

# ESPECTRÔMETRO GAMA PARA PESQUISAS EM GEOFÍSICA ESPACIAL

D.J.R. Nordemann, L.A. Schuch\* e S.L. Mantelli Neto

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515  
12201-970, São José dos Campos, 12201, SP, Brasil

\* Em afastamento do Departamento de Física  
Núcleo de Estudos e Pesquisas Aeroespaciais,  
Universidade Federal de Santa Maria.

Com o objetivo de desenvolver pesquisas sobre a história das relações Terra-Atmosfera-Espaço, através do estudo da radioatividade natural (primitiva, radiogênica ou cosmogênica) ou artificial, o Grupo de Geofísica Nuclear da Divisão de Geofísica Espacial (DGE) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) construiu um espectrômetro gama de alto desempenho, usando um detector de germânio hiperpuro comercial, dentro de uma blindagem de chumbo de alta pureza, destinada a proteger o detector da radiação beta e gama ambiente durante a medida.

**GAMMA-RAY SPECTROMETER FOR RESEARCH IN SPACE GEOPHYSICS** *A high performance gamma-ray spectrometer, using a manufactured hyperpure germanium detector, inside of a high purity lead shield, was built by the Nuclear Geophysics Group of the Space Geophysics Division (DGE) at the Brazilian National Institute for Space Research (INPE), in order to develop research on the history of Space-Atmosphere-Earth relationship through studies of natural (primordial, radiogenic and cosmogenic) or artificial radioactivity.*

## INTRODUÇÃO

A técnica de espectrometria gama de alto desempenho possui muitas aplicações em Geofísica Espacial, onde podem ser estudados, entre outros assuntos: os radionuclídeos naturais primitivos (U, Th, e K), radiogênicos (como o Rn) e cosmogênicos, decorrentes da incidência da radiação cósmica na atmosfera e nos meteoritos; os produtos de fissão oriundos de explosões ou acidentes nucleares e sua dis-

persão na atmosfera, hidrosfera e litosfera; a ativação neutrônica, que fornece importantes contribuições à planetologia e à cosmoquímica; a paleoclimatologia etc.

Para realizar tais estudos, o Grupo de Geofísica Nuclear, da Divisão de Geofísica Espacial do INPE, construiu um espectrômetro gama de alto desempenho, usando detector e eletrônica associada comerciais e uma blindagem de chumbo de alta pureza des-

tinada a proteger o detector da radiação beta e gama ambiente durante a medida.

A espectrometria gama é uma técnica de medidas nucleares de alta sensibilidade, qualitativa pela identificação de nuclídeos emissores gama e quantitativa pela determinação das atividades específicas destes nuclídeos. Uma excelente resolução em energia é obtida com um detector semicondutor de germânio hiperpuro. Baixos níveis de ruídos de fundo são conseguidos com o uso de uma proteção de chumbo de alta pureza contra a radiação ambiente, que propicia no seu interior um volume com níveis de radiações beta e gama muito inferiores aos que existem fora dele.

A fraca atenuação da radiação gama na matéria permite medir fontes distribuídas em substâncias dentro de volumes diversos e com várias geometrias de detecção. A possibilidade de medir as emissões gama provenientes de amostras ou objetos, sem ter de submetê-los a trituração ou tratamento químico, faz com que o método seja não-destrutivo. Tais medidas são quantitativas através da determinação dos rendimentos de detecção para cada nuclídeo e para cada objeto analisado.

As medidas são realizadas pela análise dos pulsos oriundos da detecção dos raios gama emitidos pela amostra posicionada sobre o detector, dentro da proteção de chumbo. A análise dos pulsos oriundos do detector é feita por um analisador de pulsos que avalia a amplitude destes pulsos e armazena o número de pulsos em canais adjacentes, em função de suas amplitudes. A matriz das frequências de eventos para todos os canais representa o espectro da radiação gama detectada, ou seja, a distribuição de frequências de eventos em função da energia da radiação gama correspondente. O analisador de pulsos deve ser associado a um microcomputador cuja função é, em primeiro lugar, receber os espectros e armazená-los, sob formato de arquivos, em disquete ou em disco rígido. Assim, o microcomputador passa

a fazer parte do sistema de aquisição de dados do espectrômetro gama.

Quando as amostras a serem analisadas puderem ser acondicionadas em recipientes com geometrias mais simples, haverá possibilidade de utilizar padrões com a mesma geometria, com atividades previamente determinadas por outros métodos. O tratamento adequado das informações provenientes do detector durante a medida é realizado no microcomputador.

Assim, a espectrometria gama de alto desempenho representa uma ferramenta poderosa, isto é, um método quantitativo não-destrutivo, para tratar os problemas científicos já mencionados, seja através de medidas de emissores gama naturais, primitivos ou cosmogênicos, ou de radionuclídeos artificiais, presentes no meio ambiente ou gerados por irradiação neutrônica.

## DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE DETECÇÃO

O espectrômetro gama de alto desempenho para medidas de baixos níveis de atividades, do Laboratório de Geofísica Nuclear do INPE, é formado de um detector de germânio hiperpuro, um diodo semicondutor com volume de 86 cm<sup>3</sup> e resolução a meia altura de 1,80 keV, para o pico de 1,33 MeV do Co-60 (EG&G ORTEC, 1987a). Para obter baixo nível de "background", o detector é colocado no interior de uma blindagem de chumbo de alta pureza. A blindagem de chumbo possui paredes laterais, superior e inferior, de 10, 16 e 11 centímetros, respectivamente. Foram utilizados dois lotes de chumbo, com tijolos de tipo "chevron", que possuem faces interpenetrantes: um de 3,5 toneladas, com alta pureza de chumbo (99,99%), e o outro de 1,5 tonelada, com menor pureza.

As dimensões externas da blindagem principal são 85 centímetros de profundidade, 65 centímetros de largura e 97 centímetros de altura. A cavidade

para o detector e amostras é de 55 centímetros de profundidade, 45 centímetros de largura e 70 centímetros de altura. A abertura vertical possui 38 centímetros de largura e 44 centímetros de altura. A porta construída com os mesmos tijolos de chumbo de alta pureza pesa cerca de 800 quilogramas e pode ser suavemente aberta ou fechada, movimentando-se sobre um sistema de trilhos e rolimãs.

A estrutura da blindagem, de aço carbono número 1020 (composição química: 0,17 a 0,23% de carbono; 0,30 a 0,60% de manganês; com percentual máximo de 0,040% e 0,050% de fósforo e enxofre, respectivamente), foi fabricada pelo Setor de Engenharia Mecânica e Aplicações (SEMA) da Divisão de Manufatura e Fabricação (DMF) do INPE.

O recinto de chumbo de alta pureza serve para proteger o detector e as amostras durante as medidas contra a radiação ambiente beta, gama e X, de origem terrestre e cósmica. Uma fonte de polarização é associada ao detector, ao qual está acoplado um pré-amplificador. Como eletrônica associada, seguem um amplificador de pulsos, um analisador de pulsos para a espectrometria de amplitude de pulsos detectados e um microcomputador da linha IBM-PC para armazenamento, tratamento numérico e gráfico dos espectros obtidos. Para calibrações e testes do sistema, devem-se empregar um gerador de pulsos e um osciloscópio. Para ser operacional, o conjunto necessita também de um recipiente Dewar, de capacidade de 30 litros, com nitrogênio líquido para a manutenção da baixa temperatura do detector. O detector, no interior de um criostato, fica acoplado ao Dewar por meio de uma barra de refrigeração, que leva o calor do detector ao reservatório frio, de nitrogênio líquido, mantendo assim o detector a uma temperatura de  $-196^{\circ}\text{C}$ , necessária para o seu funcionamento.

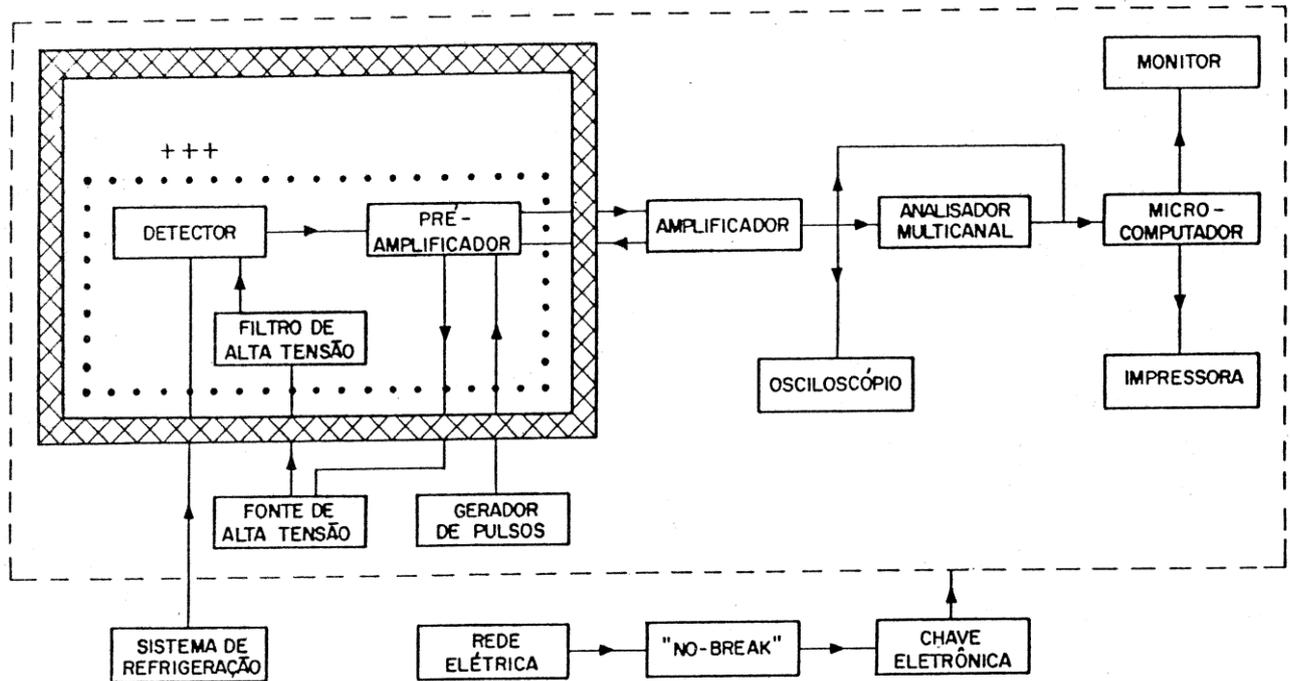
Para manter o sistema operando, mesmo havendo interrupção do fornecimento de energia elétrica, a instrumentação eletrônica está acoplada a um sistema de força ininterrupta, "no-break", cu-

jas baterias fornecem uma autonomia de 10 horas de operação. Uma chave eletrônica é utilizada para evitar riscos de transientes súbitos no retorno da energia elétrica, caso esta venha a ser interrompida por mais de 10 horas, quando então a polarização do detector deixa de existir.

O funcionamento permanente de um aparelho de ar condicionado e de um aparelho controlador da umidade do ar permite manter a sala do laboratório a uma temperatura aproximada de  $22^{\circ}\text{C}$  e a uma umidade relativa do ar entre 40 e 50%. Estes parâmetros ambientais são necessários para evitar problemas como deriva nos espectros gama, nas medidas de longa duração, bem como para manter o conjunto em condições ótimas de funcionamento ("background" baixo com filtração e pouca renovação do ar) e de conservação.

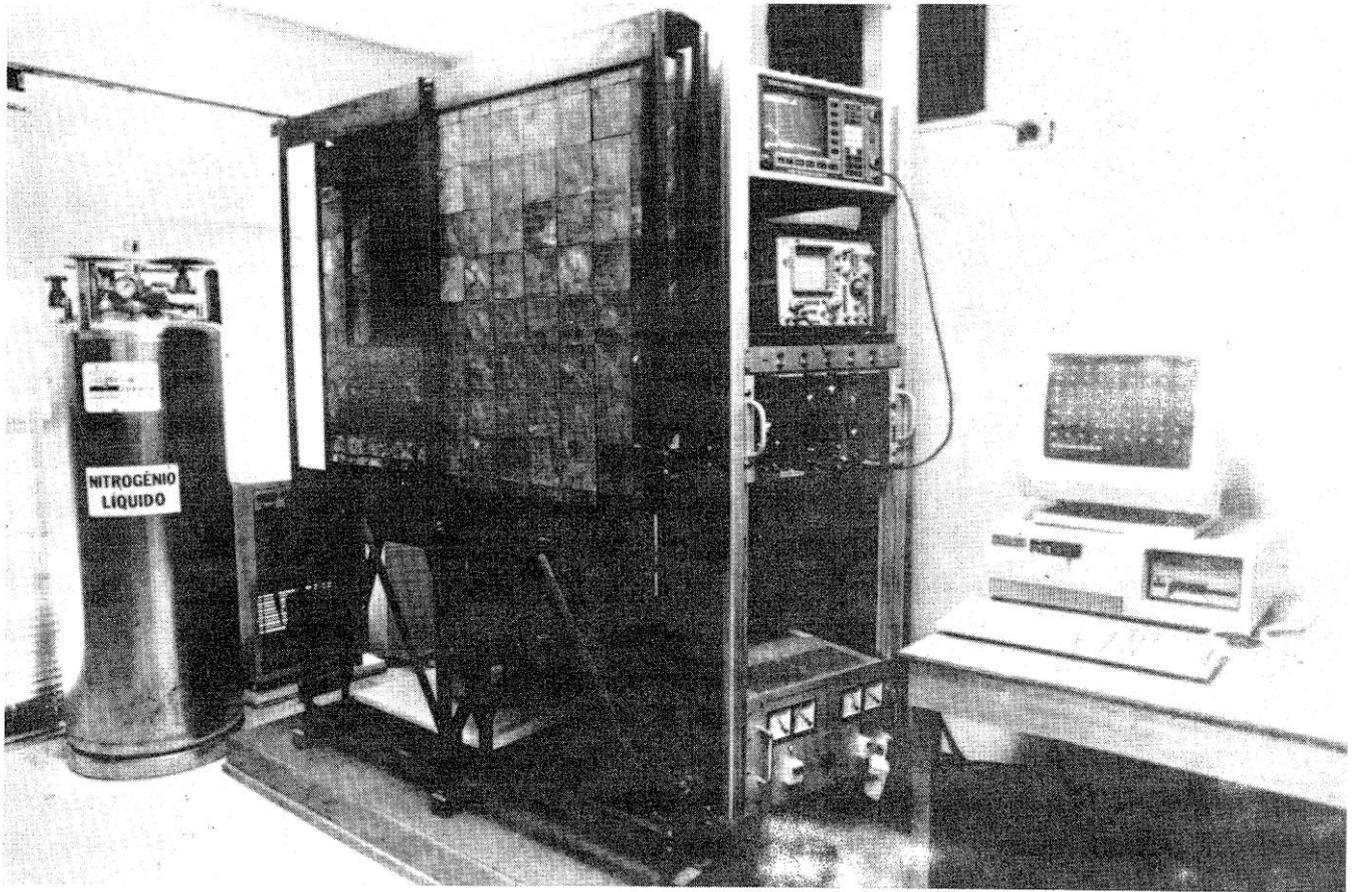
A Fig. 1 mostra o diagrama de blocos dos componentes do sistema de espectrometria gama do INPE.

A tensão de polarização do detector é fornecida pela fonte de alta tensão que é conectada ao filtro de alta tensão do detector. A conexão da tensão de polarização do pré-amplificador é acoplada ao amplificador. A saída atenuada do gerador de pulsos é conectada à entrada de teste do pré-amplificador, e a saída do pré-amplificador é ligada à entrada do amplificador. A saída unipolar do amplificador pode ser conectada tanto ao analisador multicanal (ou diretamente ao computador, quando este estiver preparado para funcionar como analisador multicanal), quanto a um osciloscópio. Um "T" BNC, ou saídas separadas do amplificador, podem ser usados. Quando a temperatura do detector polarizado torna-se acidentalmente muito alta, aciona-se um sistema de redução automática da alta tensão, "bias shutdown". Este sistema é acoplado entre o pré-amplificador e o painel traseiro da fonte de alta tensão. As conexões do filtro de alta tensão e pré-amplificador com o detector não são acessíveis ao operador do sistema de espec-

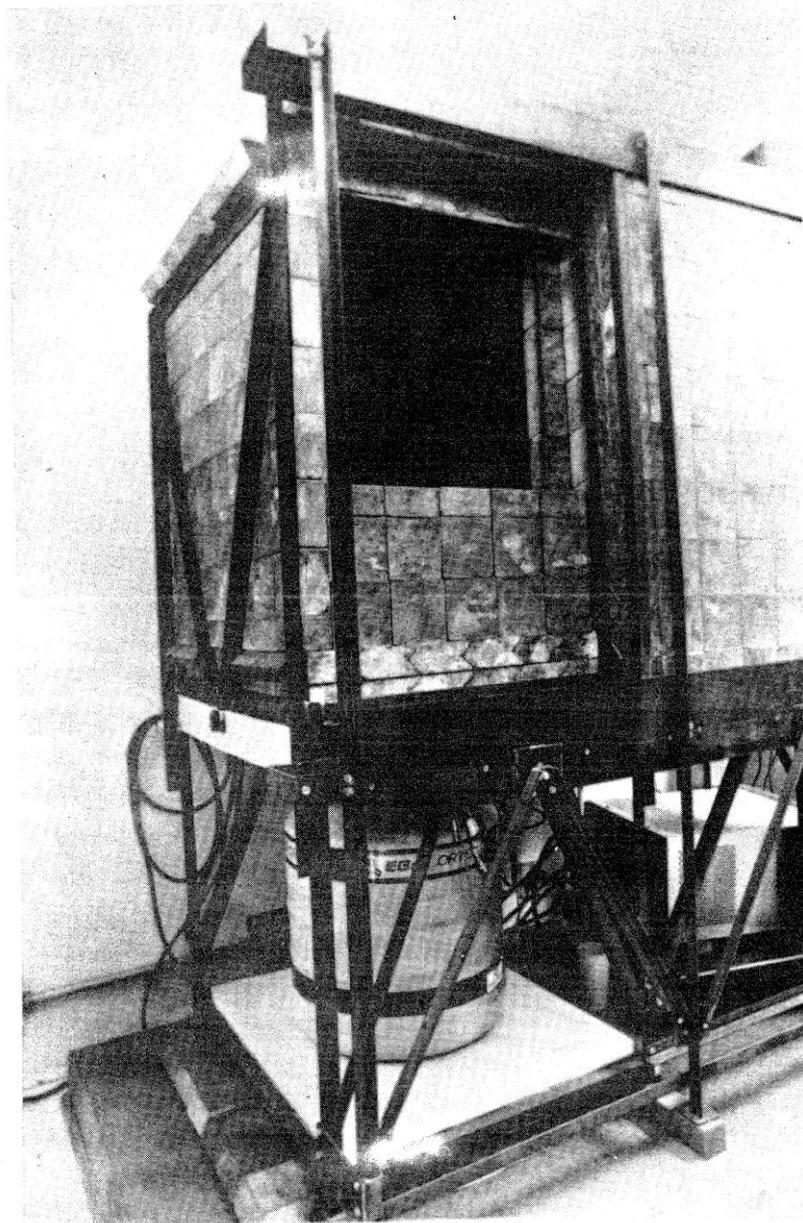


**Figura 1.** Diagrama de blocos do sistema de espectrometria gama do INPE. Legenda:(....) Conjunto detector, constituído do criostato com o detector, o pré -amplificador e o filtro de alta tensão; (xxx) Blindagem de chumbo; (- - -) Componentes acoplados ao sistema de força ininterrupta, "no-break"; (+ + +) Amostra.

*Block diagram of the INPE Gamma-ray Spectrometer. Description: (....) Detector assembly, including the detector with its cryostat, the preamplifier and the high voltage filter; (xxx) Lead shield; (- - -) Uninterrupted power supply parts; (+ + +) Sample.*



**Figura 2.** Fotografia do laboratório onde se encontra o sistema de espectrometria gama.  
*Photograph of the laboratory where is installed the Gamma-ray Spectrometer.*



**Figura 3.** Fotografia mais detalhada da blindagem de chumbo.  
*Detailed photograph of the lead shield.*

trometria e encontram-se no interior do criostato, internamente à blindagem eletrônica (EG&G ORTEC, 1987a).

A tensão de operação de todos os equipamentos é fornecida por uma mesma fonte de potência AC, a fim de diminuir e/ou prevenir problemas de aterramento, "ground loops". Evidentemente, quando não estão em uso, equipamentos como o gerador de pulsos, osciloscópio, monitor, impressora, analisador multicanal (quando o computador estiver funcionando como analisador multicanal) permanecem desligados, para aumentar a autonomia do "no-break" em caso de interrupção de fornecimento de energia elétrica.

A Fig. 2 mostra a fotografia do interior do laboratório onde se encontra o sistema de espectrometria gama.

A Fig. 3 mostra, com maiores detalhes, a fotografia da blindagem de chumbo.

## AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE ESPECTROS

As contagens fornecidas pelo detector são adquiridas num analisador multicanal de pulsos de até 8192 canais e armazenadas, em forma de matrizes de espectros, transferidas, através de uma ligação serial RS 232-C, para um microcomputador da linha IBM-PC, e gravadas como arquivos numéricos do sistema DOS em caracteres ASCII. Arquivos de um espectro de 1024 canais ocupam 12.339 bytes de memória e são gravados em disquetes para posterior interpretação por meios computacionais apropriados. São utilizados tempos de contagem em torno de 10.000 a 100.000 segundos, a depender das atividades das amostras a serem medidas. Tempos de contagem de 10 horas mostraram-se suficientes para medidas de atividades de solo já efetuadas como teste. As atividades específicas dos elementos naturais do solo, como os pertencentes às séries radioativas naturais do Th-232 e do U-238, bem como medidas de K-40, são calculadas (LIN et al., 1987; ERDTMANN & SOYKA, 1979), principalmente pela área dos picos

de 583,1 keV (Tl-208, 86,0%) e 2614,1 keV (Tl-208, 100,0%); 609,3 keV (Bi-214, 46,1%) e 1764,5 keV (Bi-214, 15,9%) e pelo pico de 1460,8 keV, (10,7%), respectivamente. A atividade específica de elementos antropogênicos como o Cs-137 é calculada (ERDTMANN & SOYKA, 1979; ARNOLDS et al., 1989) pela área do pico de 661,6 keV (84,6%).

## CALIBRAÇÕES EM ENERGIA E INTENSIDADE

O detector pode ser calibrado por diversos métodos com o objetivo de determinar o rendimento de contagem para a geometria de detecção a ser empregada, isto é, por meio de misturas de diversos emissores gama padronizados de interesse, que reproduzem a geometria das amostras; por meio de fontes radioativas puntiformes padronizadas em diversas posições, que reproduzem a geometria das amostras; e por meio de padrões específicos que dependem do tipo de amostras a serem analisadas.

Foram fornecidos pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN) fontes sólidas calibradas de Na-22, Co-60, Cs-137, Eu-152, Am-241, Mn-54, Co-57 e duas ampolas com fontes líquidas de Cs-137. Foram importados da Agência Internacional de Energia Atômica, com sede em Viena, Áustria, padrões de solo (série Soil-6) com concentrações padronizadas de Cs-137 e Ra-226, e padrões destinados a espectrometria gama de solos (IAEA, 1991), isto é, padrões de sulfato de potássio, bem como de minérios de tório e urânio misturados com sílica e com concentrações conhecidas de K-40, Th-232 e U-238. Os valores de atividades ou concentrações destes padrões foram obtidos por intercomparações entre laboratórios de diversos países, utilizando diferentes métodos de análise (IAEA, 1987).

## ESPECTROS DE "BACKGROUND" OBTIDOS

Foram obtidos espectros de "background" para

um tempo de 50 horas de medida, utilizando o sistema de coleta e manipulação de dados apropriados (YOKOYAMA & NGUYEN, 1979; MOENS & HOST, 1983; EG&G ORTEC, 1987b). A Tabela 1 fornece as taxas de contagem gama, BACK, obtidas nos picos de raios gama de diferentes origens (LINDSTROM et al., 1990).

A parede para a qual a porta do castelo de chumbo está voltada encontra-se a 2,5 metros de distância, enquanto a parede oposta está bastante próxima do castelo, a cerca de 50 centímetros.

A parede superior do castelo é 62% mais espessa que as suas paredes laterais, a fim de aumentar a blindagem contra radiações originadas do piso superior do laboratório e radiações cósmicas de baixa energia.

Uma proteção adicional é obtida pela utilização de uma camada dupla de tijolos de chumbo, sobre a qual se apóia o Dewar. Entre esta camada de chumbo e o Dewar existe uma lâmina de "polyfoam", empregada para minimizar possíveis efeitos de vibrações que poderiam ser transmitidas ao Dewar, se este estivesse apoiado diretamente sobre o chumbo. Estas vibrações, que podem aumentar o ruído de fundo eletrônico (EG&G ORTEC, 1987a), ocorrem devido ao funcionamento do ar condicionado e/ou do aparelho controlador da umidade do ambiente, e mesmo pelo tráfico de veículos, embora bastante reduzido, por uma rua interna próxima ao prédio onde se encontra o laboratório.

A camada dupla de chumbo visa reduzir o "background" devido tanto a radionuclídeos naturais do solo, principalmente os pertencentes às séries do U-238 e Th-232, quanto ao K-40.

Abaixo desta camada dupla de chumbo, existem duas chapas de aço de 1/4 de polegada apoiadas sobre duas camadas de pranchas de madeira tratadas, de 2 polegadas cada uma, que estão diretamente sobre o assoalho do laboratório. Este cuidado foi tomado

para melhorar a distribuição do peso sobre o assoalho. Evidentemente este procedimento também fornece uma blindagem adicional ao sistema de espectrometria.

Testes anteriormente efetuados, em condições de operação aproximadas às atuais, indicaram que a razão entre as taxas de contagem sem qualquer proteção de chumbo e com o castelo de chumbo atual é de cerca de 70 para o Tl-208 (583,1 keV); 40 para o Bi-214 (609,3 keV); 130 para o K-40; 140 para o Pb K<sub>a1</sub> e 30 para o Co-60 (1173,2 keV).

Foi efetuada uma comparação entre as taxas de contagem de "background" obtidas pelo presente sistema de espectrometria gama e aquelas obtidas por Lindstrom et al. (1990), no "National Institute of Standards and Technology, NIST", EUA. As dimensões do castelo de chumbo do NIST foram selecionadas após o estudo do aumento do "background" devido ao "build-up" de partículas de raios cósmicos terciários originados pela penetração de múons secundários. As dimensões finais selecionadas foram 15 centímetros de chumbo nas paredes e 10 centímetros no teto do castelo.

O castelo do NIST foi também testado com diferentes revestimentos internos para absorver a luminescência dos raios X excitados por radiações de "background". Foi revestido com 13 milímetros de cobre OFHC, "Oxygen Free High Conductivity". O cobre do teto foi substituído por 9,5 milímetros de aço, com baixo teor de radioatividade. Finalmente, a blindagem foi revestida com folhas de 1,6 milímetro de Teflon TFE, para criar uma divisa, facilmente trocável, entre as paredes do castelo e o seu interior, a fim de minimizar possíveis problemas de contaminação.

## CONCLUSÕES

Pela análise da Tabela 1, observa-se que o sistema de espectrometria gama da Divisão de Geofísica Espacial do INPE é conveniente para os objetivos ini-

**Tabela 1.** Comparação entre as taxas de contagens, em alguns picos de radiação gama de várias origens, obtidas pelos Espectrômetros Gama do INPE e do NIST (National Institute of Standards and Technology, USA).

*Comparison between count rates for several gamma-ray peaks, from various sources, as obtained by INPE and NIST (National Institute of Standards and Technology, USA) Gamma-ray Spectrometers.*

ORIGEM	RADIONUCLÍDEOS	ENERGIA (keV)	INPE <sup>a</sup> (cps)	NIST <sup>b</sup> (cps)	RAZÃO <sup>c</sup>
SÉRIES RADIOATIVAS NATURAIS	Th-232: Tl-208	583,1	0,0006±0,0002	0,0003	2,0
	Th-232: Ac-228	911,2	0,0003±0,0002	0,0003	1,0
	U-238: Po-214+(Bi-211)	352,0	0,0018±0,0002	0,001	1,8
	U-238: Bi-214	609,3	0,0015±0,0003	0,001	1,5
	U-238: Bi-214	1120,3	0,0004±0,0002	0,0003	1,3
NATURAL	K-40	1460,8	0,0014±0,0002	0,0003	4,7
CÓSMICA	(Pb K <sub>α1</sub> )	75,0	0,0506±0,0010	0,015	3,4
	ANIQUILAMENTO beta <sup>+</sup> +(Tl-208)	511,0	0,0147±0,0005	0,029	0,5
CONTAMINAÇÃO	Co-60	1173,2	0,0036±0,0002	0,0006	6,0
	Co-60	1332,5	0,0034±0,0002	0,0006	5,7

<sup>a</sup> - Taxas de contagem de "background" em cps (Espectrômetro gama do INPE; duração da medida: 50 h).

<sup>b</sup> - Taxas de contagem de "background" em cps (Sistema do NIST<sup>12</sup>; duração da medida: 14 dias).

<sup>c</sup> - Razão entre as taxas de contagem obtidas no INPE e no NIST.

ciais de sua utilização em pesquisas de Geofísica Nuclear.

Inicialmente observou-se que a blindagem de chumbo proporciona uma efetiva redução do "background" em toda a faixa de energia considerada, de 60 a 3000 keV. Constatou-se que, aumentando a energia da radiação gama, ocorre uma redução relativa da capacidade de blindagem do castelo de chumbo (STENBERG & OLSSON, 1968), o que é de esperar, uma vez que radiações de maiores energias sofrem menos atenuação ao atravessarem a proteção de chumbo. Este resultado foi facilmente observado na região dos picos gama do Tl-208 e Ac-228, da série do Th-232; do Pb-214 e Bi-214 (609,3 e 1120,3 keV) da série do U-238 e dos picos gama do Co-60 (1173,2 e 1332,5 keV).

Na comparação entre as taxas de contagem obtidas neste trabalho e as fornecidas por Lindstrom et al. (1990), observa-se na Tabela 1 que as razões entre estes valores são vizinhas para as várias energias

investigadas, o que indica uma eficácia de proteção para a nossa instalação ligeiramente inferior à da instalação do NIST.

Observa-se que, enquanto o sistema de espectrometria gama do NIST é destinado a análises por ativação neutrônica de materiais muito puros (e.g., silício), amostras muito reduzidas (e.g., grãos de poeira cósmica), análises radioquímicas de concentrações muito fracas, o sistema do INPE destina-se, inicialmente, a análises da radioatividade ambiental, natural ou antropogênica, de amostras de solo, não exigindo para tanto reduções tão substanciais de "background".

Ao contrário do sistema do NIST, não se tomou ainda qualquer providência para minimizar o ruído eletrônico pela adaptação de um sistema análogo a uma gaiola de Faraday, constituída de folhas metálicas sobre as paredes do laboratório.

Aprimoramentos para aplicações mais sensíveis serão efetuados no futuro, entre os quais a possibili-

dade de utilização de parafina borada para a absorção de nêutrons de "background", com vistas em diminuir a frequência de raios gama de captura gerados pela absorção de nêutrons dentro do detector ou em materiais próximos.

A blindagem do detector pode ser revestida internamente com material de baixo número atômico para absorver a fluorescência de raios X do chumbo, excitados por radiação de "background". Algumas vezes a camada mais interna da blindagem é revestida com 1 milímetro de cádmio, de alta pureza, e 0,1 milímetro ou mais de cobre.

Quando o revestimento de cádmio é usado, ele é colocado entre o chumbo e o cobre. Embora o cádmio seja um eficiente absorvedor de raios-X, possui uma alta seção de choque para reações de captura radiativa de nêutrons, com emissão de um pico de raio gama de 559 keV. Assim, é indesejável o uso de cádmio quando nêutrons são importantes contribuintes para o "background". Neste caso, pode-se substituir o cádmio por 6 milímetros adicionais de cobre, que também absorve com eficiência os raios X, reage menos com nêutrons, custa menos, não é tóxico e pode servir de material estrutural da blindagem. Apesar de não se conhecer o custo total da construção do espectrômetro gama do NIST, pode-se afirmar que o desempenho comparável do espectrômetro gama do INPE foi obtido a um custo muito menor, compatível com a realidade brasileira atual.

#### AGRADECIMENTOS

Este instrumento foi construído com a participação do CNPq (Auxílio 40.2459/89-0) e do PADCT (Projeto PADCT/SINST 70.1107/89-8)

#### REFERÊNCIAS

- ARNOLDS, O., CUTSHALL, N. H. and NIELSEN, G.A. (1989) Cesium-137 in Montana soils, *Health Phys.* 57(6):955-958.
- EG&G ORTEC (1987a) GMX series High purity germanium coaxial photon detector system USA.
- EG&G ORTEC (1987b) ADCAM100-Multichannel analyser operator's manual, Version 4.06, USA.
- ERDTMANN, G. and SOYKA, W. (1979) *The gamma rays of the radionuclides*, Verlag Chemie Weinheim, New York.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) (1987) Preparation and certification of IAEA gamma-ray spectrometry reference material RGU-1, RGTh-1 and RGK-1 IAEA/RL/148.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) (1991) Analytical quality control service, Vienna, Austria.
- LIN, Y., LIN, P., CHEN, C. and HUNG, C. (1987) Measurements of terrestrial radiation in Taiwan, Republic of China, *Health Phys.* 52(6):805-811.
- LINDSTROM, R. M., LINDSTROM, D. J., SLABACK, L. A. and LANGLAND, J. K. (1990) A low-"background" gamma-ray assay laboratory for activation analysis, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.* A299:425-429.

**MOENS, L. and HOSTE, J.** (1983) Calculation of the peak efficiency of high-purity germanium detectors, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 34(8):1085-1095.

**STENBERG, A. and OLSSON, I. U.** (1968) A low level gamma-counting apparatus, *Nucl. Instr. and Meth.* 61:125-133.

**YOKOYAMA, Y. and VAN NGUYEN, H.** (1979) Non-destructive radiometric studies of manganese nodules by gamma-ray spectroscopy with GeLi detector, *Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique* 289.

Submetido em: 16-11-92

Revisado em: 27-01-93

Aceito em: 27-01-93

Editor associado: V.W.J.H. Kirchhoff