- [5] VERDANT, R. Mesures continues de flux de neutrons dans les rēacteurs nucléaires avec collectrons. Saclay, CEA, Centre d'Etudes Nucleaires, 1973 (CEA-R-4411).
- [6] GEBURECK, P. et alii. Development and in-core application of self-powered neutron detectors. In: SYMPOSIUM ON NUCLEAR POWER PLANT CONTROL AND INSTRUMENTATION, Prague, 22-6 Jan.1973. Proceedings... Vienna, IAEA, 1973, p.783-802 (IAEA-SM-168/G-8).
- [7] STRINDEHAG, O. Self-powered neutron and gamma detectors for in-core measurements. Stockholm, Aktiebolaget Atomenergi, 1971 (AE-440).

- [8] HILBORN, J.W. Self-powered neutron detectors for reactor flux monitoring. Nucleonics, 22 (2): 69-74, Feb.1964.
- [9] FRAMATOME. Self-powered neutron detectors. Courbevoie, 1982.
- [10] REUTER-STOKES. Self-powered flux detectors. Cambridge, Ontario, s/d.
- [11] JASCHIK, W. & SEIFRITZ, W. Model for calculating prompt-response self-powered neutron detectors. Nucl.Sci. & Eng., 53 (1): 61-73, Jan.1974.
- [12] 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, Aug.1974.
- [13] WARREN, H.D. Calculational model for self-powered neutron detector. Nucl.Sci. & Eng., 48 (2): 331-342, July 1972.
- [14] AL-DABAGH, D. Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Beschreibung der Wirkungsweise und Effektivität von gross-flächigen hochsensitiven SPNDs (Self-Powered-Neutron-Detectors). Jülich, KFA, 1981 (JÜ1-1728).
- [15] SOVKA, J.A. Response of cobalt neutron flux detectors. Chalk River, Atomic Energy of Canada Ltd., 1969 (AECL-3368).
- [16] KLAR, E. Neutronen-Betadetektoren in: SCHRÜFER, E., ed. Strahlung und Strahlungsmesstechnik in Kernkraftwerken. Berlin, Elitera, 1974. p.150-156.

- [17] LOOSEMORE, W.R. & KNILL, G. Design and performance of miniature primary emission neutron activation detectors for spatial distribution measurements of neutrons in reactors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RADIATION MEASUREMENTS IN NUCLEAR POWER, Berkeley Nuclear Laboratories, 12-16 Sept.1966. Proceedings... London, The Institute of Physics and the Physical Society, 1966. p.430-48, paper 7.5.
- [18] GREEN, R. For sensitive measurements use a good electrometer Research & Development. 27 (1): 88-93, Jan.1985.
- [19] EMELY'YANOV, I,Ya. et alii. Radiation and thermal tests of electron - emissive neutron detector and cables with magnesial insulation. Soviet Atomic Energy, 37 (1): 756-761, 1974. (UDC 539.1.074.88).
- [20] SHIELDS, R.B. Some practical considerations in the use of self-powered flux detectors. In: IAEA SPECIALISTS' MEETING ON IN-CORE INSTRUMENTATION AND FAILED FUEL DETECTION AND LOCATION. Mississauga, Ontario, 13-15, May, 1974. Proceedings... Ontario, Atomic Energy of Canada Ltd., 1975, p.77-95 (AECL-5124).
- [21] DUBINSKAYA, N.A. et alii. Induced γ -activity in polyethylene as a result of neutron irradiation. Soviet Atomic Energy, 18 (4): 538-9, Apr.1965.
- [22] BRANDÃO, Jr., F.A. Construção e testes de dispositivo para determinações experimentais de queima de combustível irradiado. Belo Horizonte, CDTN/NUCLEBRÁS, 1985 (Tese de Mestrado - Curso de Ciências e Técnicas Nucleares - UFMG).

- [23] FELAWKA, L.T. et alii. GAMAN - A computer program for the qualitative and quantitative evaluation of Ge(Li) gamma-ray spectra. Pinawa, Manitoba, 1973 (AECL-4217).
- [24] CAMPOS, M.M. Medidas de nêutrons por ativação. Belo Horizonte, IPR, s/d (Publ.IPR-UFMG-CNEN s/nº).
- [25] PRICE, C.C. & KARVINEN, J.R. Evaluation of self-powered detectors in EBR-II. ANS Trans. 15 (1): 366, 1972.
- [26] BELLMANN, D. & HAMIDIAN, M.R. Determination of the neutron- and γ -sensitivity of a Rh-SPN-detector. Atomkernenergie, 26 (1): 25-8, 1975.
- [27] AB ATOMENERGI. Self-powered neutron detector 5503-DC. Amplifier 4681. Nyköping, s/d.
- [28] BÖCK, H. et alii. Transient response of cobalt self-powered neutron detectors. Nucl.Instr. & Meth. 87: 299-300, 1970.
- [29] RÖSSEL-MESSTECHNIK. Rössel-cobalt-detektor typ RM 50099-Co. Werne, 1979.