



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

ESPECTROSCOPIA GAMA NO NÚCLEO ^{149}Nd

Ilca Marli Moitinho Amaral Medeiros

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Aplicações.

Orientadora:
Dra. Cibele Bugno Zamboni

São Paulo
2001

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

ESPECTROSCOPIA GAMA NO NÚCLEO ^{149}Nd

Iuca Marli Moitinho Amaral Medeiros



Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações.

Orientadora:

Dra. Cibele Bugno Zamboni

**São Paulo
2001**

Aos
meus Pais
Altino e Aide

meu marido
José Agostinho

e meus filhos
Sofia e
Pedro

Agradecimentos

À Dra. Cibele B. Zamboni, pela orientação, incentivo e compreensão, que ao longo dos anos, me proporcionou oportunidades de desenvolvimento pessoal e intelectual na pesquisa científica.

Ao Dr. Manoel Tiago Freitas da Cruz, pelas contribuições em diversas etapas do trabalho.

Aos amigos Fred, Renato, Juan, Sonia, Laura, Marco, Willian, Roberto, Fábio, Claudio e Mário por toda ajuda, incentivo e amizade.

Ao David pelo auxílio no uso do programa Bidim de aquisição multiparamétrica.

Ao corpo técnico do Reator IEA-R1m e Proteção Radiológica pelo pronto atendimento nas irradiações.

Ao Laboratório do Acelerador Linear do IFUSP por possibilitar a realização das medidas utilizando o controlador multidetetor.

Ao IPEN/CNEN por possibilitar a realização deste trabalho.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

Ao meu marido pelo amor carinho e apoio.

Finalmente agradeço aos meus pais, irmãos, cunhados e sobrinhos.

E a todos que citados ou não nesta dissertação, cujos momentos tive a felicidade de viver, um carinhoso reconhecimento.

ESPECTROSCOPIA GAMA NO NÚCLEO ^{149}Nd

Ilca Marli Moitinho Amaral Medeiros

RESUMO

Os raios γ do núcleo de ^{149}Pm foram observados a partir do decaimento β^- do ^{149}Nd (1,7h) empregando-se as técnicas de espectroscopia - γ simples e coincidência $\gamma\gamma$. Os espectros de raios γ foram obtidos utilizando-se um detetor de HPGe de alta resolução. Foram determinadas as energias e intensidades relativas de 198 transições das quais 45 foram observadas pela primeira vez neste decaimento.

O arranjo de coincidência utilizou o módulo multidetetor padrão Camac e o espectrômetro- gama HPGe (89 cm³) - Ge (Li) (45 cm³). No esquema de decaimento proposto 181 transições gama foram posicionadas em 51 níveis de energia, sendo incluídos 6 novos níveis a: 1406,88(6)keV; 1367,91(6)keV; 1363,85(4)keV; 1328,79(9)keV; 1293,4(4)keV e 1181,18(6)keV.

Os resultados obtidos no presente estudo, juntamente com dados existentes na literatura, possibilitaram estabelecer spin e paridade para muitos dos níveis estudados

Gamma Spectroscopy of ^{149}Nd

Ilca Marli Moitinho Amaral Medeiros

ABSTRACT

The γ - rays in ^{149}Pm following the beta decay of ^{149}Nd (1.7h) have been studied using both single and coincidence gamma spectroscopy techniques.

The γ - rays spectra were obtained with high-resolution HPGe detector. The energies and relative intensities of 198 γ - rays have been determined, 45 of them were observed for the first time.

The coincidence apparatus uses the Camac multidetector module and a HPGe (89 cm^3) – Ge(Li) (45 cm^3). The total number of gamma transitions observed, 181 have been placed in a proposed level scheme with 51 levels. This includes 6 new levels at: 1406.88(6)keV; 1367.91(6)keV; 1363.85(4)keV; 1328.79(9)keV; 1293.4(4)keV and 1181.18(6)keV.

The present results together with the results of earlier studies permitted assignments of spin and parity for many of the levels studied.

SUMÁRIO

	Página
INTRODUÇÃO.....	1
1 MEDIDAS DE ESPECTROSCOPIA GAMA NO NÚCLEO ^{149}Nd	6
1.1 Introdução.....	6
1.2 Instrumentação e Procedimento Experimental.....	6
1.2.1 Espectrômetro - γ	6
1.2.2 Sistema Eletrônico e de Aquisição.....	7
1.3 Técnica Experimental.....	7
1.3.1 Preparo das fontes radioativas de ^{149}Nd	8
1.3.2 Calibrações.....	8
1.4 Análise de dados da medida de espectroscopia- γ	9
1.4.1 Análise do espectro-soma do núcleo ^{149}Nd	10
1.4.2 Obtenção dos valores de energia e intensidade relativa das transições- γ	10
1.5 Resultados da medida de espectroscopia- γ	12
2. MEDIDAS DE COINCIDÊNCIA GAMA-GAMA.....	34
2.1 Introdução.....	34
2.2 Instrumentação e Procedimento Experimental.....	34
2.2.1 Espectrômetro de coincidência $\gamma\gamma$	35
2.2.2 Eletrônica de coincidência $\gamma\gamma$	36
2.3 Análise de dados de coincidência $\gamma\gamma$	37
2.3.1 Ajuste de picos bidimensionais.....	40
2.4 Resultados.....	42
3. ESQUEMA DE NÍVEIS.....	46
3.1 Cálculo da Energia dos níveis.....	46
3.2 Intensidade de alimentação beta dos níveis.....	47
3.3 Cálculo do $\log ft$	48
3.4 Resultados.....	48

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	65
4.1 Análise dos níveis excitados do ^{149}Pm	65
4.2 Estrutura nuclear do ^{149}Pm	75
5. CONCLUSÕES	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1.1: Energia (E_γ) e Intensidade Relativa (I_γ) das transições γ pertencentes ao decaimento beta do ^{149}Nd .	18
Tabela 2.1: Relações de coincidências das transições γ do decaimento β^- do ^{149}Nd observadas no intervalo de energia de 30 a 1700keV.	43
Tabela 3.1: Energia (E_γ) e posicionamento das transições γ ($E_{ni} \rightarrow E_{nf}$) estabelecidas no presente estudo.	48
Tabela 3.2: Energia do nível ($E_{\text{nível}}$), spin e paridade atribuídos aos níveis do decaimento β^- do ^{149}Nd .	61
Tabela 3.3: Energia do nível ($E_{\text{nível}}$) e Intensidade (I_β) associada a transição β^- e $\log ft$ atribuídos aos níveis do decaimento β^- do ^{149}Nd .	63
Tabela 4.1: Transições γ observadas pela primeira vez no decaimento do núcleo do ^{149}Nd na medida de espectroscopia simples.	66
Tabela 4.2: Valores de energia associados aos multipletos identificados no presente estudo.	68
Tabela 4.3: Energia (E_γ) e posição das transições γ , pertencentes ao decaimento beta do ^{149}Nd , propostas por Schneider <i>et al</i> [2] e confirmadas no presente estudo.	70

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1: Instrumentação nuclear para espectroscopia gama.....	7
Figura 1.2: Curva de eficiência do detetor.....	9
Figura 1.3a: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).....	12
Figura 1.3b: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).....	13
Figura 1.3c: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).....	13
Figura 1.3d: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).....	14
Figura 1.3e: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).....	14
Figura 1.3f: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).....	15
Figura 1.3g: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).....	15
Figura 1.3h: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).....	16
Figura 1.3i: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).....	16
Figura 1.3j: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).....	17
Figural.4: Ajustes obtidos com o programa IDF para as transições γ observadas pela primeira vez, a saber: 26,4; 34,0; 39,1; 44,3; 58,5; 67,2; 69,5; 72,7; 77,1; 80,3; 90,1; 92,9; 171,2; 224,5; 238,6; 290,4; 332,1; 371,9; 413,7; 434,9; 441,5; 590,7; 652,7; 665,2; 726,8; 736,2; 771,9; 794,6; 806,1; 835,2; 839,2; 858,7; 933,2; 976,2; 1016,1; 1040,7; 1119,8; 1170,9; 1180,5; 1206,7; 1237,6; 1293,4; 1367,9; 1400,9 e 1407,3keV.....	26

Figura 2.1: Esquema do Espectrômetro de Coincidência $\gamma\gamma$	35
Figura 2.2: Diagrama de blocos do arranjo eletrônico das medidas de coincidência $\gamma\gamma$	37
Figura 2.3: Histograma de tempo.....	39
Figura 2.4: Tela principal do programa BIDIM.....	40
Figura 2.5: Tela de ajuste do programa BIDIM (exemplo).....	41
Figura 2.6: Tela do resultado final do ajuste fornecido pelo programa BIDIM.....	41
Figura 2.7: Espectro parcial tridimensional do ^{149}Pm	42
Figura 3.1 a: Esquema de decaimento do ^{149}Nd proposto neste estudo.....	55
Figura 3.1 b: Esquema de decaimento do ^{149}Nd proposto neste estudo.....	56
Figura 3.1 c: Esquema de decaimento do ^{149}Nd proposto neste estudo.....	57
Figura 3.1 d: Esquema de decaimento do ^{149}Nd proposto neste estudo.....	57
Figura 3.2 a: Esquema de decaimento do ^{149}Nd proposto por Firestone [19].....	58
Figura 3.2 b: Esquema de decaimento do ^{149}Nd proposto por Firestone [19].....	59
Figura 3.2 c: Esquema de decaimento do ^{149}Nd proposto por Firestone [19].....	60
Figura 3.2 d: Esquema de decaimento do ^{149}Nd proposto por Firestone [19].....	60
Figura 4.1: Sistemática dos estados de paridade positiva dos isótopos (A-impar) do Pm.....	77
Figura 4.2: Sistemática dos estados de paridade negativa dos isótopos (A-impar) do Pm.....	78

INTRODUÇÃO

O conhecimento de propriedades nucleares de núcleos quase - esféricos compõe a sistemática de trabalhos realizados no Laboratório de Estrutura Nuclear (LEN), do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), em parceria com o Laboratório do Acelerador Linear (LAL) do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP). O objetivo da pesquisa é obter experimentalmente parâmetros do núcleo que possam elucidar sua estrutura, via decaimento beta – gama.

O presente estudo envolve a investigação do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd que popula os níveis excitados do núcleo ^{149}Pm , via transição γ . As motivações que levaram a realização deste estudo são discutidas a seguir.

A estrutura de níveis de energia nos isótopos de Pm de massa ímpar ($Z= 61$) indicam uma transição de forma esférica para deformada quando o número de nêutrons aumenta de 86 para 90. Desta forma, a investigação de núcleos nesta região de massa é de grande relevância tanto para os físicos teóricos como experimentais, que atuam no campo da estrutura nuclear, estabelecendo experimentalmente propriedades nucleares, bem como testando e aperfeiçoando modelos nucleares. Os núcleos de ^{151}Eu e ^{153}Tb , com $N=88$, foram descritos primeiramente como tendo comportamento similar aos núcleos esféricos enquanto os isótonos ^{151}Pm , ^{153}Eu e ^{155}Tb , com $N=90$, foram interpretados em termos do modelo de partícula caroço [1-2]. Particularmente, para ^{149}Pm a falta de dados experimentais não motivou a realização de cálculos teóricos.

O presente estudo, que envolve o decaimento beta do ^{149}Nd , permite a obtenção de várias propriedades nucleares e conseqüentemente a investigação do comportamento dos estados à baixas energias neste núcleo.

As primeiras investigações experimentais envolvendo o decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd ($T_{1/2} = 1,7\text{h}$) foram realizadas no início da década de 60, por Gopinathan *et al.* [3] e

por Chen *et al.* [1], utilizando-se cintiladores de NaI(Tl), resultando em um esquema de níveis bastante simplificado. Um dos primeiros estudos relevantes foi realizado em 1966, por Gopinathan e Singru [4], sendo utilizado pela primeira vez um detector semicondutor em medidas de espectroscopia gama. Este estudo permitiu atribuir ao decaimento beta do ^{149}Nd 46 transições gama posicionadas em 21 níveis de energia. Posteriormente, medidas de espectroscopia γ e coincidência $\gamma\gamma$, usando uma combinação de detectores de Ge(Li) e NaI(Tl) [5,6], permitiram atribuir ao decaimento β^- do ^{149}Nd cerca de 70 transições- γ . As primeiras proposições a respeito de spin e paridade para alguns desses níveis foram obtidas em experimentos de correlação angular [7-11].

Um estudo detalhado, envolvendo o decaimento β^- do ^{149}Nd , foi realizado por Schneider *et al.* [2] em 1979, sendo utilizado pela primeira vez detectores de Ge(Li) tanto para medidas de espectroscopia γ como de coincidência $\gamma\gamma$. Este experimento permitiu incorporar ao decaimento do ^{149}Nd um total de 214 transições- γ das quais 201 foram posicionadas em 42 níveis de energia. Entretanto a maior parte dos dados referentes às energias e às intensidades das transições gama foram deduzidas através das relações de coincidências e necessitam de confirmação. Este estudo é muito importante pois sugere que este decaimento é formado por vários multipletos, isto é, trata-se de um esquema de decaimento com alta densidade de níveis excitados na região de energia do decaimento beta.

O estudo espectroscópico mais recente, referente ao decaimento β^- do ^{149}Nd , foi realizado por Hideki *et al.* [11]. Este experimento foi realizado com a combinação de detectores de Ge(Li) de diferentes volumes, sendo propostos 199 transições γ dispostas em 40 níveis de energia. Entretanto os dados obtidos não apresentam incertezas e quando comparados ao estudo anterior, realizado por Schneider *et al.* [2], apresentam muitas diferenças em termos da determinação em energia, intensidade e posicionamento de transições γ .

A revisão de todos esses experimentos mostra que muitos dados discordam no que diz respeito à determinação precisa em energia e no cálculo da intensidade de transições gama, onde o erro em muitos casos é superior a 30%, bem como em relação ao posicionamento de transições γ previamente estabelecidas.

Para ilustrar, foi elaborado um sumário com as informações mais relevantes dos estudos mais recentes [2,11] envolvendo o decaimento beta do ^{149}Nd . As condições de medidas do experimento realizado por Gopinathan e Singru [4] foram também incluídas pois trata-se do primeiro estudo a utilizar um detetor de Ge(Li), bem como as condições experimentais do presente estudo, para comparação.

Pelo sumário apresentado pode-se destacar as melhorias introduzidas no presente, a saber:

- ✓ uso de detetores de melhor resolução em energia;
- ✓ alta estatística;
- ✓ análise das incertezas utilizando-se a metodologia de covariâncias;
- ✓ medidas de coincidências bidimensionais que fornecem condições de identificação de multipletos, o que nem sempre é possível na medida de espectroscopia, em função da resolução em energia do detetor.

Sumário: Condições experimentais referente aos estudos anteriores envolvendo o decaimento beta do núcleo ^{149}Nd incluindo as condições experimentais para realização do presente estudo.

Estudos realizados	Experimento : Espectroscopia γ	Experimento : Coincidência $\gamma\gamma$	Resultados
Gopinathan e Singru, 1966[4]	$^{148}\text{Nd}_2\text{O}_3$ 93% NaI (TI) 3" x 3" 1 cm - Pb+Cd+ Cu e Ge(Li) FWHM < 6 keV 512 canais	dois NaI (TI) 2" x 2"	✓ 46 transições ✓ 21 níveis os resultados não apresentam incertezas
Schneider <i>et al.</i> , 1979 [2]	$^{148}\text{Nd}_2\text{O}_3$ 93% Ge(Li) 0,5 cm ³ , $E_\gamma < 100\text{keV}$ FWHM < 0,6keV e Ge(Li) 55cm ³ , $E_\gamma > 100\text{keV}$ 2,5 cm - Pb FWHM < 2,8 keV	Ge(Li) 55 cm ³ - Ge(Li) 55cm ³ Sistema aquisição biparamétrico 15h de aquisição 110 janelas em Energia	✓ 201 transições ✓ 42 níveis ✓ 13 transições não posicionadas
Hideki <i>et al.</i> , 1986 [11]	$^{148}\text{Nd}(\text{NO}_3)_3$ 93% Ge(Li) 65cm ³ e Ge(Li) 1,4 cm ³ 4h aquisição/fonte	Ge(Li) 65 cm ³ - Ge(Li) 38cm ³ e Ge(Li) 140 cm ³ - Ge(Li) 38cm ³	✓ 191 transições ✓ 40 níveis ✓ 8 transições não posicionadas os resultados não apresentam incertezas
Presente estudo	$^{148}\text{Nd}(\text{NO}_3)_3$ 94% HPGe 76 cm ³ FWHM = 1,8 keV 8h aquisição/fonte 206 horas 4096 canais	HPGe 89 cm ³ - HPGe 45 cm ³ FWHM < 2,0 keV Sistema aquisição Multiparamétrico 156 horas	✓ 198 transições ✓ 51 níveis ✓ 17 transições não posicionadas

Com o objetivo de elaborar um esquema de decaimento β^- preciso, para o núcleo ^{149}Nd , o presente estudo compreende medidas de espectroscopia $-\gamma$ e coincidência $\gamma\gamma$ para determinação de parâmetros nucleares, tais como: energia (E_γ) e intensidade (I_γ) de transições gama; energia (E_n), intensidade e alimentação beta (I_β) dos níveis excitados, bem como a proposição de spin (J) e paridade (π) desses níveis. Por meio desses parâmetros é possível construir o esquema de níveis excitados do núcleo ^{149}Pm .

Na presente investigação a medida de espectroscopia- γ foi realizada no LEN - IPEN e a medida de coincidência $\gamma\gamma$ no LAL - IFUSP. A abordagem das medidas é feita em cinco capítulos. No capítulo 1 é feita a descrição da medida de espectroscopia, onde são discutidas as condições experimentais, o método de análise, a aquisição de dados e os resultados obtidos. Da mesma forma, no capítulo 2 é feita a descrição do experimento de coincidências. No capítulo 3 é apresentada a elaboração do esquema de decaimento do núcleo ^{149}Nd . No capítulo 4 é feita a discussão dos níveis excitados do ^{149}Pm no que diz respeito à atribuição de spin e paridade de níveis e no capítulo 5 são apresentadas as conclusões.

As referências bibliográficas são numeradas independentemente dos capítulos (por ordem de citação no texto) e as tabelas bem como figuras são numeradas em função de cada capítulo.

1 MEDIDAS DE ESPECTROSCOPIA GAMA NO NÚCLEO ^{149}Nd

1.1 Introdução

A medida de espectroscopia γ tem a finalidade de determinar com precisão a energia e intensidade dos raios- γ associados ao decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd ($T_{1/2} \sim 1,7\text{h}$), a partir da obtenção de espectros diretos dos estados excitados do núcleo de ^{149}Pm .

Para realização desta análise espectroscópica foram feitas aquisições de dados para elaboração de quatro espectros: espectro de calibração em energia do detetor, espectro de calibração em eficiência do detetor, espectro direto do núcleo ^{149}Pm e espectro de fundo do laboratório.

1.2 Instrumentação e Procedimento Experimental

A instrumentação nuclear é composta por um espectrômetro- γ constituído de um detetor semicondutor e um sistema eletrônico descritos a seguir.

1.2.1 Espectrômetro - γ

O espectrômetro- γ é constituído de um detetor coaxial de HPGe de 76cm^3 de volume, com resolução de $1,8\text{keV}$ para a transição γ de 1332keV do ^{60}Ni .

A fonte é posicionada a uma distância de 10cm do detetor, em um plano perpendicular ao seu eixo, sendo que entre a fonte e o detetor não há nenhum tipo de absorvedor o que minimiza os efeitos de absorção e espalhamento.

1.2.2 Sistema Eletrônico e de Aquisição

Na figura 1.1 é apresentado um diagrama de blocos referente à eletrônica utilizada para obtenção dos espectros diretos.

O pulso produzido no detetor é pré-amplificado e transmitido ao amplificador ORTEC – 671. Deste amplificador utiliza-se a saída unipolar que fornece um pulso analógico de altura proporcional à energia da transição- γ , a qual é enviado ao multicanal ADCAM ORTEC – 918A, que faz interface com um microcomputador. Por meio do programa MAESTRO visualizam-se os espectros-gama para posterior análise.

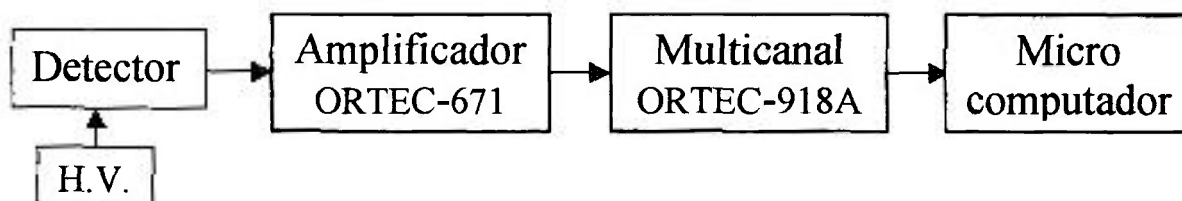


Figura 1.1: Instrumentação nuclear para espectroscopia gama.

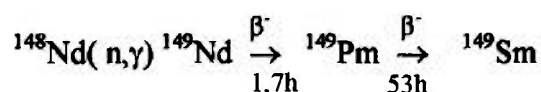
1.3 Técnica Experimental

Neste item é feita a descrição do preparo da fonte radioativa de ^{149}Nd e a descrição das calibrações em energia e eficiência do detetor.

1.3.1 Preparo das fontes radioativas de ^{149}Nd

As fontes radioativas de ^{149}Nd foram obtidas por meio da reação $^{148}\text{Nd}(n,\gamma)^{149}\text{Nd}$. O procedimento constituiu em irradiar amostras de ^{148}Nd , enriquecido isotopicamente em 94%, produzidas no Oak Ridge National Laboratory (ORNL), com nêutrons térmicos no reator IEA-R1m num fluxo de aproximadamente $10^{13}\text{n/cm}^2\cdot\text{s}$, durante 3 minutos, produzindo-se assim o ^{149}Nd . O posterior decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd , com $T_{1/2}\sim 1,7\text{h}$, popula os estados excitados do ^{149}Pm . Devido ao decaimento β^- do ^{149}Pm para ^{149}Sm com $T_{1/2}\sim 53\text{h}$, o período de irradiação foi estabelecido por 3 minutos, pois os testes realizados mostraram a interferência do segundo decaimento ($^{149}\text{Pm} \rightarrow ^{149}\text{Sm}$), para irradiações mais longas.

Esquemáticamente:



Cada fonte foi submetida a um tempo de contagem de 8h, correspondendo ~ 4 meia-vidas. No total foram feitas 25 irradiações resultando num tempo de aquisição de cerca de 200 horas. O espectro de fundo do laboratório foi medido nas mesmas condições para proceder a correção. Devido ao invólucro de polietileno da fonte, também sujeito a irradiação, foi feita uma análise deste invólucro irradiado, para identificação e posterior correção do espectro em estudo. Todas as medidas foram realizadas em 4096 canais.

1.3.2 Calibrações

Foi obtida a curva de calibração em energia do espectrômetro utilizando-se fontes padrão de: ^{60}Co , ^{109}Cd , ^{133}Ba , ^{137}Cs e ^{152}Eu [12], com a finalidade de associar a posição dos fotopicos do espectro de ^{149}Nd resultante, ao longo dos 4096 canais, com suas respectivas energias.

A curva de eficiência relativa do detetor, na geometria de detecção, foi obtida a partir de dados provenientes das fontes padrão de ^{133}Ba e ^{152}Eu que possuem valores de

intensidade de suas transições γ bem determinadas, obtidas na compilação da IAEA [12]. A curva de eficiência obtida é apresentada na figura 1.2 e a função ajustada é dada por:

$$F = \left[P(1)e^{-x.P(2)} + P(3)e^{-x.P(4)} \left(1 - e^{-P(5)x^{P(6)}} \right) \right] \quad (1.1)$$

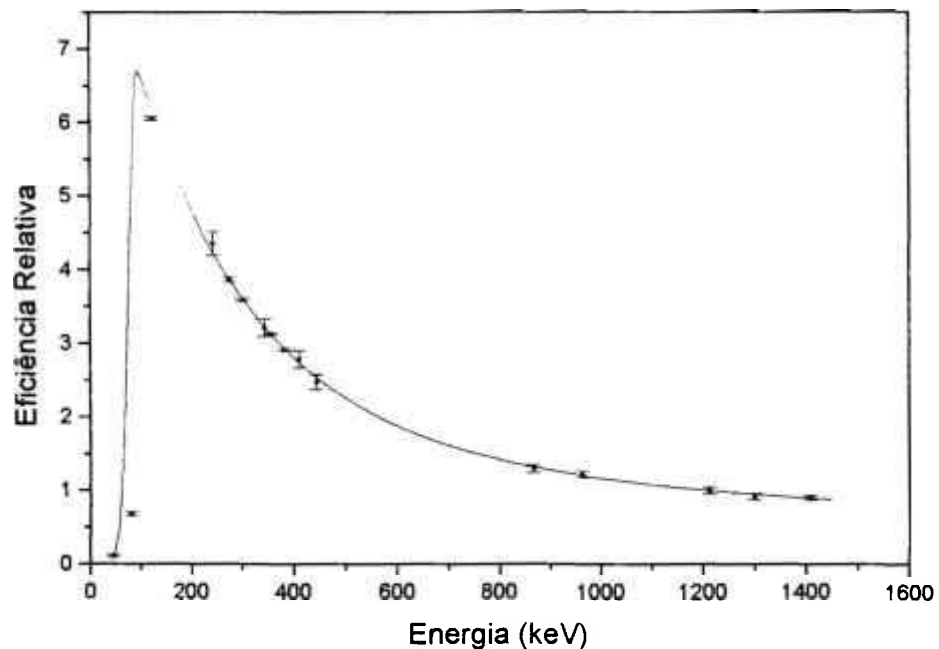


Figura 1.2: Curva de eficiência do detector.

1.4 Análise de dados da medida de espectroscopia- γ

Nesta etapa é de fundamental importância a análise de dados referentes ao acompanhamento da meia-vida das transições que compõem o Espectro - Soma do ^{149}Nd bem como a análise do espectro de fundo mais invólucro de polietileno (onde a fonte foi acondicionada). Estas análises permitem identificar além das transições que compõem o decaimento em estudo outras originárias de efeitos de detecção como soma, empilhamento e escape.

1.4.1 Análise do espectro-soma do núcleo ^{149}Nd

Basicamente, a análise de dados consiste na determinação da energia e intensidade das transições gama visando a elaboração do esquema de níveis do núcleo de ^{149}Pm . Para tanto realiza-se primeiramente uma verificação quanto à posição dos picos ao longo dos 4096 canais, em cada um dos espectros diretos obtidos, pois em medidas tão longas pode ocorrer alteração da posição dos picos devido a instabilidade no arranjo eletrônico. Quando necessário efetua-se a relocação dos espectros, utilizando-se o programa RELOCA [13]. Na sequência realiza-se a soma dos espectros, com auxílio do programa SOMA, resultando em um único espectro denominado Espectro Soma do ^{149}Nd . Da mesma forma, procede-se com os espectros de fundo e da cápsula de polietileno.

Para o cálculo da área das transições γ do Espectro - Soma do ^{149}Nd , utiliza-se o programa de análise estatística IDF [14].

1.4.2 Obtenção dos valores de energia e intensidade relativa das transições- γ

De posse dos valores precisos das áreas e das posições referentes às transições gama identificadas no Espectro - Soma do ^{149}Nd e dos parâmetros de calibração em energia obtém-se os valores de energia dos raios gama através do programa de ajuste INTERCOV [15].

De posse da curva de eficiência relativa do detetor, dos valores de energia das transições γ e seu respectivo erro, bem como das áreas desses fotopicos e seus respectivos erros, é possível calcular a intensidade relativa das transições utilizando o programa de ajuste INTEN [16], sendo a intensidade relativa expressa pela equação:

$$I_{rel} = \frac{A \ \epsilon_{rel}(E_o)}{\epsilon_{rel} \ A(E_o)} 100 \quad (1.2)$$

onde:

I_{rel} = intensidade relativa do fotopico

A = área do fotopico, obtida com o programa de ajuste IDF [14].

ε_{rel} = eficiência relativa, obtida a partir da curva de eficiência do detector.

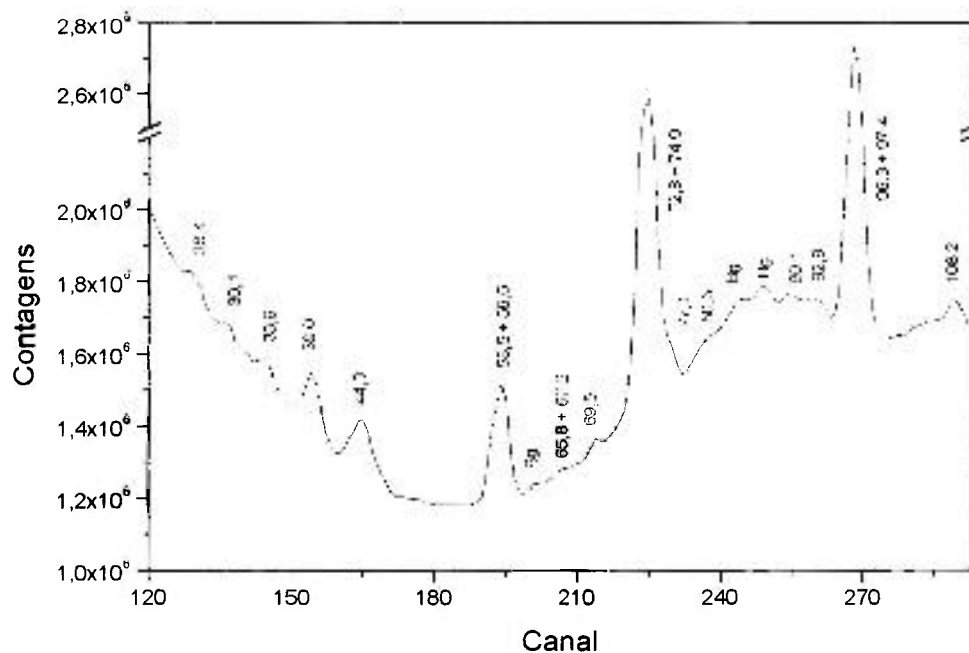
$\varepsilon_{rel}(E_o)$ = eficiência relativa, para a energia tomada como padrão, obtida a partir da curva de eficiência do detector.

$A(E_o)$ = área do fotopico, para a energia tomada como padrão, obtida com o programa de ajuste IDF [14].

No presente estudo, os valores de energia e intensidade foram realizados considerando na estimativa das incertezas as covariâncias.

1.5 Resultados da medida de espectroscopia- γ

O espectro direto das transições γ provenientes do decaimento β^- do ^{149}Nd , observadas no detetor de HPGe por 206 horas, é apresentado na figura 1.3. As energias destacadas em azul dizem respeito às transições γ observadas pela primeira vez. O intervalo de energia estudado compreendeu a região de energia de 20 a 1800 keV.



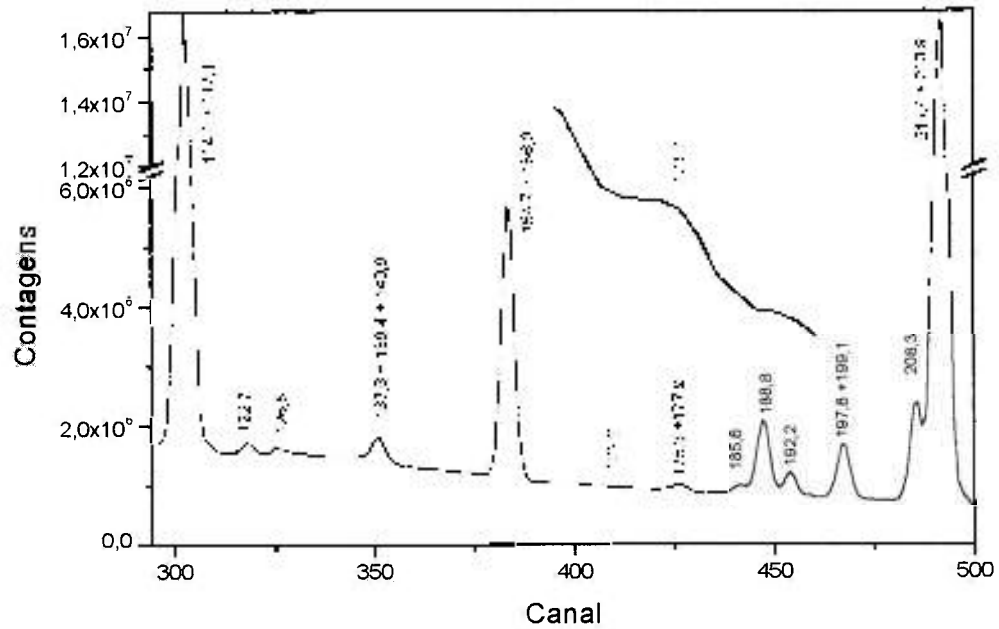


Figura 1.3b: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ¹⁴⁹Nd (energia em keV).

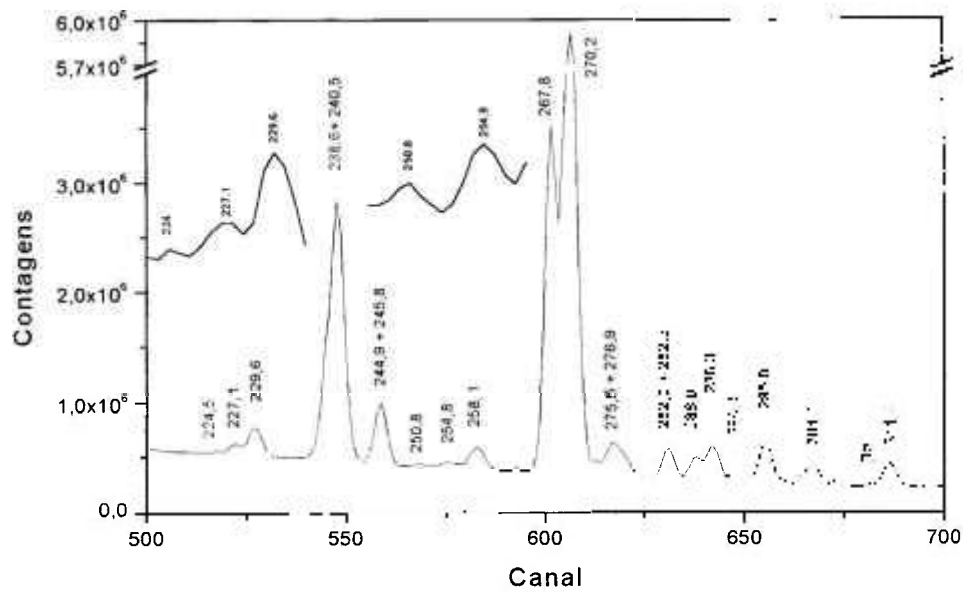


Figura 1.3c: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ¹⁴⁹Nd (energia em keV).

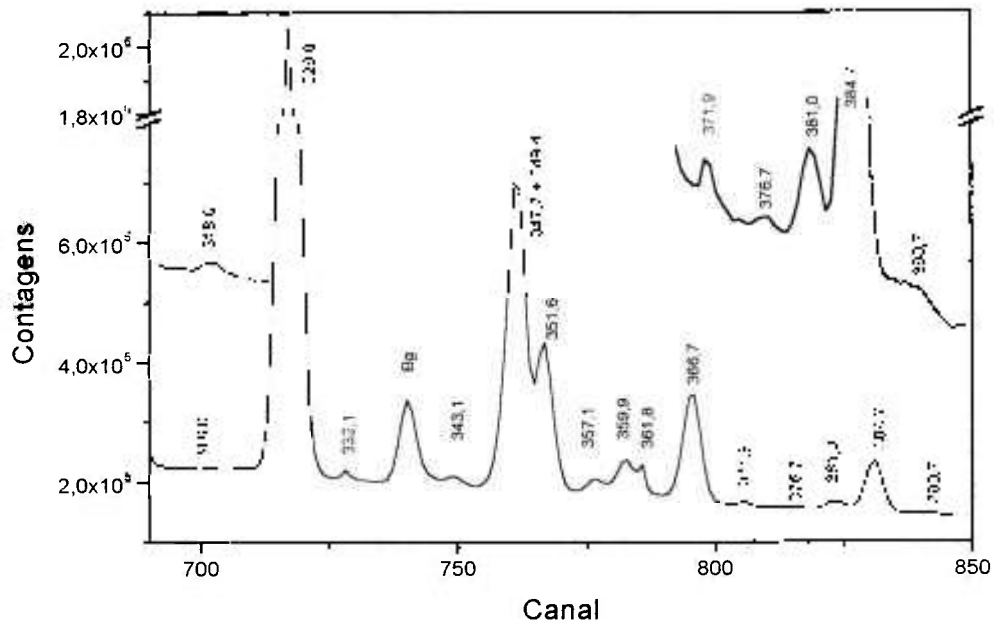


Figura 1.3d: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).

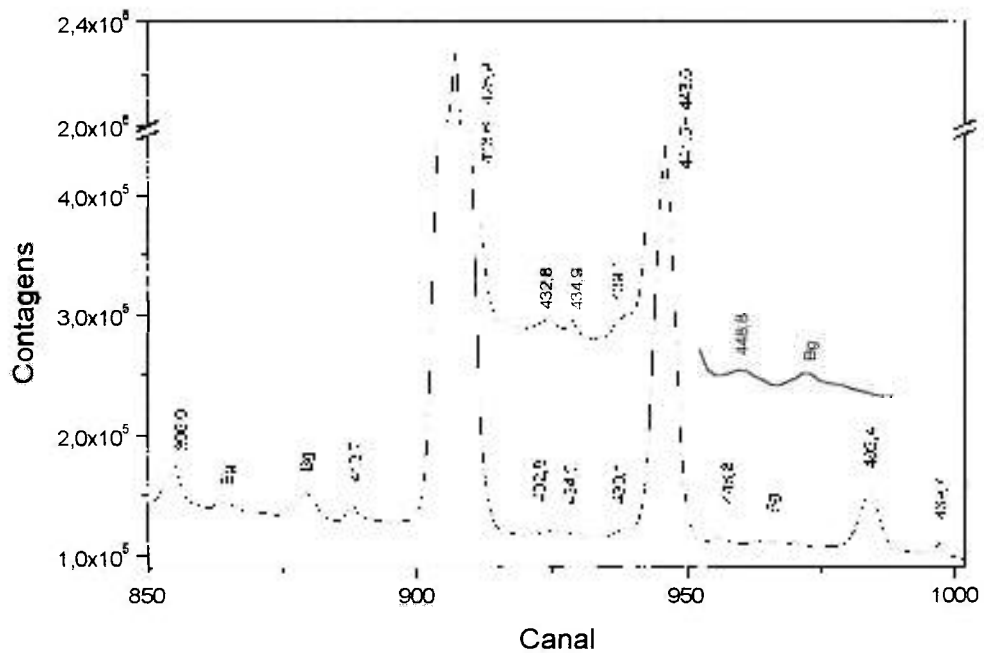


Figura 1.3e: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).

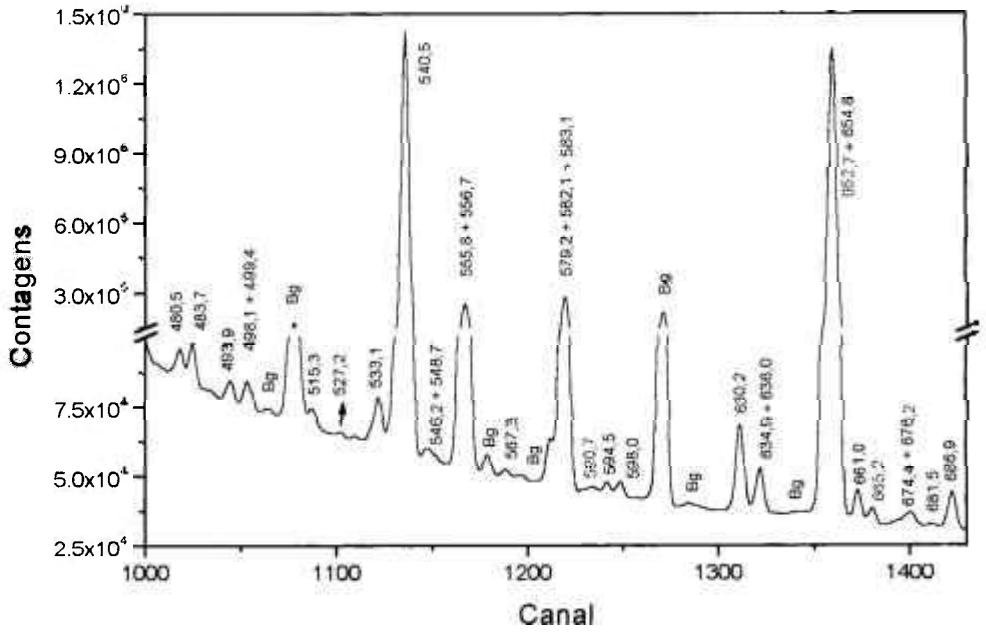


Figura 1.3f: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).

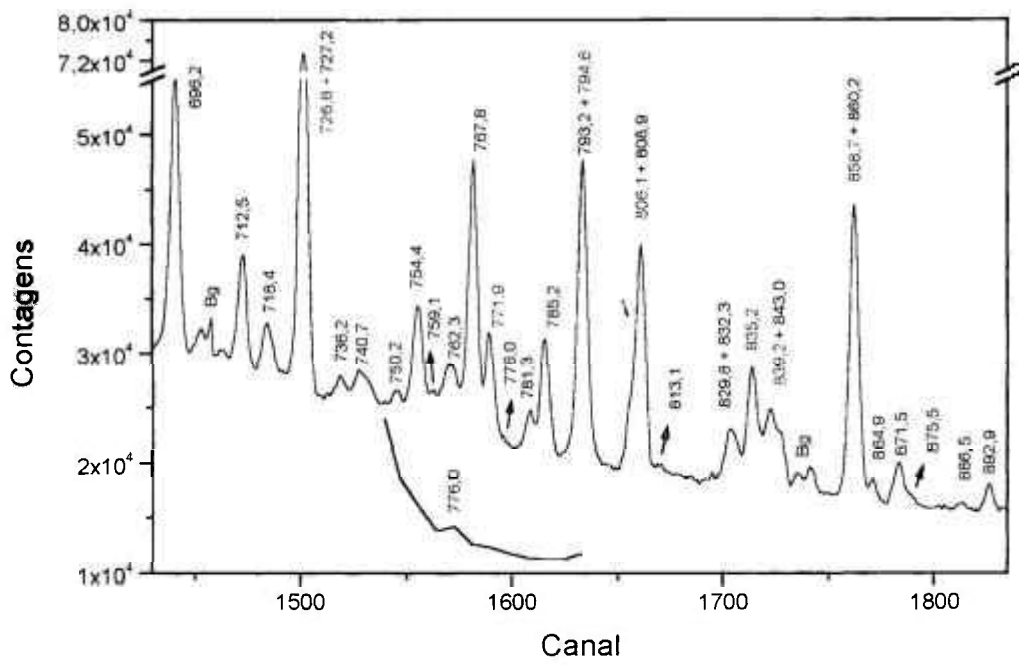


Figura 1.3g: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).

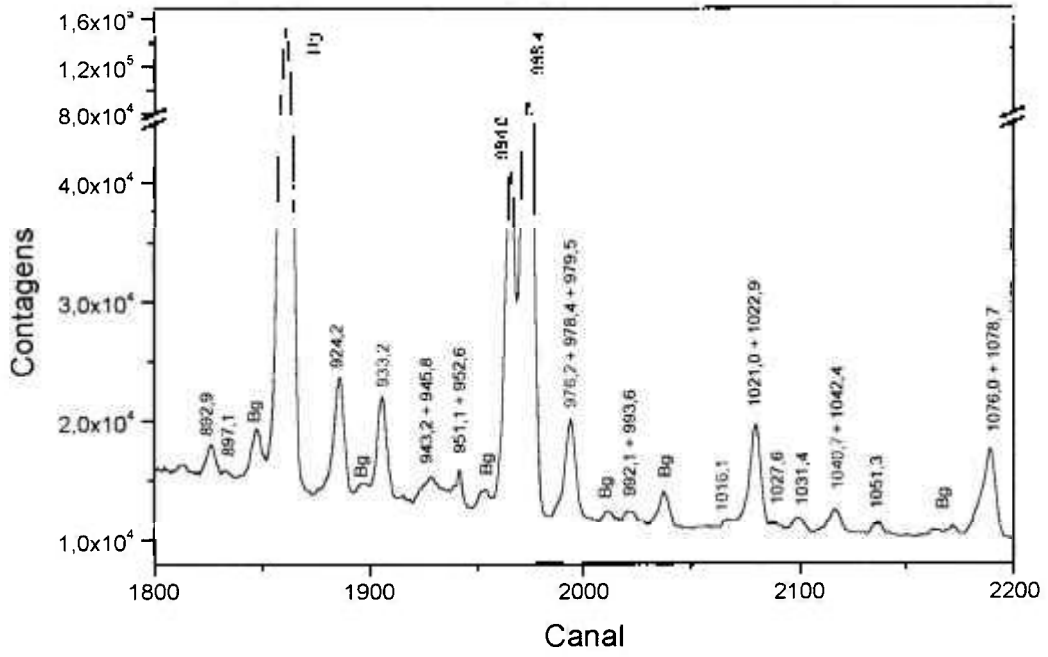


Figura 1.3h: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).

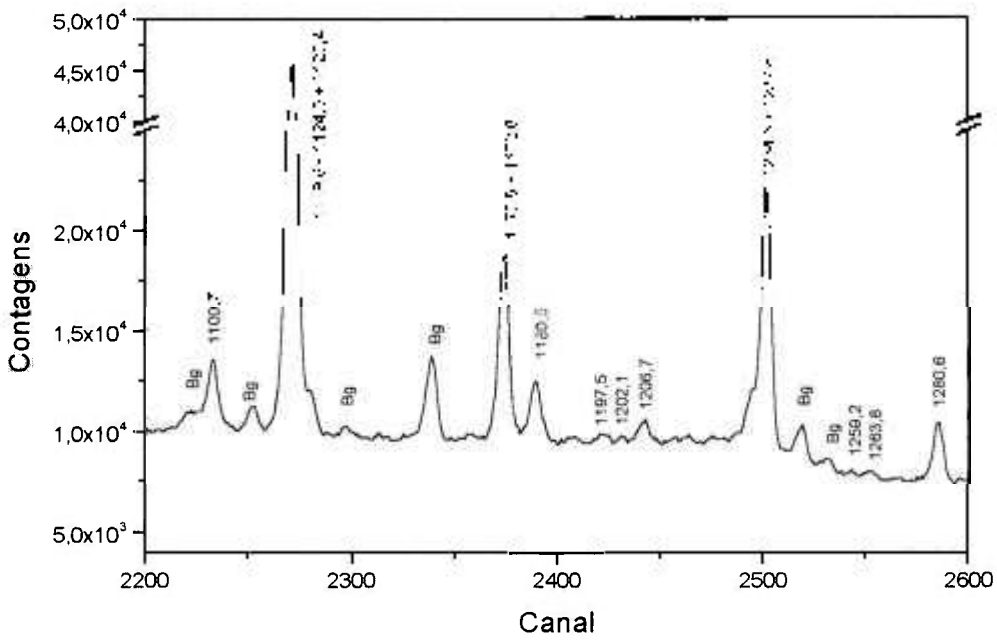


Figura 1.3i: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).

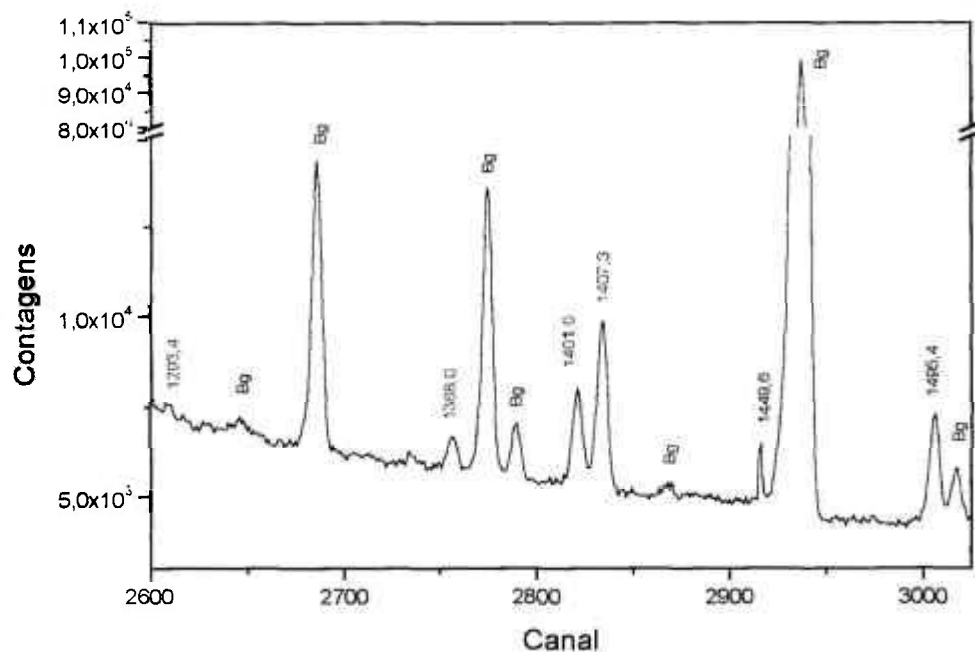


Figura 1.3j: Espectro Soma das transições gama provenientes do decaimento β^- do núcleo ^{149}Nd (energia em keV).

O cálculo da Energia e Intensidade relativa das transições γ que compõe o Espectro-Soma do ^{149}Nd é apresentado na Tabela 1.1. A intensidade relativa da transição de 211keV foi considerada como 1000 % por ser a mais intensa do espectro.

Tabela 1.1: Energia (E_γ) e Intensidade Relativa (I_γ) das transições γ pertencentes ao decaimento beta do ^{149}Nd .

Presente Trabalho		Schneider <i>et al</i> [2]	
Energia(keV)	I_γ (%)	Energia(keV)	I_γ (%)
—	—	22,68 (3)*	0,21 (6)
26,394 (22)	—	—	—
30,077 (26)	—	29,94 (2)*	0,67 (17)
33,964 (16)	—	—	—
—	—	36,71 (10)*	0,70 (30)
39,065 (9)	—	—	—
44,341 (14)	—	—	—
58,526 (11)	54,7 (9)	—	—
59,652 (8)	76,6 (13)	58,85 (3)*	50,00(80)
65,792 (8)	3,4 (4)	65,24 (10)*	0,60 (20)
—	—	65,42 (10)*	1,20 (40)
67,20 (19)	1,7 (4)	—	—
69,510 (21)	2,5 (3)	—	—
72,753 (12)	23,0 (5)	—	—
—	—	74,33 (3)*	42,70 (93)
74,932 (4)	124,5 (10)	74,62 (4)*	38,10 (58)
—	—	75,63 (9)	8,80 (80)
77,097 (10)	23,5 (5)	—	—
80,305 (10)	17,4 (3)	—	—
90,12 (5)	1,99 (11)	—	—
92,89 (3)	2,16 (13)	—	—
—	—	94,88 (10)	1,60 (50)
96,3 (3)	1,8 (11)	96,90 (16)*	1,30 (50)
97,354 (17)	44,14 (4)	96,99 (2)*	55,60 (42)
108,189 (14)	5,4 (4)	107,78 (12)	3,30 (60)
—	—	112,52 (4)	4,60 (60)
114,066(11)	651,3 (7)	114,30 (2)	734,60 (529)
117,088 (8)	8,09 (7)	116,78 (27)	4,2 (12)

Presente Trabalho		Schneider <i>et al</i> [2]	
Energia(keV)	I γ (%)	Energia(keV)	I γ (%)
122,689 (8)	8,26 (4)	122,40 (6)	9,9 (60)
126,513 (17)	3,03 (23)	126,60 (8)	4,3 (30)
137,288 (20)	5,14 (4)	137,10 (7)	2,40 (20)
139,357 (7)	23,3 (8)	139,20 (3)	19,6 (90)
140,93 (5)	5,0 (3)	141,06 (7)	1,50 (10)
154,74 (6)	4,5 (3)	155,12 (10)*	1,3 (60)
156,048 (3)	230,7 (5)	155,86 (2)*	228,8 (85)
171,17 (10)	1,24 (22)	—	—
175,33 (8)	1,44 (4)	176,25 (4)*	1,9 (40)
177,905 (13)	5,9 (5)	177,73 (5)*	6,0 (60)
185,617 (9)	5,79 (12)	185,47 (5)	4,00 (20)
188,7832 (23)	69,9 (3)	188,64 (2)	69,5 (31)
192,171 (3)	22,07 (15)	192,02 (3)	22,00 (70)
197,75 (8)	3,1 (3)	197,80 (6)*	1,90 (20)
199,066 (5)	55,8 (5)	198,93 (2)*	53,7 (17)
208,3210 (21)	105,26 (9)	208,14 (3)	98,3 (40)
211,4403 (20)	1000 (18)	211,32 (2)	1000 (403)
213,9414 (20)	11,59 (7)	213,97 (7)	15,4 (10)
224,49 (6)	0,92 (9)	—	—
227,072 (9)	5,44 (6)	226,85 (4)	6,30 (20)
229,630 (3)	17,71 (9)	229,58 (2)	18,60 (50)
238,611 (3)	34,32 (11)	—	—
240,4660 (18)	122,89 (22)	240,23 (2)	151,8 (60)
244,89 (15)	3,6 (12)	245,49 (7)*	8,5 (40)
245,847 (21)	36,18 (15)	245,71 (2)*	31,4 (80)
250,82 (3)	1,06 (27)	250,83 (4)	1,30 (10)
254,783 (15)	3,69 (12)	254,25 (3)	3,30 (10)
258,144 (3)	15,73 (20)	258,08 (3)	14,5 (40)
267,7873 (16)	218,11 (8)	267,70 (2)	232,9 (59)
270,2449 (16)	385,13 (11)	270,17 (2)	413 (105)
—	—	273,25 (5)*	6,8 (30)

Presente Trabalho		Schneider <i>et al</i> [2]	
Energia(keV)	I γ (%)	Energia(keV)	I γ (%)
—	—	273,55 (8)*	3,20 (15)
275,469 (5)	15,29 (8)	275,42 (2)	25,10 (60)
276,89 (8)	10,09 (8)	276,96 (4)	13,2 (40)
281,958 (14)	6,88 (21)	282,40 (9)*	0,65 (25)
282,5292 (25)	20,71 (12)	282,46 (2)*	23,8 (60)
286,034 (4)	15,31 (13)	287,76 (12)*	0,50 (20)
288,2516 (25)	23,31 (14)	288,20 (2)*	26,7 (70)
290,374 (20)	2,43 (6)	—	—
294,969 (7)	33,3 (7)	294,79 (2)	22,0 (60)
301,097 (9)	12,4 (4)	301,11 (3)	14,0 (40)
311,059 (3)	17,6 (3)	310,97 (3)	19,7 (50)
318,02 (12)	6,15 (18)	318,2 (3)	0,33 (17)
326,6331 (17)	165,89 (16)	326,54 (3)	175,9 (43)
—	—	329,13 (7)*	0,80 (40)
332,167 (18)	0,68 (4)	—	—
343,12 (5)	1,4 (4)	342,95 (18)*	3,2 (70)
347,654 (19)	23,8 (3)	347,86 (3)	6,20 (20)
349,365 (4)	85,40 (10)	349,22 (3)	53,1 (14)
351,632 (3)	45,1 (6)	352,79 (4)	2,10 (10)
357,111 (22)	2,82 (14)	357,02 (4)	4,80 (10)
—	—	358,49 (1)	0,40 (20)
359,889 (20)	5,93 (15)	360,04 (4)	5,90 (20)
361,76 (3)	5,14 (13)	361,40 (20)*	0,25 (10)
366,682 (3)	18,58 (17)	366,62 (4)	20,9 (60)
371,92 (6)	0,86 (10)	—	—
376,69 (10)	0,43 (11)	376,90 (2)*	0,30 (15)
380,962 (22)	1,63 (4)	380,66 (5)	2,00 (10)
384,703 (4)	9,37 (5)	384,67 (4)	10,3 (30)
390,65 (16)	0,21 (3)	390,96 (7)*	0,30 (10)
396,878 (12)	2,98 (4)	396,75 (5)	2,80 (10)
—	—	399,14 (9)*	0,56 (22)

Presente Trabalho		Schneider <i>et al</i> [2]	
Energia(keV)	I γ (%)	Energia(keV)	I γ (%)
413,693 (15)	0,67 (5)	—	—
423,5600 (20)	252,5 (4)	423,54 (4)	287 (151)
425,86 (11)	25,5 (3)	425,33 (6)	10,5 (40)
432,76 (7)	0,14 (4)	432,81 (7)*	0,54 (25)
434,90 (7)	0,14 (4)	—	—
439,11 (7)	1,45 (14)	439,65 (14)*	1,4 (60)
441,47 (13)	1,22 (10)	—	—
443,550 (3)	42,21 (25)	443,56 (4)*	44,40 (20)
—	—	443,70 (30)*	3,3 (15)
448,82 (9)	0,38 (15)	448,80 (20)	0,31 (15)
462,354 (9)	8,1 (3)	462,34 (10)	1,60 (80)
469,706 (20)	0,49 (3)	470,53 (20)*	0,40 (20)
480,48 (3)	1,29 (15)	480,38 (8)	1,60 (10)
483,713 (18)	2,19 (18)	483,61 (6)	2,60 (10)
493,87 (15)	1,8 (6)	493,80 (8)	2,30 (20)
498,06 (7)	1,19 (25)	498,28 (9)*	0,40 (10)
499,44 (13)	0,79 (12)	498,55 (13)*	1,40 (40)
—	—	510,31 (7)	2,40 (60)
—	—	512,70 (20)*	0,50 (20)
515,26 (19)	5,11 (14)	515,78 (10)	1,40 (20)
527,2 (3)	1,68 (11)	527,60 (20)*	0,45 (12)
533,130 (17)	2,67 (4)	533,23 (6)	3,50 (20)
—	—	536,67 (10)*	1,8 (80)
540,513 (26)	239,11 (16)	540,49 (5)	253,6 (94)
546,22 (24)	3,85 (13)	547,13 (6)*	0,6 (30)
548,7 (4)	3,4 (8)	547,43 (3)*	0,4 (20)
555,77 (3)	17,7 (13)	555,88 (9)	22,6 (12)
556,71 (4)	23,9 (9)	556,83 (9)	16,8 (20)
—	—	558,01 (30)*	2,90 (10)
—	—	563,79 (15)*	0,36 (16)
567,32 (14)	0,6 (3)	567,60 (20)*	0,64 (13)

Presente Trabalho		Schneider <i>et al</i> [2]	
Energia(keV)	I γ (%)	Energia(keV)	I γ (%)
—	—	575,40 (30)*	0,30 (10)
579,17 (5)	1,2 (4)	579,28 (6)	2,90 (20)
582,144 (21)	6,26 (19)	582,92 (12)*	0,70 (30)
583,055 (13)	13,3 (4)	582,98 (8)*	1,90 (50)
—	—	588,50 (30)*	0,22 (8)
590,74 (17)	0,16 (4)	—	—
594,54 (5)	0,47 (7)	594,34 (9)	1,10 (10)
598,01 (4)	0,65 (7)	598,02 (8)	1,10 (10)
—	—	606,67 (16)	0,40 (20)
—	—	617,90 (30)*	0,29 (10)
630,225 (9)	6,01 (12)	630,23 (5)	7,30 (10)
634,87 (5)	10,65 (10)	635,50 (5)*	2,6 (50)
635,97 (4)	1,29 (12)	636,21 (11)*	2,0 (40)
—	—	650,97 (10)*	2,40 (10)
652,744 (7)	26,46 (15)	—	—
654,838 (3)	276,08 (22)	654,83 (3)	307 (150)
—	—	657,25 (12)*	0,7 (30)
660,97 (3)	1,22 (5)	661,48 (23)*	0,20 (8)
665,22 (7)	0,59 (4)	—	—
—	—	671,64 (17)*	0,40 (15)
674,38 (14)	0,40 (5)	673,59 (15)	0,42 (10)
676,17 (9)	0,60 (7)	675,86 (12)	0,98 (7)
681,47 (15)	0,23 (4)	681,34 (15)	0,31 (6)
686,905 (16)	3,40 (21)	686,97 (4)	3,40 (20)
696,191 (9)	5,60 (11)	696,26 (4)	6,6 (40)
—	—	704,07 (1)	0,13 (6)
712,542 (19)	2,43 (8)	712,59 (5)	2,70 (20)
718,44 (4)	1,20 (6)	718,42 (9)	1,90 (20)
726,822 (12)	1,54 (10)	—	—
727,23 (3)	2,55 (24)	727,87 (8)	0,63 (7)
736,18 (11)	0,71 (16)	—	—

Presente Trabalho		Schneider <i>et al</i> [2]	
Energia(keV)	I γ (%)	Energia(keV)	I γ (%)
740,66 (7)	0,83 (16)	740,61 (9)	0,55 (1)
—	—	743,48 (39)	0,10 (4)
750,15 (14)	1,2 (9)	749,63 (9)	0,52 (6)
754,43 (5)	3,6 (18)	754,34 (6)	1,50 (10)
759,13 (8)	3,0 (16)	758,73 (14)	0,60 (6)
762,27 (6)	0,70 (5)	761,49 (9)	1,10 (10)
—	—	765,10 (20)*	0,29 (29)
767,793 (13)	3,38 (8)	768,19 (6)	2,30 (20)
771,91 (4)	1,0 (5)	—	—
775,97 (15)	0,13 (3)	774,60 (30)*	0,12 (5)
781,32 (10)	0,20 (3)	781,33 (15)	0,15 (4)
785,20 (3)	0,70 (4)	786,66 (11)	0,39 (5)
793,19 (3)	1,63 (7)	793,48 (8)	0,87 (70)
794,58 (3)	3,28 (18)	—	—
—	—	796,05 (21)	0,27 (4)
806,10 (8)	0,97 (9)	—	—
808,892 (12)	5,45 (20)	808,89 (5)	7,3 (50)
813,09 (23)	0,28 (9)	813,07 (14)	0,44 (7)
—	—	818,35 (16)*	0,22 (6)
829,81 (14)	0,71 (7)	828,66 (9)*	0,33 (8)
832,25 (20)	0,51 (8)	832,06 (9)	0,90 (10)
835,18 (6)	1,24 (8)	—	—
—	—	837,39 (8)	1,20 (10)
839,24 (5)	1,06 (8)	—	—
842,97 (4)	1,43 (6)	842,78 (8)	2,00 (20)
—	—	849,93 (8)	0,84 (7)
—	—	854,30 (30)*	0,17 (4)
858,74 (11)	0,76 (7)	—	—
860,21 (3)	2,64 (19)	861,58 (8)	0,68 (7)
864,85 (11)	0,68 (26)	864,89 (20)*	0,51 (25)
—	—	864,90 (15)*	0,13 (5)

Presente Trabalho		Schneider <i>et al</i> [2]	
Energia(keV)	I γ (%)	Energia(keV)	I γ (%)
871,45 (6)	0,43 (9)	871,37 (7)	1,30 (10)
875,46 (14)	0,25 (9)	874,32 (25)	0,18 (40)
—	—	877,92 (28)*	0,08 (6)
886,54 (16)	0,21 (9)	886,63 (20)	0,21 (4)
892,94 (9)	0,28 (4)	893,30 (10)*	0,17 (4)
897,09 (22)	0,11 (3)	896,65 (14)	0,15 (5)
—	—	907,69 (14)	0,17 (3)
—	—	915,44 (19)	0,08 (4)
—	—	920,30 (21)	0,15 (6)
924,21 (10)	2,54 (16)	923,86 (6)	3,90 (30)
—	—	929,85 (35)	0,42 (5)
933,24 (4)	2,25 (20)	—	—
—	—	935,91 (13)	0,18 (3)
—	—	938,83 (12)	0,23 (3)
943,18 (21)	0,30 (13)	942,97 (17)	0,12 (4)
945,83 (14)	0,38 (15)	945,74 (8)	0,83 (7)
951,06 (18)	0,13 (7)	951,35 (20)*	0,10 (4)
952,61 (4)	0,39 (9)	951,85 (12)*	0,29 (10)
964,048 (19)	2,32 (8)	963,70 (10)	0,97 (10)
968,372 (8)	7,99 (12)	967,44 (10)	0,32 (4)
—	—	972,00 (20)	0,11 (3)
976,2 (3)	0,25 (10)	—	—
978,43 (21)	1,5 (4)	978,8 (5)*	0,60 (20)
979,52 (22)	1,2 (3)	978,99 (7)*	3,00 (40)
—	—	986,70 (17)	0,09 (2)
992,08 (27)	0,13 (8)	992,63 (11)	0,57 (6)
993,56 (21)	0,15 (9)	994,00 (20)*	0,15 (7)
1016,1 (3)	0,14 (5)	—	—
1020,99 (20)	0,63 (8)	1021,85 (22)*	0,10 (4)
1022,93 (4)	2,66 (18)	1022,79 (8)*	4,00 (30)
1027,6 (3)	0,12 (5)	1027,16 (11)	0,34 (6)

Presente Trabalho		Schneider <i>et al</i> [2]	
Energia(keV)	I γ (%)	Energia(keV)	I γ (%)
1031,40 (21)	0,28 (7)	1031,90 (20)*	0,17 (5)
1040,7 (4)	0,21 (7)	—	—
1042,36 (17)	0,43 (15)	1041,89 (9)	1,10 (10)
1051,34 (20)	0,15 (9)	1051,90 (20)*	0,17 (5)
1076,03 (5)	0,91 (3)	1075,97 (9)	0,80 (10)
1078,68 (23)	1,99 (3)	1078,77 (8)	2,44 (27)
1100,68 (3)	1,26 (26)	1100,78 (8)	1,90 (20)
1119,79 (5)	3,1 (18)	—	—
1124,62 (4)	4,2 (6)	1123,43 (18)	0,58 (9)
1125,40 (4)	2,6 (3)	1125,31 (15)	1,14 (14)
—	—	1126,6 (30)	0,12 (3)
—	—	1136,00 (20)*	0,12 (3)
—	—	1141,73 (15)*	0,10 (4)
—	—	1150,04 (13)	0,09 (3)
—	—	1156,30 (40)	0,04 (2)
1170,88 (19)	0,68 (9)	—	—
1172,76 (19)	1,41 (17)	1171,74 (18)	0,15 (3)
—	—	1175,84 (12)	0,13 (3)
1180,54 (26)	1,53 (11)	—	—
—	—	1190,07 (14)	0,09 (2)
1197,47 (19)	0,21 (4)	1197,87 (11)	0,26 (4)
1202,1 (5)	0,08 (4)	1202,20 (30)	0,06 (2)
1206,7 (3)	0,15 (6)	—	—
—	—	1225,64 (23)	0,06 (2)
1234,31 (5)	0,83 (8)	1234,15 (9)	1,00 (13)
1237,61 (3)	1,49 (9)	—	—
—	—	1239,46 (30)	0,07 (2)
1259,22 (5)	0,048 (22)	1259,64 (13)	0,16 (3)
1263,8 (5)	0,102 (23)	1264,05 (10)	0,29 (5)
1280,57 (6)	0,43 (3)	1280,28 (28)	0,04 (2)
—	—	1284,75 (20)	0,06 (2)

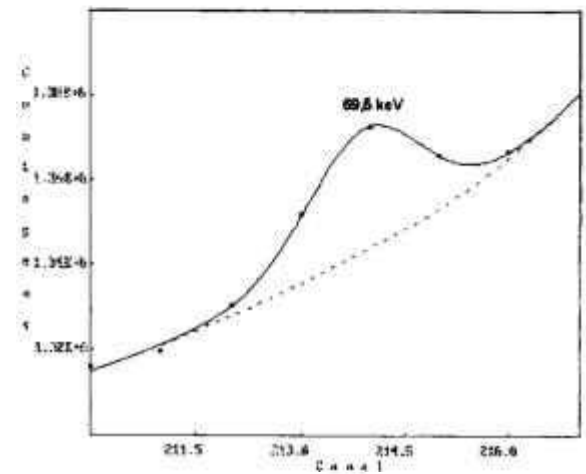
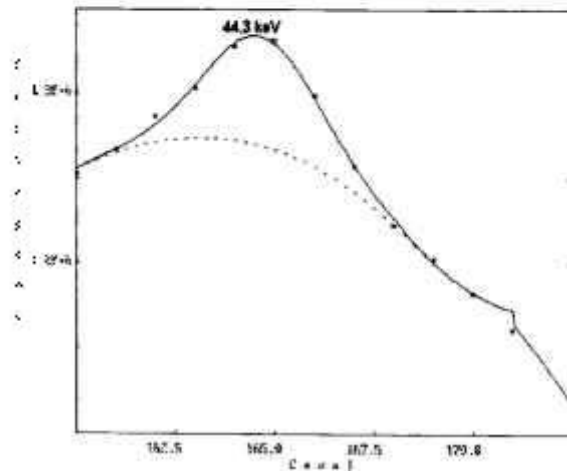
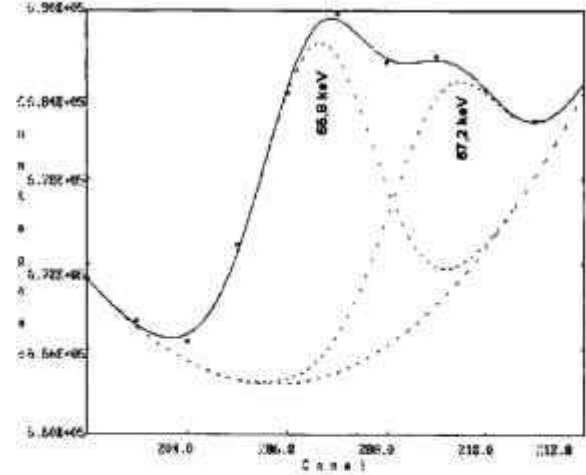
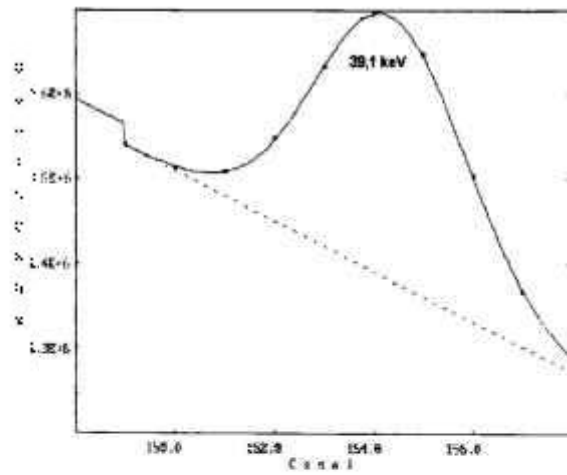
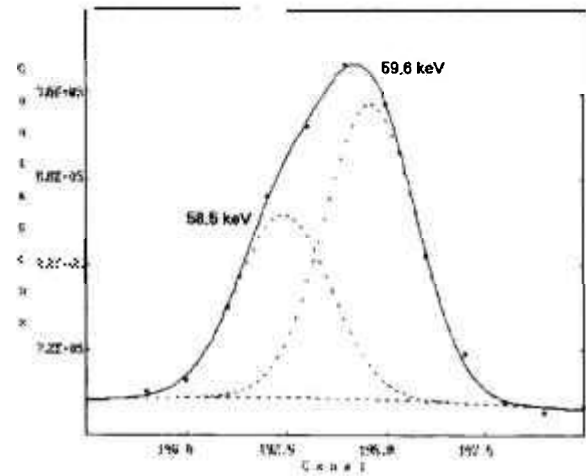
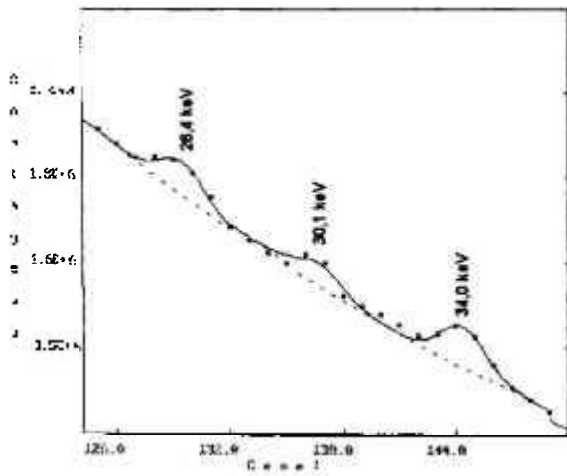
Presente Trabalho		Schneider <i>et al</i> [2]	
Energia(keV)	I γ (%)	Energia(keV)	I γ (%)
—	—	1290,18 (11)	0,16 (3)
1293,4 (4)	0,07 (3)	—	—
—	—	1298,12 (17)	0,03 (2)
—	—	1307,60 (30)*	0,04 (2)
—	—	1312,20 (12)	0,28 (4)
—	—	1357,36 (16)	0,08 (2)
1367,96 (13)	0,6 (5)	—	—
—	—	1381,33 (20)	0,08 (2)
1400,95 (9)	0,38 (4)	—	—
1407,26 (6)	0,58 (5)	—	—
1449,56 (3)	0,32 (6)	1448,13 (44)	0,02 (00)
—	—	1454,30 (21)	0,05 (2)
1495,36 (11)	0,27 (3)	1495,80 (34)	0,06 (2)
—	—	1568,61 (35)	0,02 (1)

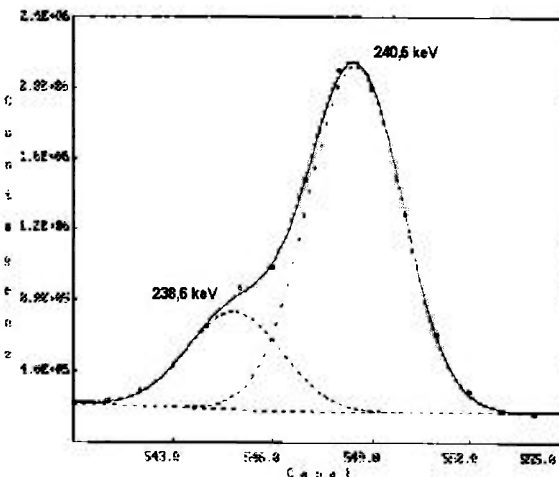
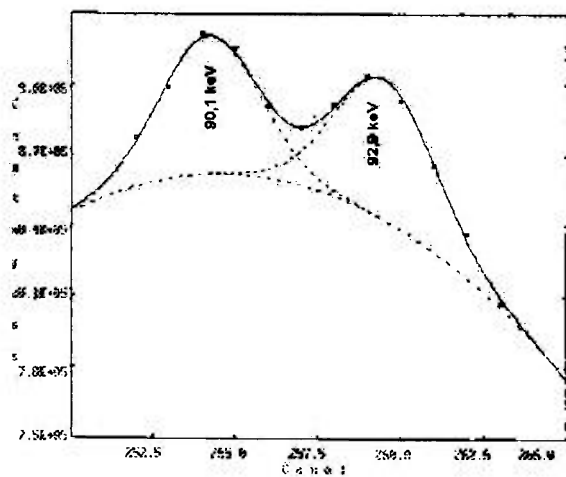
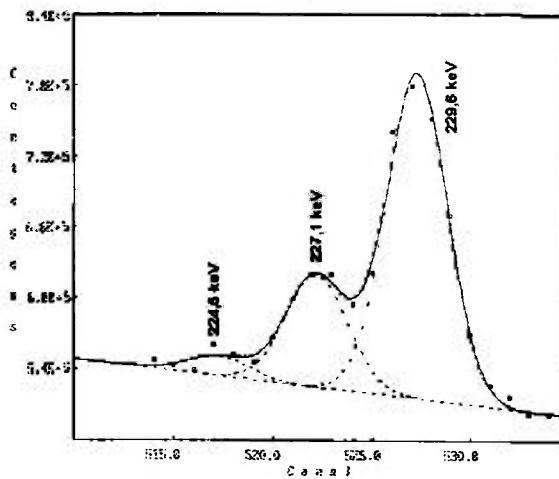
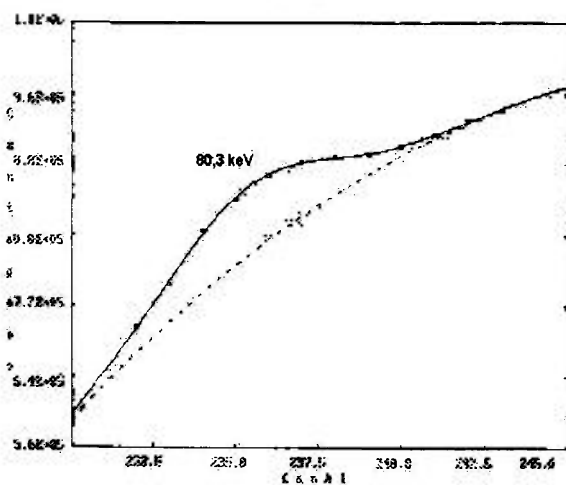
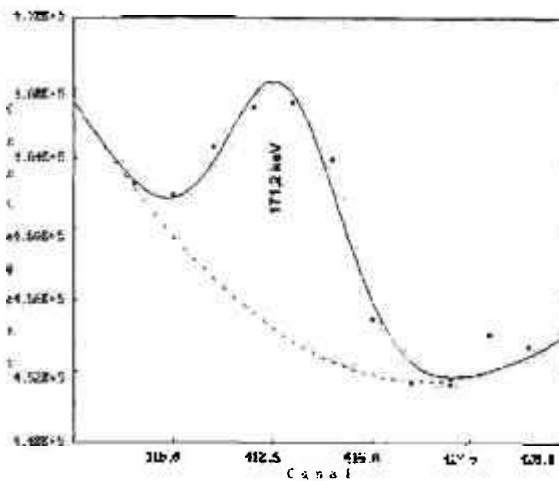
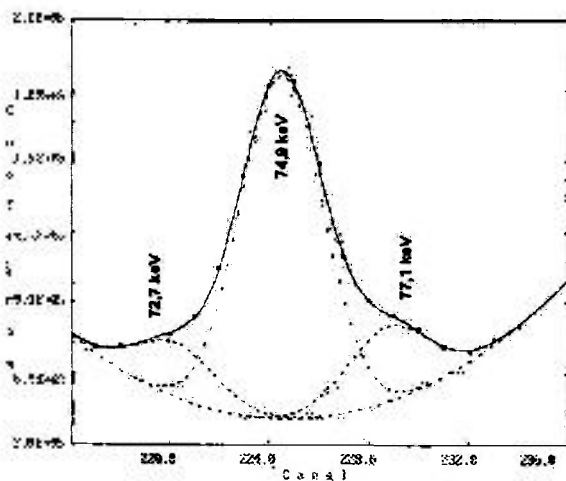
*transições γ deduzidas a partir das relações de coincidências por Schneider *et al*[2].

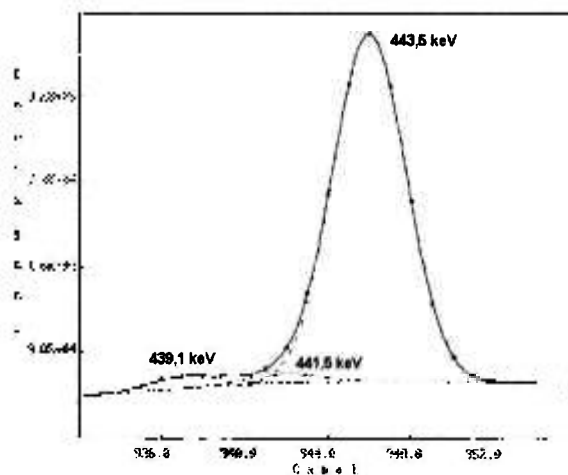
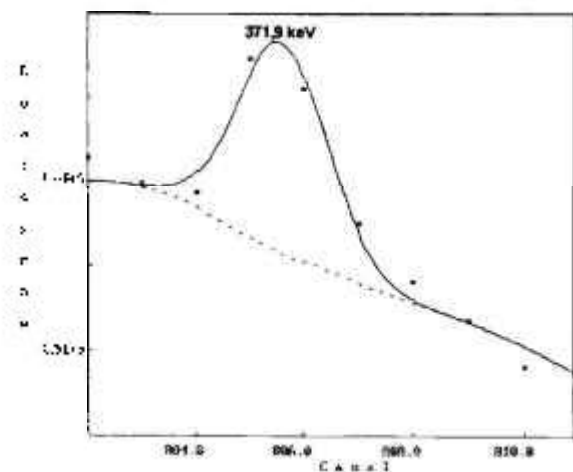
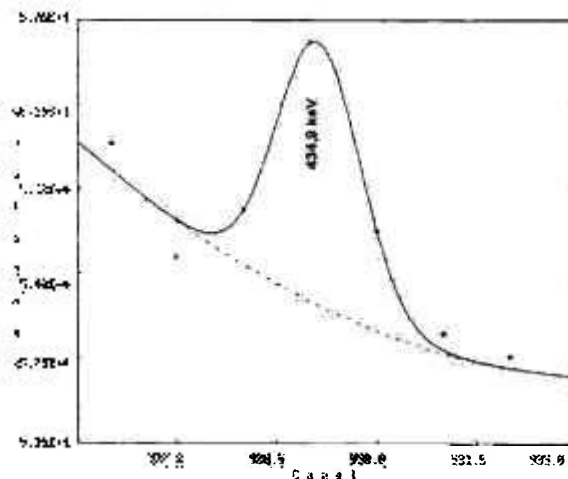
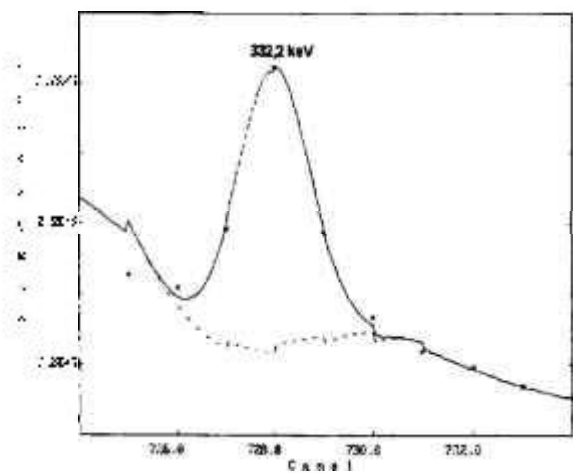
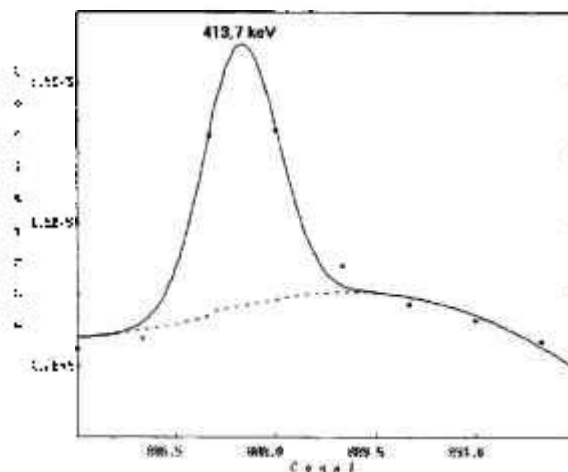
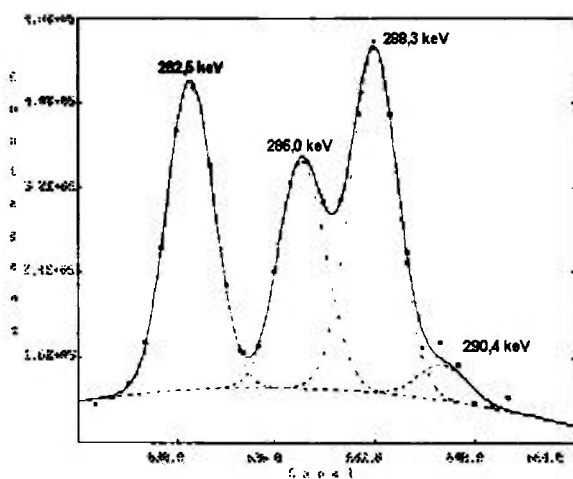
Os resultados obtidos por Schneider *et al.* [2] foram incluídos para comparação.

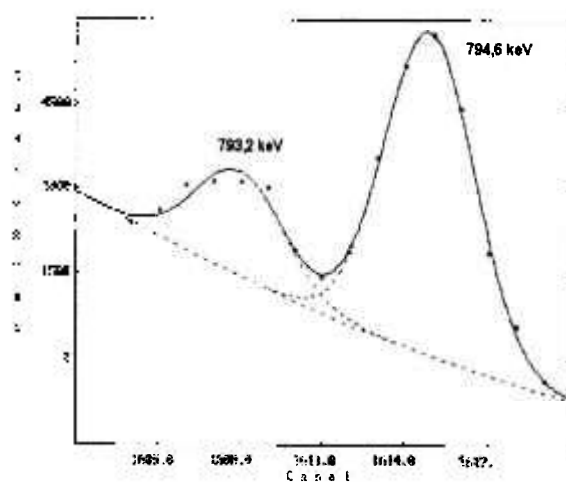
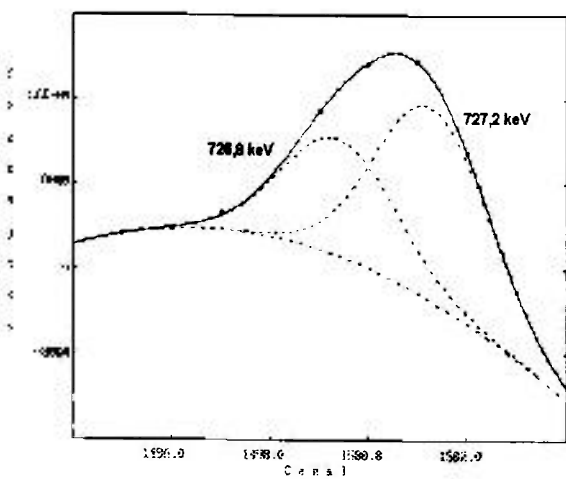
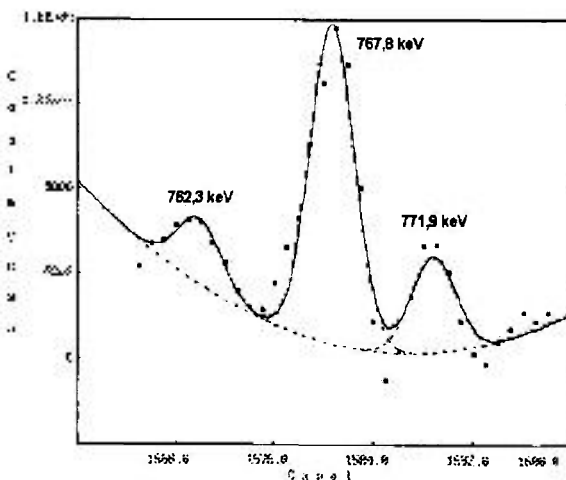
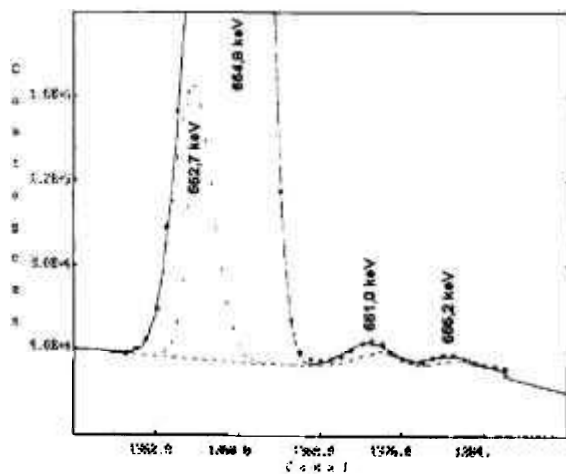
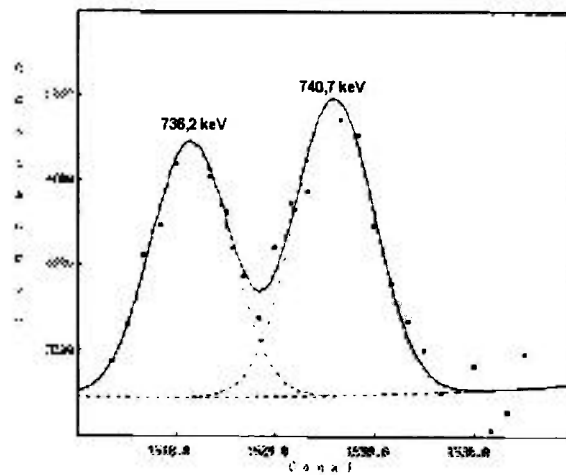
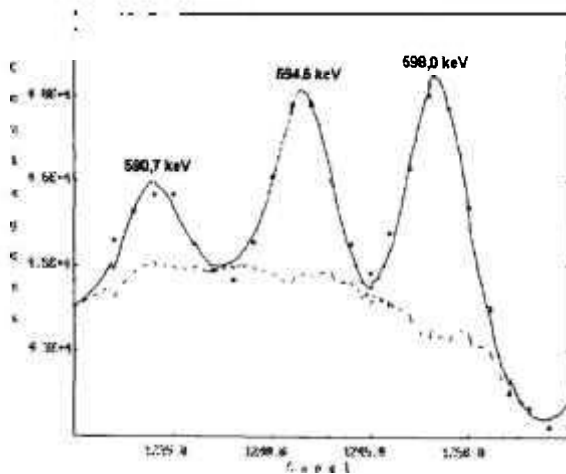
Para ilustrar, são apresentados na figura 1.4, os ajustes obtidos com o programa IDF[14], referentes as transições γ observadas pela primeira vez.

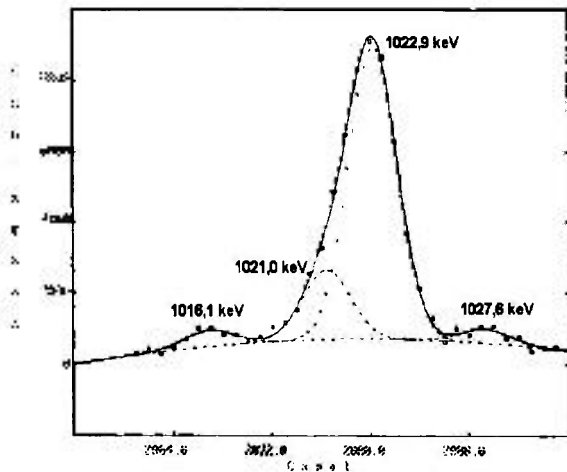
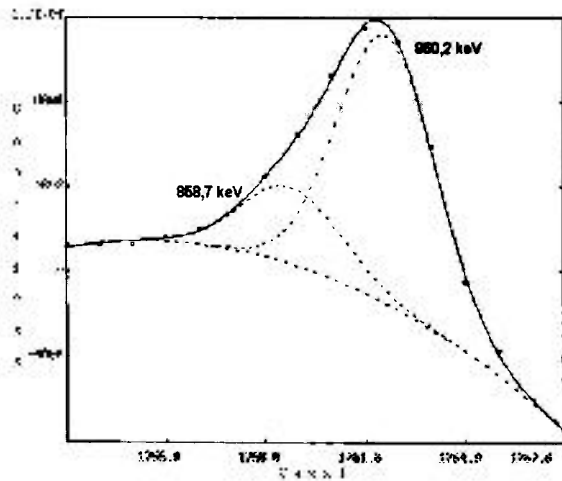
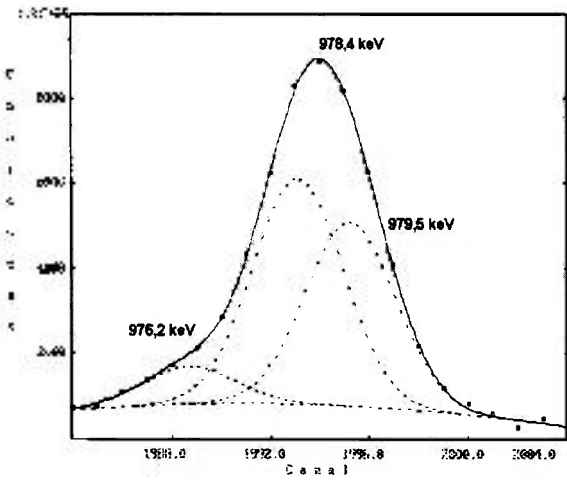
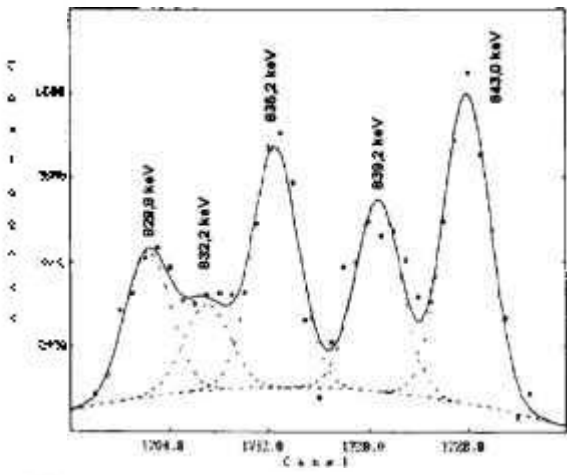
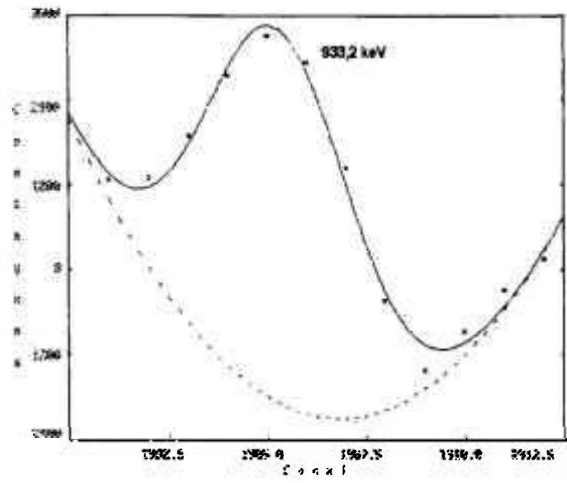
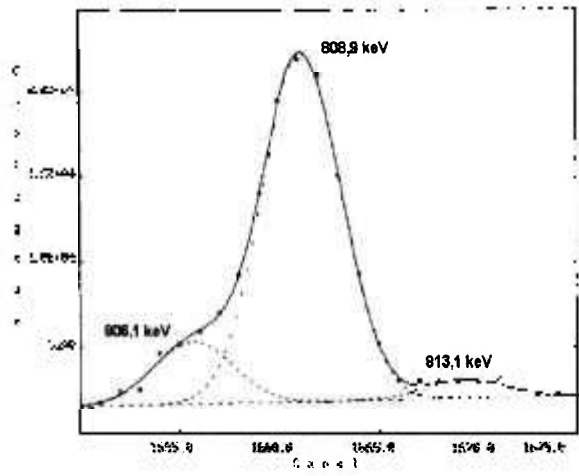
Figura 1.4: Ajustes obtidos com o programa IDF para as transições γ observadas pela primeira vez, a saber: 26,4; 34,0; 39,1; 44,3; 58,5; 67,2; 69,5; 72,7; 77,1; 80,3; 90,1; 92,9; 171,2; 224,5; 238,6; 290,4; 332,1; 371,9; 413,7; 434,9; 441,5; 590,7; 652,7; 665,2; 726,8; 736,2; 771,9; 794,6; 806,1; 835,2; 839,2; 858,7; 933,2; 976,2; 1016,1; 1040,7; 1119,8; 1170,9; 1180,5; 1206,7; 1237,6; 1293,4; 1367,9; 1400,9 e 1407,3keV.

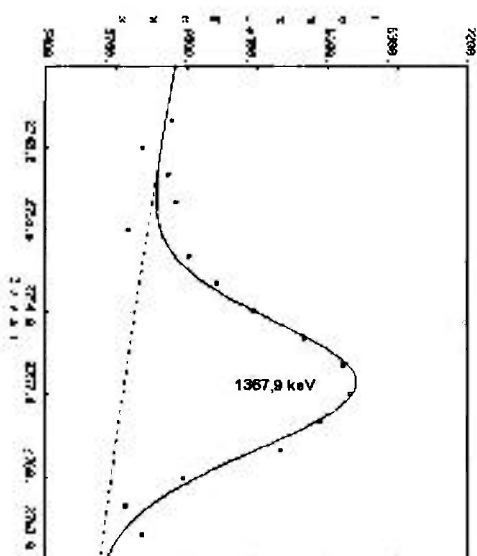
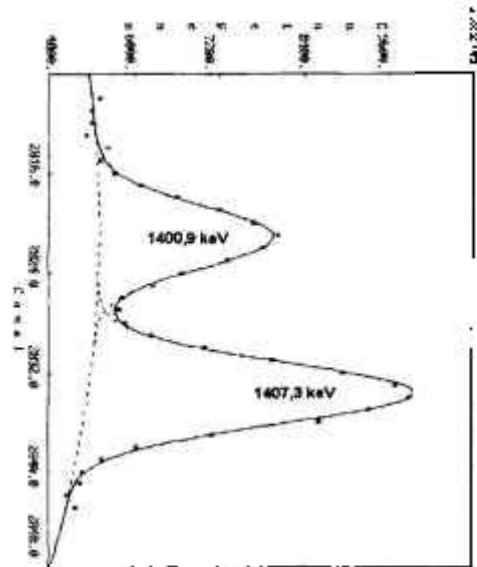
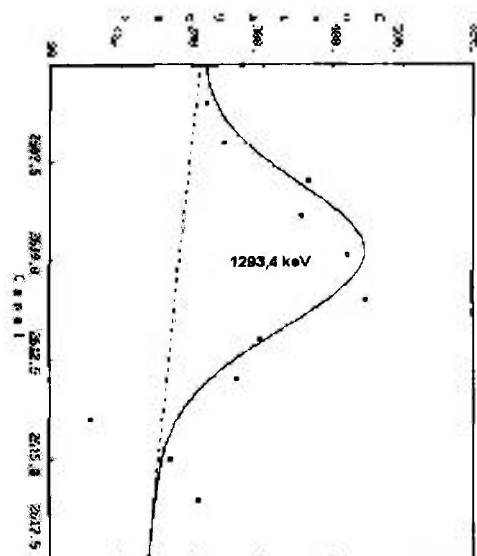












2 MEDIDAS DE COINCIDÊNCIA GAMA-GAMA

2.1 Introdução

O objetivo da medida de coincidência $\gamma\gamma$ é elucidar o esquema de decaimento beta do núcleo em estudo, pois possibilita confirmar as transições γ observadas no experimento de espectroscopia γ bem como identificar multipletos e posicionar as transições entre os níveis nucleares, a partir das relações de coincidências, além de fornecer subsídios para cálculo de alimentação beta e determinação da energia dos níveis excitados.

Diz-se que duas transições γ estão em coincidência quando são emitidas sucessivamente (em cascata) pelo mesmo núcleo. Essas emissões têm diferenças de tempo da ordem da meia-vida dos estados excitados envolvidos, geralmente muito menor que a resolução temporal dos sistemas de aquisição. A coincidência assim descrita é denominada coincidência real, em oposição à coincidência acidental, onde raios γ provenientes de núcleos distintos são detectados com uma diferença de tempo menor que o nível de discriminação do sistema de detecção.

2.2 Instrumentação e Procedimento Experimental

As medidas de coincidência $\gamma\gamma$ foram realizadas usando dois detetores de Ge de alta resolução em energia (FWHM <2,0 keV) acoplados a um sistema multidetecção descritos a seguir. As fontes radioativas de ^{149}Nd foram obtidas conforme descrito no item 1.3.1.

2.2.1 Espectrômetro de coincidência γ

O espectrômetro γ consiste de uma base com um eixo mecânico e duas mesas, uma móvel e outra fixa, que suportam os dois detetores: um de HPGe de 89cm^3 (fixo) e um Ge(Li) de 45cm^3 (móvel), utilizados na aquisição de dados. A mesa móvel, que suporta o detetor de Ge(Li), gira em torno de um eixo central, assumindo qualquer posição entre 90° e 270° . A fonte é posicionada nesse eixo de rotação, sendo a distância fonte-detetor de 6cm. As medidas foram realizadas em quatro ângulos (90° , 120° , 150° e 180°).

O esquema do espectrômetro pode ser visualizado na figura 2.1.

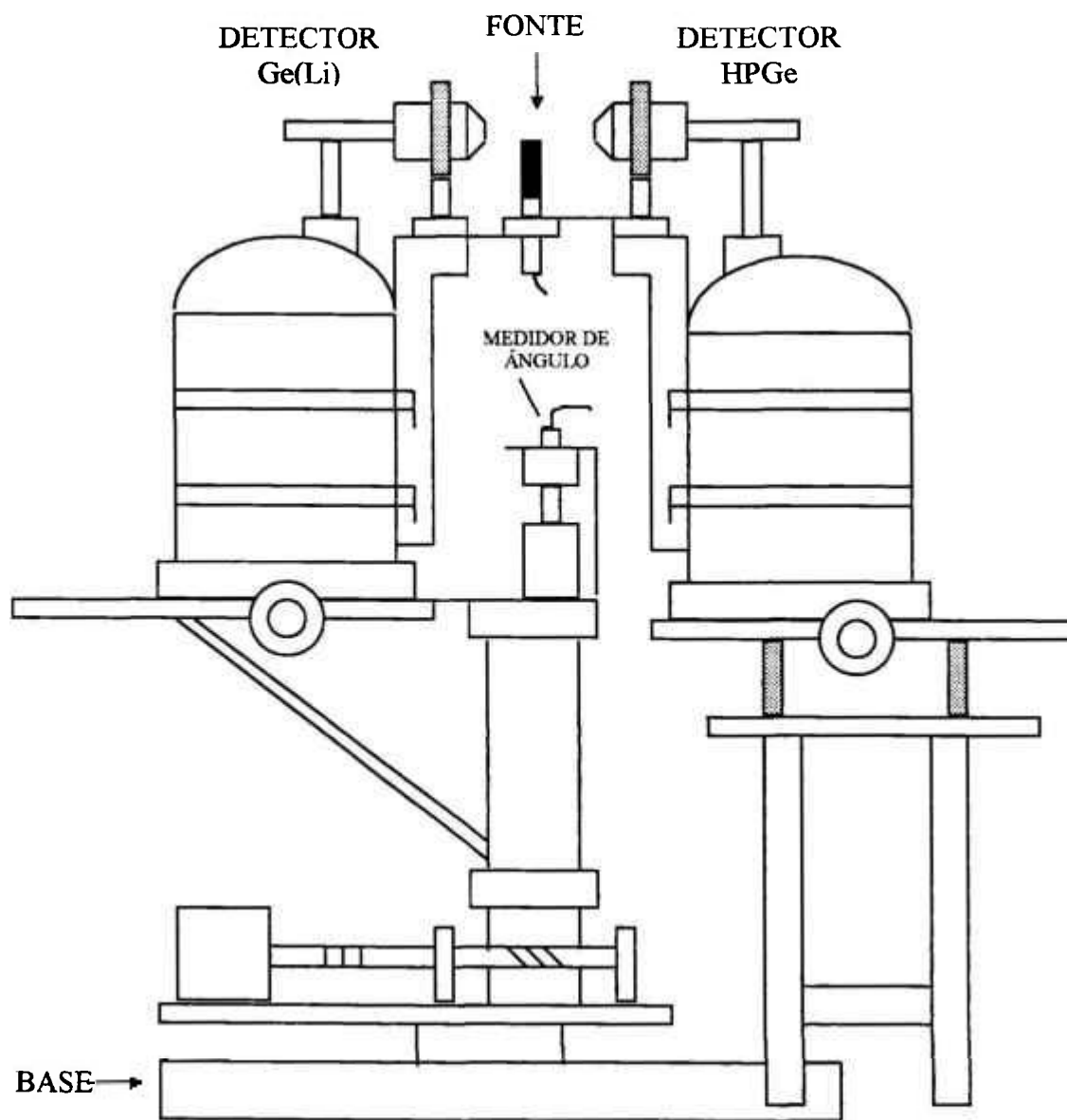


Figura 2.1: Esquema do Espectrômetro de Coincidência γ .

2.2.2 Eletrônica de coincidência $\gamma\gamma$

A eletrônica de coincidência $\gamma\gamma$ utilizada consiste de dois amplificadores lineares (AMP) ORTEC-572, dois amplificadores rápidos (FFA) ORTEC-579, dois discriminadores de fração constante (CFD) ORTEC-473A, dois conversores analógicos digitais (ADC) ORTEC-800, um conversor de diferença de tempo (TDC) LeCroy 2228A e um controlador multidetector [18]. Esses dois últimos módulos operam em padrão CAMAC, diferentemente dos outros que operam em padrão NIM.

De cada detetor são extraídos dois sinais, um sinal lento e o outro rápido. Os sinais lentos alimentam amplificadores lineares, e após receberem tratamento adequado alimentam os ADC. Do amplificador linear também são extraídos os sinais de OCUPADO e EMPILHAMENTO, que avisam o controlador multidetector toda vez que o amplificador está processando um pulso e toda vez que ocorre empilhamento de pulsos, respectivamente. O ADC trabalha em modo coincidência, portanto precisa receber um sinal de gate (lógico) coincidente com o sinal linear para processá-lo e fornecer a informação referente à energia do pulso. Já os sinais rápidos são processados por amplificadores rápidos e alimentam os CFD, que tem a função de marcar com precisão o tempo de sinais, emitindo um sinal lógico toda vez que receber um pulso. Esse sinal lógico alimenta o controlador multidetector. O controlador recebe os dois pulsos contendo informação de tempo dos dois detetores. Sua primeira tarefa é verificar se esses pulsos são coincidentes e para isso ele prolonga os sinais em 200ns e os soma. Se a soma desses sinais atingir o nível de discriminação, isto significa que os dois pulsos são coincidentes; verificada a existência da coincidência é enviado um sinal de GATE para o ADC. O primeiro dos dois pulsos que chega no controlador alimenta o TDC e dispara o START. O sinal de STOP é fornecido pelos dois pulsos após serem atrasados em 50ns. Dessa forma, tem-se a medida absoluta do tempo dos eventos em cada detetor. Essa informação do tempo é devolvida ao controlador pois este é responsável pela interface com o microcomputador no qual se faz a aquisição dos dados. O modulo ADC recebendo o pulso do amplificador linear e o gate do controlador, processa o pulso linear e envia a informação de energia do pulso para o controlador. Portanto, cada evento registrado deve conter a informação de energia e tempo das transições que chegaram nos dois detetores.

Um diagrama do arranjo eletrônico das medidas de coincidência pode ser observado na figura 2.2.

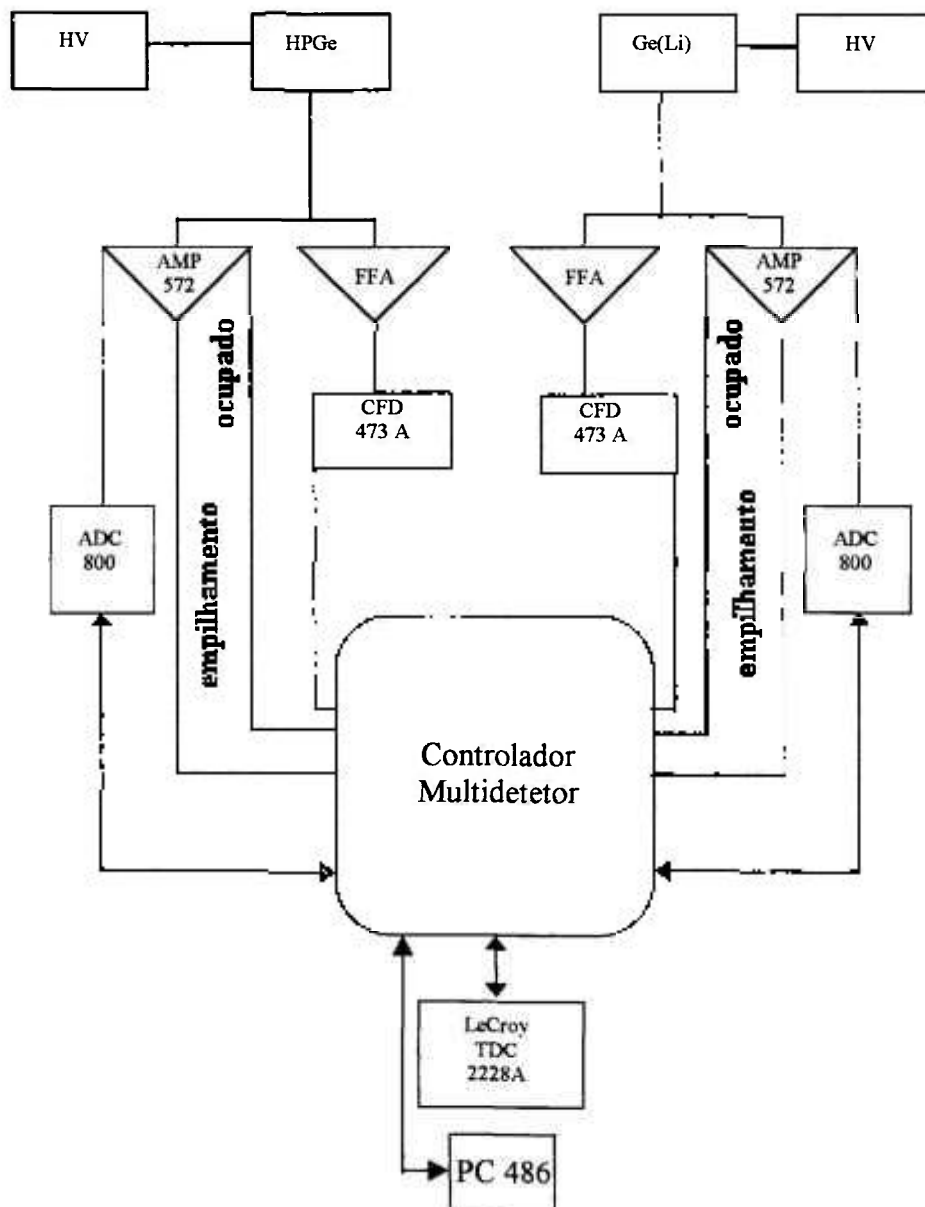


Figura 2.2: Diagrama de blocos do arranjo eletrônico das medidas de coincidência $\gamma\gamma$.

2.3 Análise de dados de coincidência $\gamma\gamma$

Os dados foram analisados utilizando-se o programa de ajuste BIDIM [18], desenvolvido no Laboratório do Acelerador Linear. Este programa destina-se a

visualização dos dados de medidas em coincidência e ajustes de picos bidimensionais pelo método dos mínimos quadrados.

Os dados obtidos nesta medida estão no modo fila, isto é, todas as coincidências observadas são registradas em um único arquivo na seguinte seqüência: energia registrada no primeiro detetor, energia registrada no segundo detetor, tempo registrado no primeiro detetor e tempo registrado no segundo detetor.

Quando o arquivo de dados está no modo fila, o programa possibilita selecionar um intervalo de tempo para filtrar os dados de entrada segundo a diferença de tempo entre os dois detetores. Este filtro é utilizado para selecionar eventos de coincidência nas regiões chamadas de reais ou de acidentais. Na prática os eventos de coincidências que são coletados podem ser reais ou acidentais.

Coincidências reais ocorrem com uma diferença de tempo menor que a resolução do sistema formando um pico, no histograma de diferença de tempo dado entre os dois detetores, isto é: $\Delta T = T_2 - T_1$, (figura 2.3), onde $\Delta T = 0$ é posicionada no centro do pico, com largura da ordem da resolução temporal do sistema, enquanto coincidências acidentais não tem preferência temporal, e portanto apresentam uma distribuição uniforme no histograma de tempo (representada pelas regiões vizinhas ao pico em tempo). Na prática, as coincidências reais são obtidas subtraindo coincidências acidentais das coincidências totais.

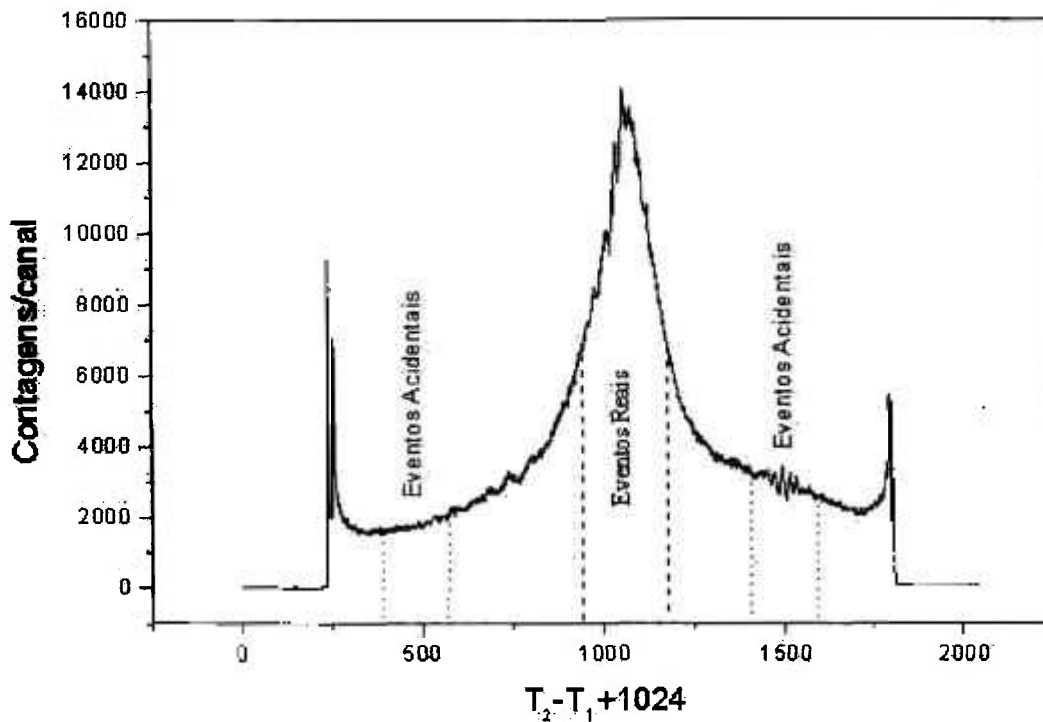


Figura 2.3: Histograma de tempo.

No programa BIDIM [18] os dados são visualizados em um histograma bidimensional onde cada um dos eixos (horizontal e vertical) corresponde a energia em cada um dos detetores, e as contagens em cada canal bidimensional são indicadas segundo um código de cores (no caso, tons de cinza e cor verde).

Os dados são histogramados em uma matriz de 256 colunas por 256 linhas. Para visualizar regiões maiores o programa agrupa as contagens de diversos canais em um mesmo canal bidimensional. É possível controlar independentemente estes agrupamentos para cada um dos dois detetores.

Na tela principal do programa BIDIM, figura 2.4, são apresentados os espectros unidimensionais das projeções das contagens ao longo de cada detetor (região 1 e 2), agrupados em 256 canais para cada detetor, segundo o mesmo critério de agrupamento escolhido pelo usuário para a matriz bidimensional. Para arquivos no modo fila é exibido também o histograma das diferenças de tempo entre os detetores (região 3).

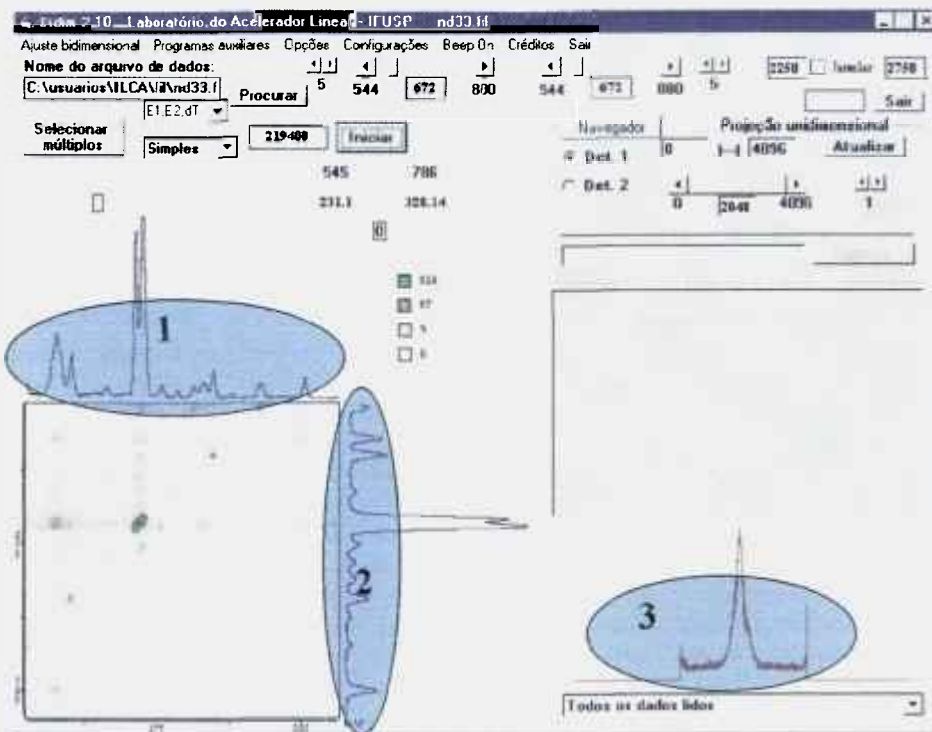


Figura 2.4: Tela principal do programa BIDIM.

2.3.1 Ajuste de picos bidimensionais

Para se efetuar um ajuste no programa BIDIM [18], aciona-se a janela principal (figura 2.3) e define-se a região de ajuste, isto é, indica-se as posições dos picos bidimensionais a serem ajustados. Opcionalmente, pode-se indicar também as estimativas de larguras a meia altura (FWHM) do pico bidimensional.

O cálculo da área do pico bidimensional é então efetuado pelo método dos mínimos quadrados linearizado, conhecido como Método de Gauss, com o uso do formalismo matricial, que corresponde a se ajustar em um processo iterativo os desvios dos parâmetros em relação às estimativas atuais de cada um deles.

Para ilustrar, na figura 2.5 é apresentado a tela referente a um ajuste, realizado com o programa BIDIM [18], para a região de energia envolvendo as coincidências entre as transições γ de 277 keV para o detetor 1 e de 270 keV para o detetor 2 e na figura 2.6 é apresentada a tela de resultado final deste ajuste, onde no canto superior esquerdo tem-se o espectro bidimensional dos dados experimentais, sendo os espectros bidimensionais

apresentados tanto no canto inferior à esquerda como no canto superior a direita. No canto inferior a direita é apresentado o mapa de resíduos dos canais envolvidos no ajuste.

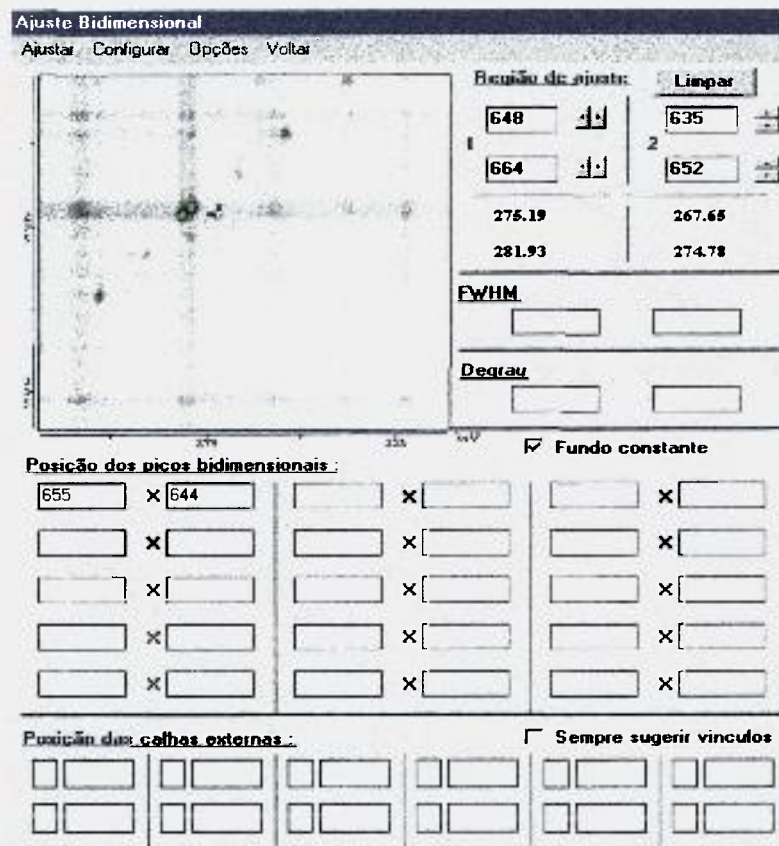


Figura 2.5. Tela de ajuste do programa BIDIM (exemplo).

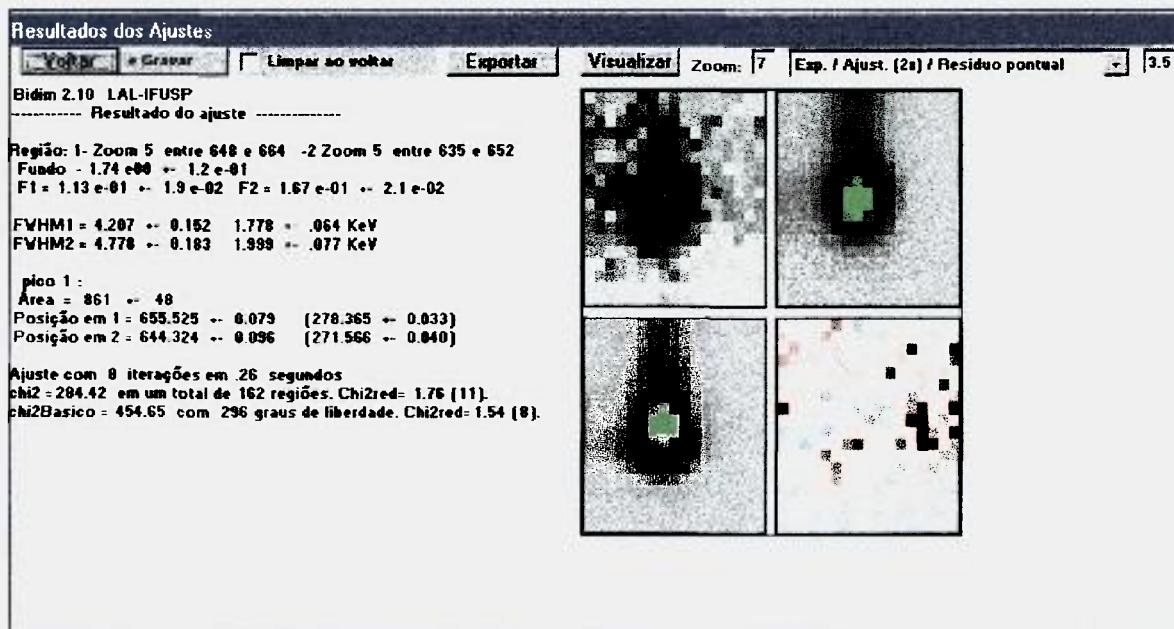


Figura 2.6 : Tela do resultado final do ajuste fornecido pelo programa BIDIM.

Na figura 2.7 é apresentado o espectro tridimensional (parcial) do ^{149}Pm na região que envolve as relações de coincidências entre: (277-270)keV, (290-270)keV, (290-230)keV.

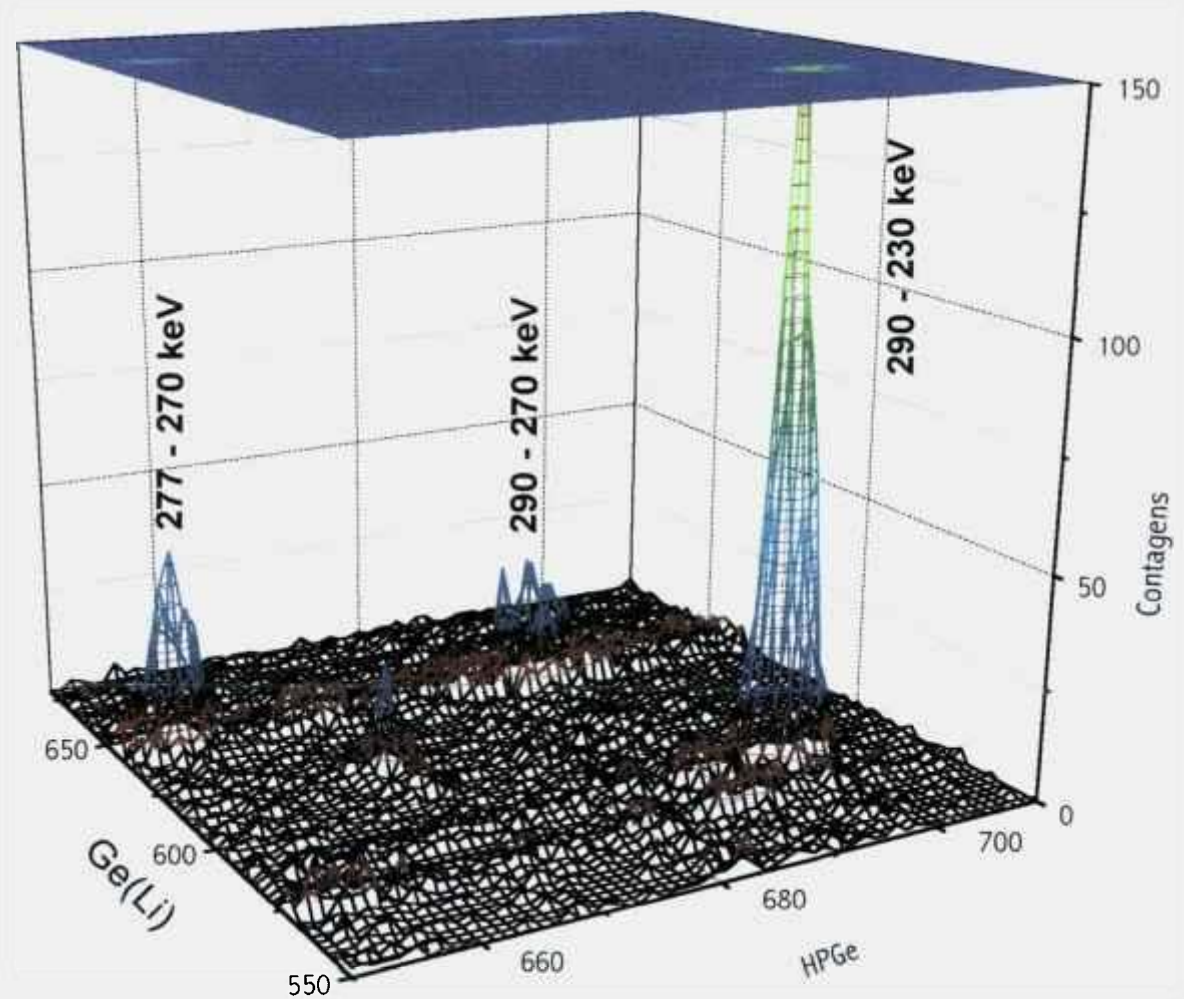


Figura 2.7: Espectro parcial tridimensional do ^{149}Pm .

2.4 Resultados

Um sumário dos resultados obtidos na medida de coincidência $\gamma\gamma$, referente ao intervalo de energia de 30keV a 1700keV é apresentado na tabela 2.1. A primeira coluna diz respeito à transição selecionada e a outra às coincidências observadas.

Tabela 2.1: Relações de coincidências das transições γ do decaimento β^- do ^{149}Nd observadas no intervalo de energia de 30 a 1700keV.

Energia(keV)	COINCIDÊNCIAS(keV)
39	80, 156, 199, 214
44	39, 156
60	39, 44, 192, 211, 270
67	156, 288, 541
69	97, 424
75	44, 114, 156, 189, 199, 208, 214, 241, 246, 258, 270, 283, 290, 385, 426, 541, 556, 655
97	60, 77, 114, 199, 214, 241, 268, 270, 290, 295, 556, 655
108	270, 277
114	60, 97, 123, 141, 156, 178, 189, 192, 199, 208, 214, 230, 245, 258, 276, 283, 301, 311, 327, 349, 426, 541, 556, 579, 583, 630, 636, 687, 696, 809, 830, 843, 979, 1023, 1042, 1125
123	39, 114, 227, 301
127	156, 258, 270
137	230
139	245
141	97, 114, 126, 185, 270
156	77, 114, 127, 258, 268, 277, 381, 385, 652, 687, 696
171	327
178	114, 246
186	258
189	75, 123, 214, 227, 258, 444, 557, 598, 696, 1124
192	60, 77, 97, 114, 270
197 + 199	60, 75, 97, 114, 156, 676
208	66, 75, 114, 255, 259, 348, 426, 583, 655
211	60, 75, 114, 230, 241, 255, 270, 327, 444, 533, 541, 557, 655, 696, 713, 979, 1023, 1079, 1101, 1238
214	67, 97, 114, 270, 424, 809
227	80, 123, 268, 290
230	76, 97, 114, 246, 268, 270, 290, 311, 426
241	230, 246, 270, 327, 352, 557
245	241, 444
246	211, 230, 241, 270, 295, 655

Energia(keV)	COINCIDÊNCIAS(keV)
251	211
255	114, 189, 208, 283, 583
258	208, 283, 655
268	211, 241, 270, 268, 655
270	211, 246, 270, 277, 352, 484, 498, 541, 540, 596, 655, 687, 696, 865, 875
277	211, 241, 270, 595, 687
283	255, 258
286	270, 681
288	636, 951
290	230, 270, 327, 343, 946
295	241, 246, 270, 655
301	331, 741, 981
311	230, 241, 343, 499, 655
327	211, 241, 270, 327, 494, 541, 655
343	211, 214
349	114, 208, 655
357	114, 199
362	156, 178
377	156, 208, 655
381	114, 211, 541, 584
385	156
391	484
397	141, 214, 230, 843, 893, 1016
424	494, 541, 655, 696
426	114, 156, 214, 230, 809, 865
442	515
444	211
449	188
480	270, 484
484	44, 75, 270, 480
494	114, 211, 270
498	114, 270, 311

Energia(keV)	COINCIDÊNCIAS(keV)
515	484
541	75, 114, 579, 655
557	75, 211, 655, 806
579	114, 655
583	60, 75, 114, 444, 541
598	114
630	114
636	114, 288
655	541, 579
676	114, 246
687	114, 270, 277
696	114, 270, 327, 349, 426
713	75, 114, 211
718	277
741	301
762	270
809	246, 288, 311, 426
859	547
865	211, 270, 311
871	270
893	397
946	290
951	246
994	270
964	114, 270
1023	114
1079	211
1101	114
1125	114

3 ESQUEMA DE NÍVEIS

Neste capítulo é descrito o procedimento para elaboração do esquema de níveis do decaimento β^- do núcleo de ^{149}Nd . Para esta etapa do trabalho foram utilizados os dados de Energia e Intensidade (Tabela 1.1) associados às transições γ , obtidos na medida de espectroscopia, as relações de coincidência (Tabela 2.1), obtidas na medida de coincidência $\gamma\gamma$, bem como informações referente ao posicionamento das transições γ .

Para a proposição de spin e paridade dos níveis além das informações extraídas do presente estudo (alimentação beta e valor $\log ft$ dos níveis) considerou-se também as regras de seleção dos decaimentos beta e gama e dados propostos por estudos anteriores envolvendo tanto o decaimento beta como dados de reações nucleares.

3.1 Cálculo da Energia dos níveis

Para obtenção do cálculo da energia dos níveis é necessário termos o conhecimento do posicionamento da transições γ no esquema do níveis. Para esta finalidade foi desenvolvido o programa Esquema [20]. Este programa auxilia a posicionar a transição γ entre dois níveis de energia quaisquer utilizando o critério de energia, definido por:

$$\frac{E_{\gamma} - |E_{ni} - E_{nf}|}{\sigma} < M \quad (3.1)$$

onde:

- M é o residuo da energia admitido para o posicionamento da transição entre dois níveis.
- E_{ni} e E_{nf} referem-se as energias dos níveis inicial e final.

- σ é desvio padrão: $\sigma = \left[\left(\sigma_{E_{\gamma}} \right)^2 + \left(\sigma_{E_{ni}} \right)^2 + \left(\sigma_{E_{nf}} \right)^2 \right]^{1/2}$ (3.2)

e $E_{\gamma} = \frac{E_{\gamma} + E_{\gamma}^2}{2mc^2}$, a energia da transição γ

Para todos os cálculos considera-se a energia de recuo, $\frac{E_\gamma^2}{2mc^2}$, pois para que haja conservação do momento o núcleo recua em direção oposta à do raio γ emitido, sendo m a massa do núcleo e c a velocidade da luz.

Desta forma, para realização destes cálculos é necessário fornecer como entrada de dados ao programa Esquema [20] as energias das transições γ , isto é, E_γ relacionados na tabela 1.1, bem como as energias dos níveis, E_n e os respectivos erros. Numa primeira etapa o programa calcula E_γ' e em seguida, para cada transição E_γ' e para cada par de níveis o programa testa o posicionamento seguindo o critério de energia. O erro admissível (resíduo em energia) e o posicionamento ou não de uma transição no esquema de níveis são opções oferecidas pelo programa.

Desta forma a aceitação do posicionamento deve levar em conta além do critério de energia, as relações de coincidências bem como as regras de seleção, isto é, não posicionar transições entre níveis com spin zero ou momento angular muito alto ($\Delta I \geq 4$).

O programa Esquema permite também a inclusão de níveis novos. Para tanto é necessário que haja pelo menos uma transição γ populando ou depopulando o nível sugerido, ou relações de coincidência que o envolvam.

Conhecendo-se o posicionamento das transições no esquema de decaimento é possível recalcular a energia associada aos níveis utilizando programa Ninja [20].

3.2 Intensidade de alimentação beta dos níveis

Para obtenção do valor da intensidade de alimentação dos níveis por via beta, I_β , utilizam-se os valores de intensidade associados as transições γ (Tabela 1.1), obtidos na medida de espectroscopia e os valores dos coeficientes de conversão interna, α , tabelados por Firestone [19].

$$I_\beta = \sum m_i I_\gamma (1 + \alpha) \quad (3.3)$$

onde:

I_γ é a intensidade da transição γ

α é o coeficiente de conversão interna

sendo que:

$m = 1$, se a transição é emitida pelo nível

$m = -1$, se a transição alimenta o nível

3.3 Cálculo do $\log ft$

Para determinação dos valores de $\log ft$ associados aos níveis de energia utiliza-se: o valor máximo da energia da partícula beta, $Q_{\beta^-} = 1691$ (3) keV, estabelecido na literatura [21], a energia dos níveis, a intensidade de alimentação beta e os valores de intensidade das transições γ , estabelecidos no presente estudo. A determinação deste parâmetro, juntamente com as regras de seleção do decaimento beta - gama [22] irão permitir a proposição de spin e paridade para os níveis excitados.

3.4 Resultados

A medida de espectroscopia γ simples e de coincidência $\gamma\gamma$ associada à análise estatística realizada possibilitaram posicionar 181 transições em 51 níveis de energia, apresentados na Tabela 3.1

Tabela 3.1: Energia (E_γ) e posicionamento das transições γ ($E_{ni} \rightarrow E_{nf}$) estabelecidas no presente estudo.

Energia da transição γ (keV)	Posicionamento Energia do Nível (keV)	
	E_{ni}	E_{nf}
30,077 (26)	270,2069 (15)	240,3946 (19)
59,652 (8)	270,2069 (15)	211,3624 (15)
65,792 (8)	462,349 (3)	396,8556 (23)
69,510 (21)	270,2069 (15)	211,3624 (15)
74,932 (4)	462,349 (3)	387,609 (4)
90,12 (5)	515,796 (4)	425,2798 (22)
96,3 (3)	654,9478 (23)	556,233 (4)
97,354 (17)	211,3624 (15)	114,3534 (15)
108,189 (14)	654,9478 (23)	547,076 (6)
114,066 (11)	114,3534 (15)	0

Energia da transição γ (keV)	Posicionamento	
	Energia do Nível (keV)	
	E_{ni}	E_{nf}
117,088 (8)	654,9478 (23)	537,9789 (20)
122,689 (8)	537,9789 (20)	415,559 (5)
126,513 (17)	396,8556 (23)	270,2069 (15)
137,288 (20)	425,2798 (22)	288,2274 (21)
139,357 (7)	654,9478 (23)	515,796 (4)
140,93 (5)	537,9789 (20)	396,8556 (23)
154,74 (6)	425,2798 (22)	270,2069 (15)
156,048 (3)	270,2069 (15)	114,3534 (15)
175,33 (8)	387,609 (4)	211,3624 (15)
177,905 (13)	537,9789 (20)	360,139 (5)
185,617 (9)	396,8556 (23)	211,3624 (15)
188,7832 (23)	188,6796 (17)	0
192,171 (3)	462,349 (3)	270,2069 (15)
197,75 (8)	556,233 (4)	360,139 (5)
199,066 (5)	387,609 (4)	188,6796 (17)
208,3210 (21)	396,8556 (23)	188,6796 (17)
211,4403 (20)	211,3624 (15)	0
213,9414 (20)	425,2798 (22)	211,3624 (15)
224,49 (6)	1181,18 (6)	956,83 (7)
227,072 (9)	415,559 (5)	188,6796 (17)
229,630 (3)	654,9478 (23)	425,2798 (22)
240,4660 (18)	240,3946 (19)	0
244,89 (15)	515,796 (4)	270,2069 (15)
245,847 (21)	360,139 (5)	114,3534 (15)
250,82 (3)	462,349 (3)	211,3624 (15)
254,783 (15)	651,132 (6)	396,8556 (23)
258,144 (3)	654,9478 (23)	396,8556 (23)
267,7873 (16)	537,9789 (20)	270,2069 (15)
270,2449 (16)	270,2069 (15)	0

Energia da transição γ (keV)	Posicionamento	
	Energia do Nível (keV)	
	E_{ni}	E_{nf}
275,469 (5)	515,796 (4)	240,3946 (19)
276,89 (8)	547,076 (6)	270,2069 (15)
281,958 (14)	744,575 (6)	462,349 (3)
282,5292 (25)	396,8556 (23)	114,3534 (15)
286,034 (4)	556,233 (4)	270,2069 (15)
288,2516 (25)	288,2274 (21)	0
290,374 (20)	651,132 (6)	360,139 (5)
294,969 (7)	654,9478 (23)	360,139 (5)
301,097 (9)	415,559 (5)	114,3534 (15)
311,059 (3)	425,2798 (22)	114,3534 (15)
318,02 (12)	556,233 (4)	240,3946 (19)
326,6331 (17)	537,9789 (20)	211,3624 (15)
332,167 (18)	1363,85 (4)	1031,75 (4)
343,12 (5)	767,482 (12)	425,2798 (22)
347,654 (19)	744,575 (6)	396,8556 (23)
349,365 (4)	537,9789 (20)	188,6796 (17)
357,111 (22)	744,575 (6)	387,609 (4)
359,889 (20)	360,139 (5)	0
361,76 (3)	721,929 (26)	360,139 (5)
366,682 (3)	654,9478 (23)	288,2274 (21)
371,92 (6)	1328,79 (9)	956,83 (7)
376,69 (10)	1031,75 (4)	654,9478 (23)
380,962 (22)	651,132 (6)	270,2069 (15)
384,703 (4)	654,9478 (23)	270,2069 (15)
390,65 (16)	1141,67 (4)	750,491 (15)
396,878 (12)	396,8556 (23)	0
413,693 (15)	1049,655 (24)	635,983 (25)
423,5600 (20)	537,9789 (20)	114,3534 (15)
425,86 (11)	425,2798 (22)	0

Energia da transição γ (keV)	Posicionamento Energia do Nível (keV)	
	E_{ni}	E_{nf}
432,76 (7)	547,076 (6)	114,3534 (15)
434,90 (7)	1156,971 (8)	721,929 (26)
439,11 (7)	651,132 (6)	211,3624 (15)
441,47 (13)	956,83 (7)	515,796 (5)
443,550 (3)	654,9478 (23)	211,3624 (15)
448,82 (9)	635,983 (25)	188,6796 (17)
462,354 (9)	651,132 (6)	188,6796 (17)
469,706 (20)	758,075 (19)	288,2274 (21)
480,48 (3)	750,491 (15)	270,2069 (15)
483,713 (18)	1234,242 (6)	750,491 (15)
493,87 (15)	1031,75 (4)	537,9789 (20)
498,06 (7)	767,482 (12)	270,2069 (15)
499,44 (13)	924,05 (21)	425,2798 (22)
515,26 (19)	515,796 (4)	0
527,2 (3)	942,505 (20)	415,559 (5)
533,130 (17)	744,575 (6)	211,3624 (15)
540,513 (26)	654,9478 (23)	114,3534 (15)
546,22 (24)	547,076 (6)	0
548,7 (4)	758,075 (19)	211,3624 (15)
555,77 (3)	744,575 (6)	188,6796 (17)
556,71 (4)	767,482 (12)	211,3624 (15)
567,32 (14)	1312,506 (20)	744,575 (6)
579,17 (5)	1234,242 (6)	654,9478 (23)
582,144 (21)	942,505 (20)	360,139 (5)
583,055 (13)	1234,242 (6)	651,132 (6)
590,74 (17)	1312,506 (20)	721,929 (26)
594,54 (5)	1141,67 (4)	547,076 (6)
598,01 (4)	785,860 (26)	188,6796 (17)
630,225 (9)	744,575 (6)	114,3534 (15)

Energia da transição γ (keV)	Posicionamento	
	Energia do Nível (keV)	
	E_{ni}	E_{nf}
634,87 (5)	750,491 (15)	114,3534 (15)
635,97 (4)	635,983 (25)	0
652,744 (7)	1190,728 (7)	537,9789 (20)
654,838 (3)	654,9478 (23)	0
660,97 (3)	1411,89 (3)	750,491 (15)
665,22 (7)	1181,18 (6)	515,796 (4)
674,38 (14)	885,82 (14)	211,3624 (15)
676,17 (9)	1234,242 (6)	556,233 (4)
681,47 (15)	1239,75 (3)	556,233 (4)
686,905 (16)	1234,242 (6)	547,076 (6)
696,191 (9)	1234,242 (6)	537,9789 (20)
712,542 (19)	924,05 (21)	211,3624 (15)
718,44 (4)	1234,242 (6)	515,796 (4)
726,822 (12)	1264,28 (5)	537,9789 (20)
727,23 (3)	1190,728 (7)	462,349 (3)
736,18 (11)	924,05 (21)	188,6796 (17)
740,66 (7)	1156,971 (8)	415,559 (5)
750,15 (14)	750,491 (15)	0
754,43 (5)	942,505 (20)	188,6796 (17)
759,13 (8)	758,075 (19)	0
762,27 (6)	1031,75 (4)	270,2069 (15)
767,793 (13)	767,482 (12)	0
771,91 (4)	1234,242 (6)	462,349 (3)
775,97 (15)	1411,89 (3)	635,983 (25)
781,32 (10)	1141,67 (4)	360,139 (5)
785,20 (3)	785,860 (26)	0
793,19 (3)	1190,728 (7)	396,8556 (23)
794,58 (3)	1156,971 (8)	360,139 (5)
806,10 (8)	1363,85 (4)	556,233 (4)

Energia da transição γ (keV)	Posicionamento Energia do Nível (keV)	
	E_{ni}	E_{nf}
808,892 (12)	1234,242 (6)	425,2798 (22)
813,09 (23)	1328,79 (9)	515,796 (4)
829,81 (14)	942,505 (20)	114,3534 (15)
832,25 (20)	1043,69 (20)	211,3624 (15)
835,18 (6)	1391,691 (6)	556,233 (4)
839,24 (5)	1049,655 (24)	211,3624 (15)
842,97 (4)	1239,75 (3)	396,8556 (23)
858,74 (11)	1406,88 (6)	547,076 (6)
860,21 (3)	1049,655 (24)	189,9688
864,85 (11)	129085 (22)	425,2798 (22)
871,45 (6)	1141,67 (4)	270,2069 (15)
875,46 (14)	1234,242 (6)	360,139 (5)
886,54 (16)	1312,506 (20)	425,2798 (22)
892,94 (9)	129085 (22)	396,8556 (23)
897,09 (22)	1312,506 (20)	415,559 (5)
924,21 (10)	924,05 (21)	0
943,18 (21)	942,505 (20)	0
945,83 (14)	1234,242 (6)	288,2274 (21)
951,06 (18)	1239,75 (3)	288,2274 (21)
952,61 (4)	1312,506 (20)	360,139 (5)
964,048 (19)	1234,242 (6)	270,2069 (15)
968,372 (8)	1156,971 (8)	188,6796 (17)
976,2 (3)	1363,85 (4)	387,609 (4)
978,43 (21)	1391,691 (6)	415,559 (5)
979,52 (22)	1190,728 (7)	211,3624 (15)
992,1 (3)	1181,18 (6)	188,6796 (17)
993,56 (21)	1264,28 (5)	270,2069 (15)
1016,1 (3)	1411,89 (3)	396,8556 (23)
1020,99 (20)	1568,63 (6)	547,076 (6)

Energia da transição γ (keV)	Posicionamento	
	Energia do Nível (keV)	
	E_{ni}	E_{nf}
1022,93 (4)	1234,242 (6)	211,3624 (15)
1027,6 (3)	1141,67 (4)	114,3534 (15)
1031,75 (4)	1031,75 (4)	0
1040,7 (4)	1156,971 (8)	114,3534 (15)
1042,36 (17)	1312,506 (20)	270,2069 (15)
1051,34 (20)	1411,89 (3)	360,139 (5)
1078,68 (23)	129085 (22)	211,3624 (15)
1100,68 (3)	1312,506 (20)	211,3624 (15)
1119,79 (5)	1234,242 (6)	114,3534 (15)
1124,62 (4)	1312,506 (20)	188,6796 (17)
1125,40 (4)	1239,75 (3)	114,3534 (15)
1170,88 (19)	1568,63 (6)	396,8556 (23)
1172,76 (7)	1411,891 (32)	240,3946 (19)
1180,54 (26)	1181,18 (6)	0
1197,47 (19)	1312,506 (20)	114,3534 (15)
1202,1 (5)	1495,19 (11)	288,2274 (21)
1206,7 (3)	1495,19 (11)	288,2274 (21)
1234,31 (5)	1234,242 (6)	0
1237,61 (4)	1449,250 (23)	211,3624 (15)
1259,22 (5)	1449,250 (23)	188,6796 (17)
1263,8 (5)	1264,28 (5)	0
1280,6 (6)	1568,63 (6)	288,2274 (21)
1293,4 (4)	1293,4 (4)	0
1367,96 (13)	1367,91 (13)	0
1407,26 (6)	1406,88 (6)	0
1449,56 (3)	1449,250 (23)	0
1495,36 (11)	1495,19 (11)	0

O esquema de níveis do núcleo ^{149}Nd proposto neste estudo é apresentado na Figura 3.1. Para comparação, na Figura 3.2 é apresentado o esquema proposto pela compilação feita por Firestone [19].

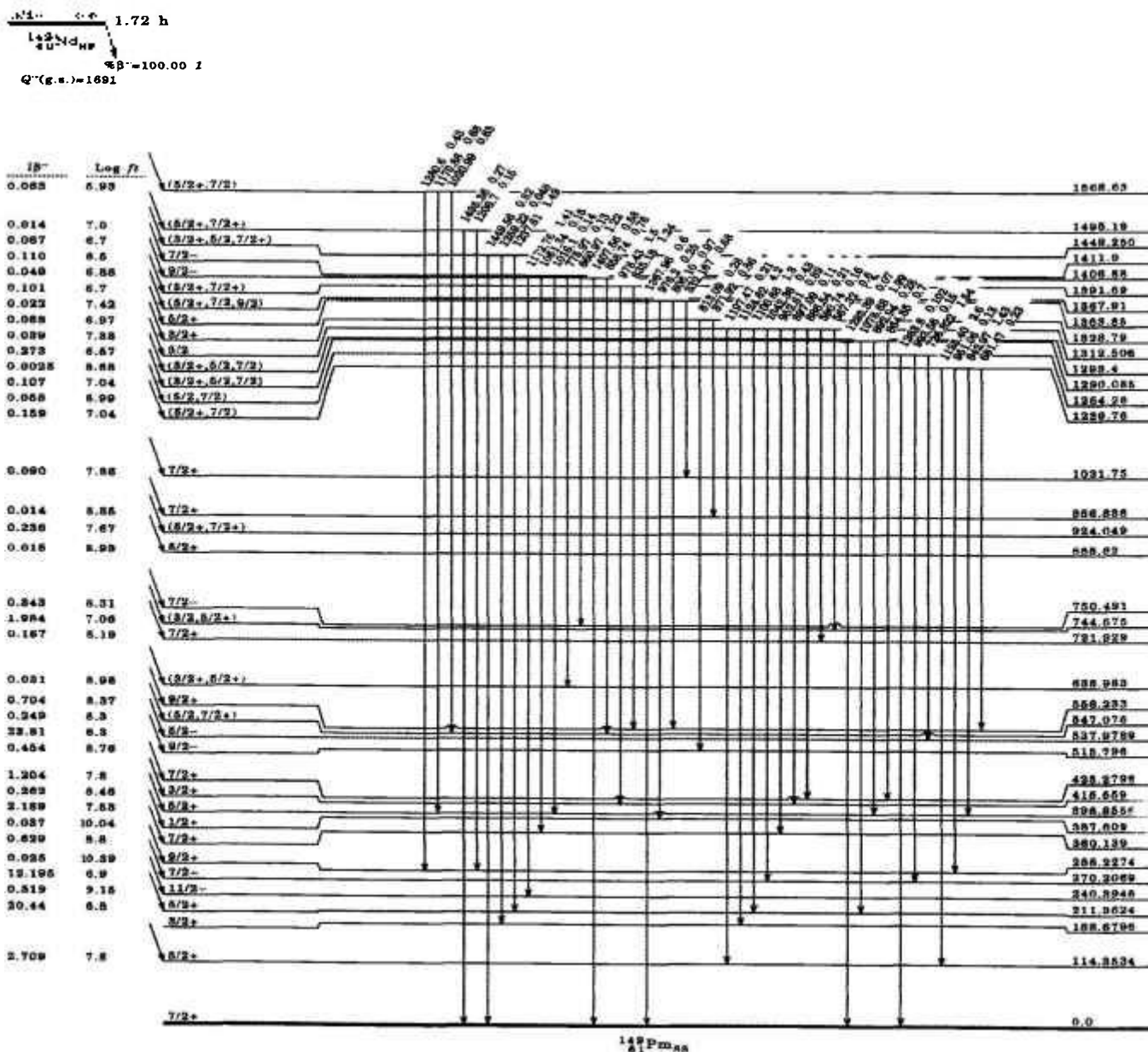


Figura 3.1 a: Esquema de decaimento do ^{149}Nd proposto neste estudo.

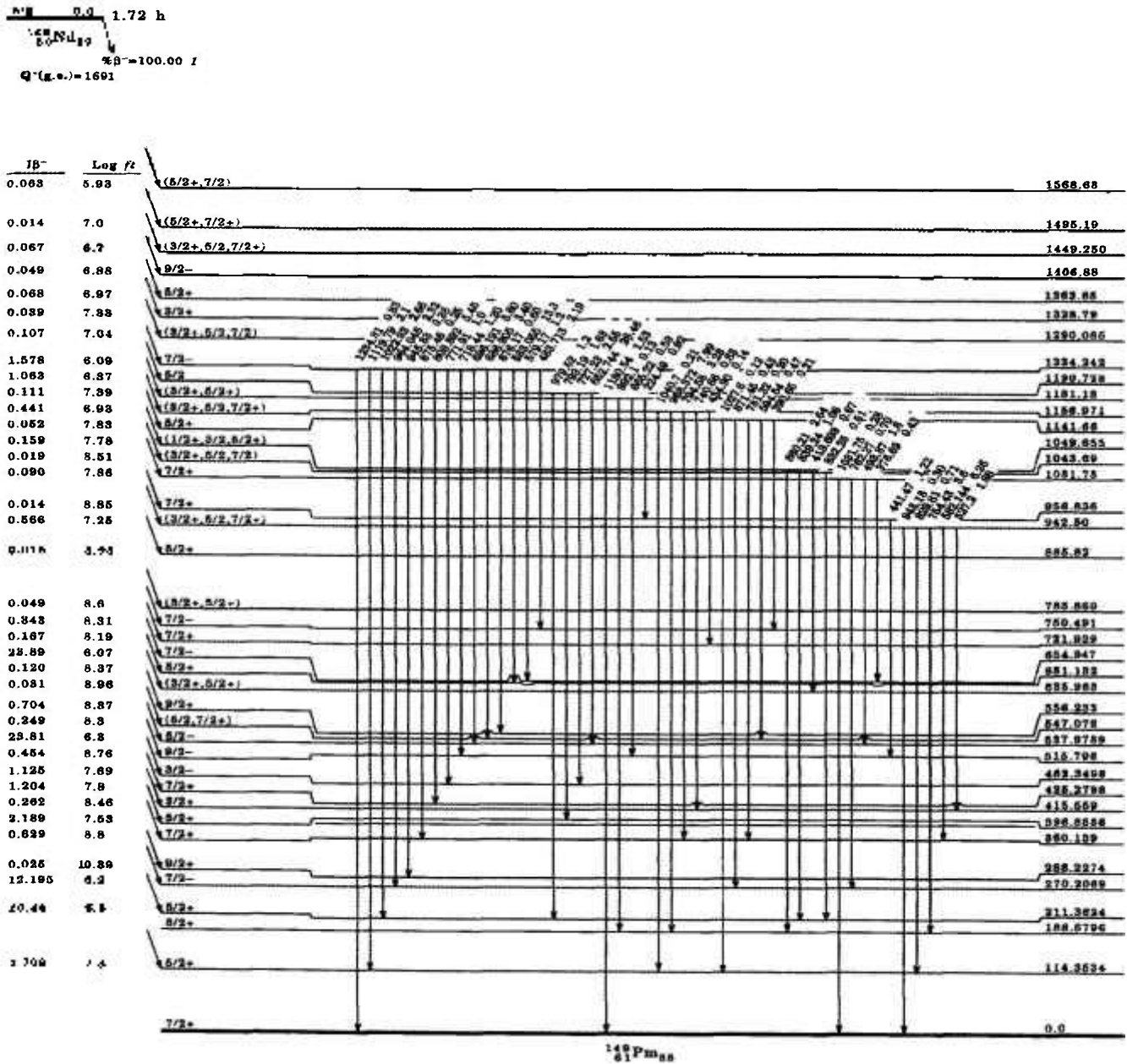


Figura 3.1 b: Esquema de decaimento do ^{149}Nd proposto neste estudo.

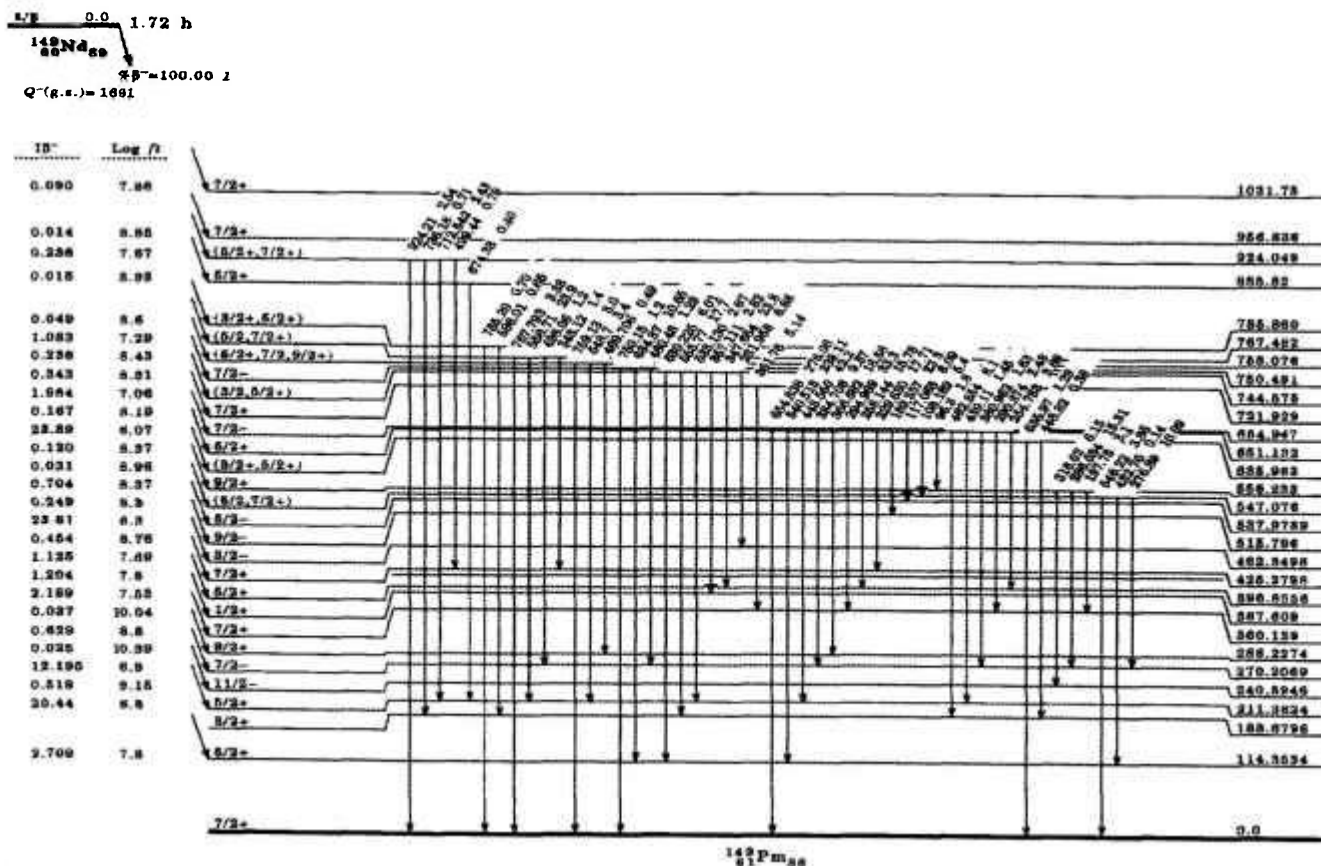


Figura 3.1 c: Esquema de decaimento do ^{149}Nd proposto neste estudo.

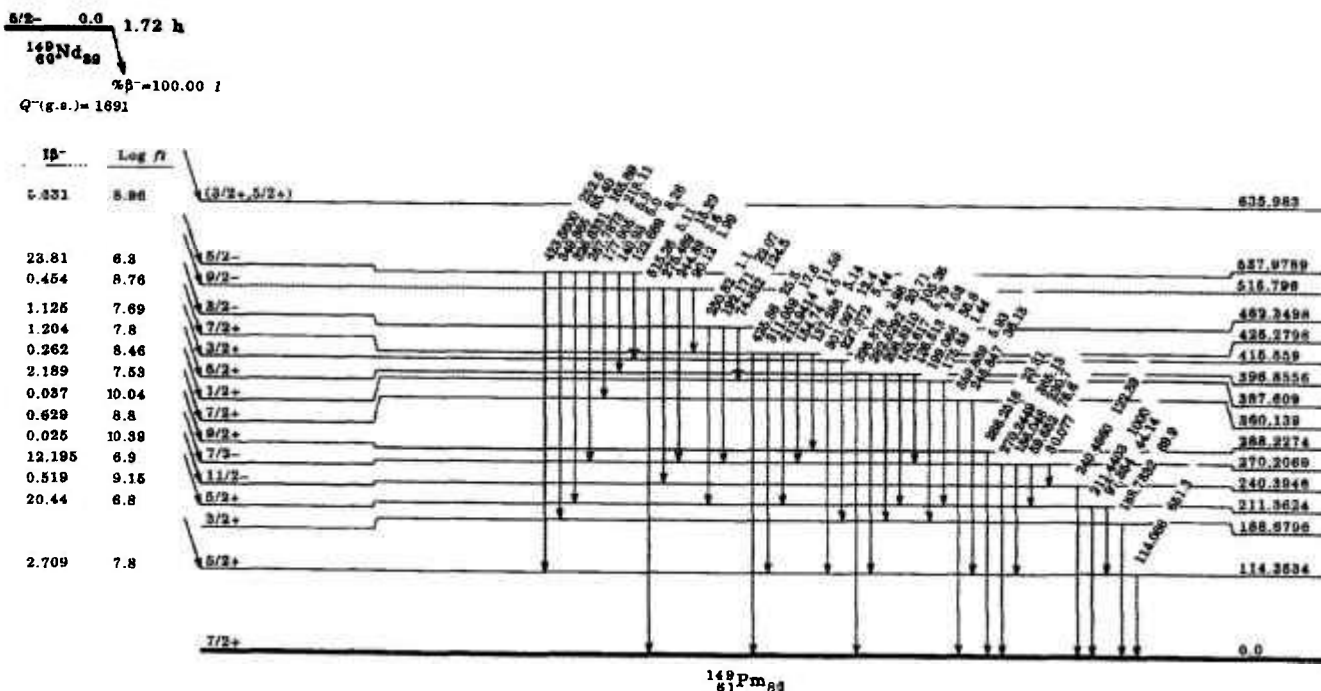


Figura 3.1 d: Esquema de decaimento do ^{149}Nd proposto neste estudo.

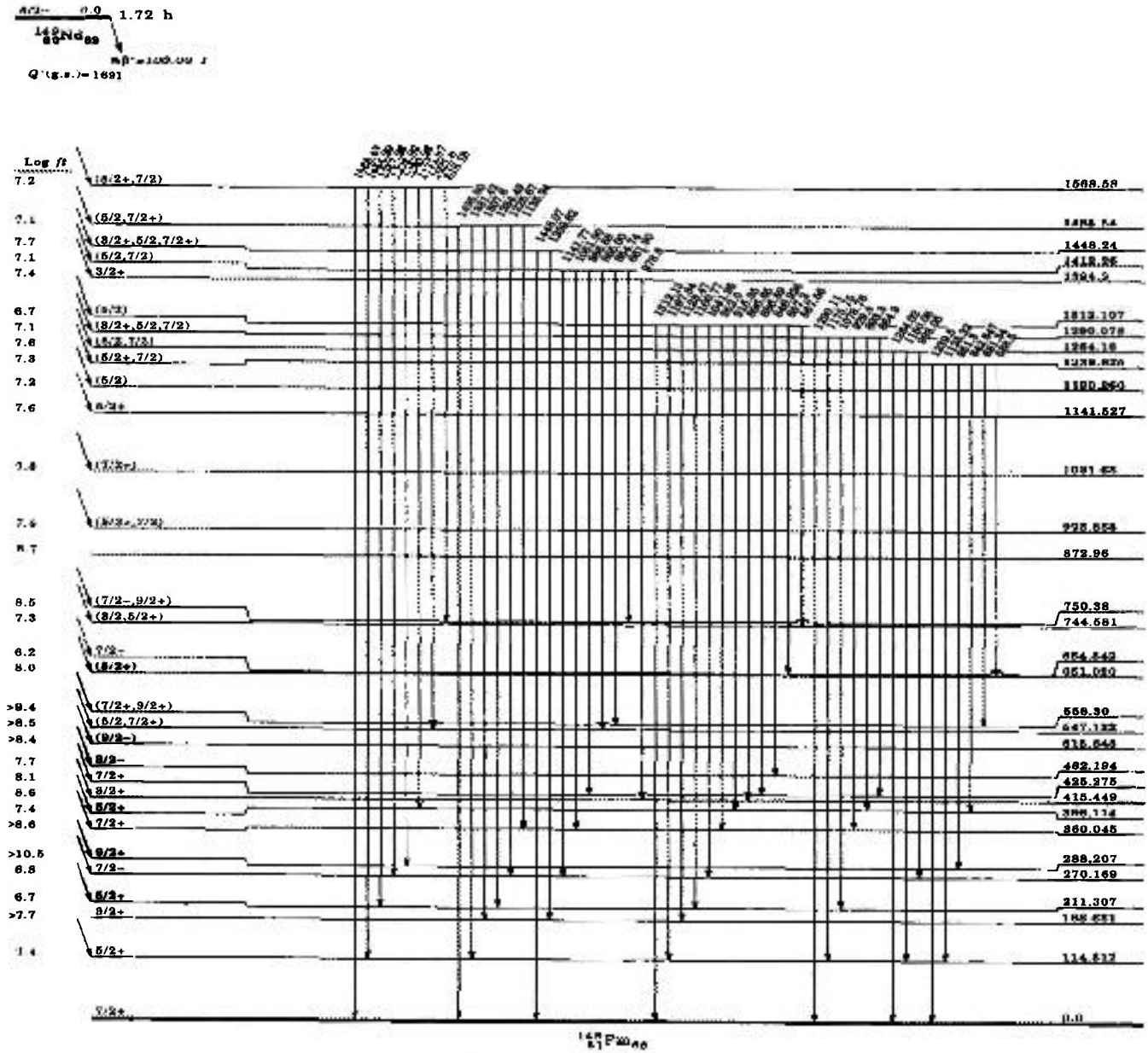


Figura 3.2 a: Esquema de decaimento do ^{149}Nd proposto por Firestone [19].

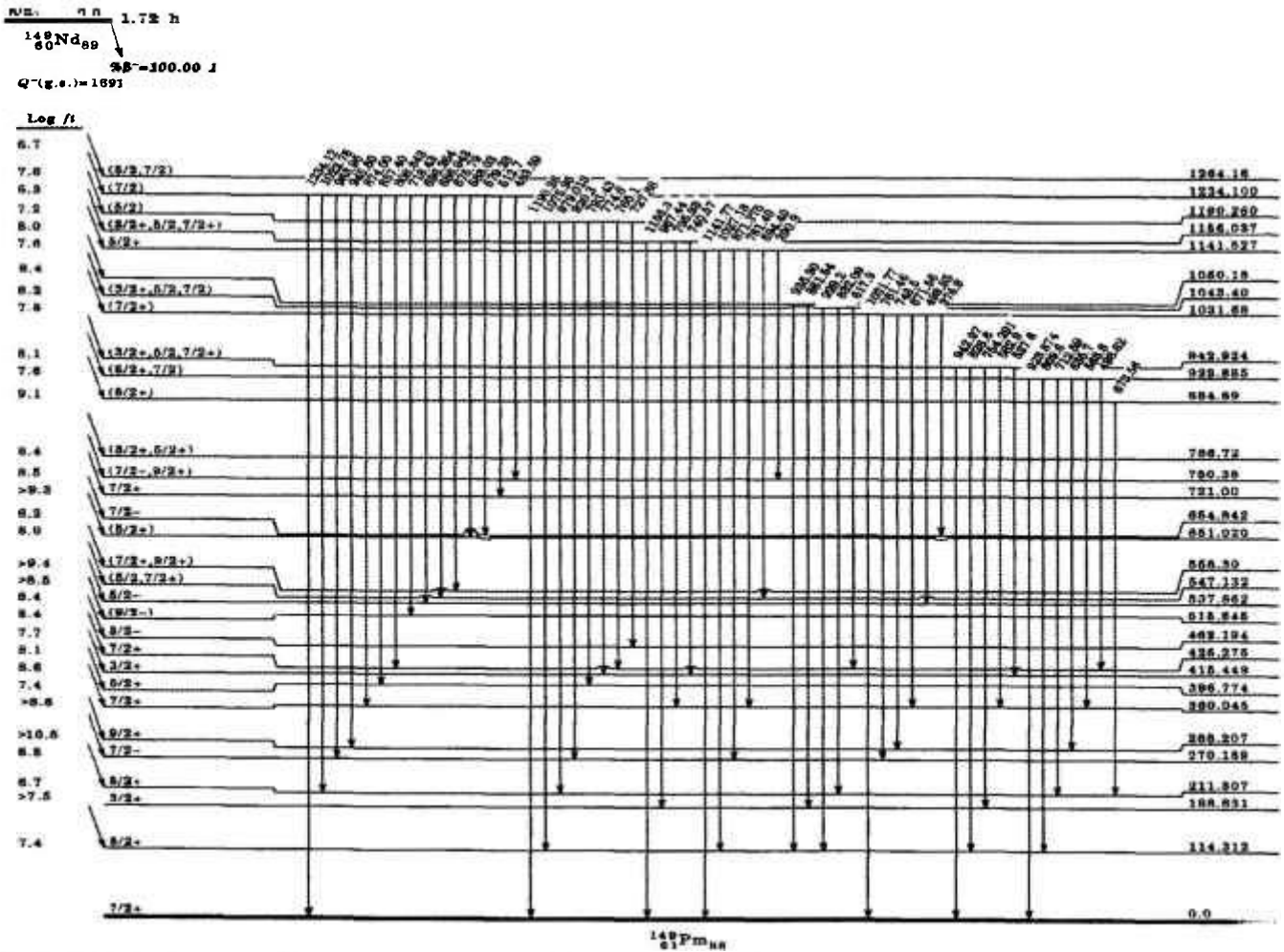


Figura 3.2 b: Esquema de decaimento do ^{149}Nd proposto por Firestone [19].

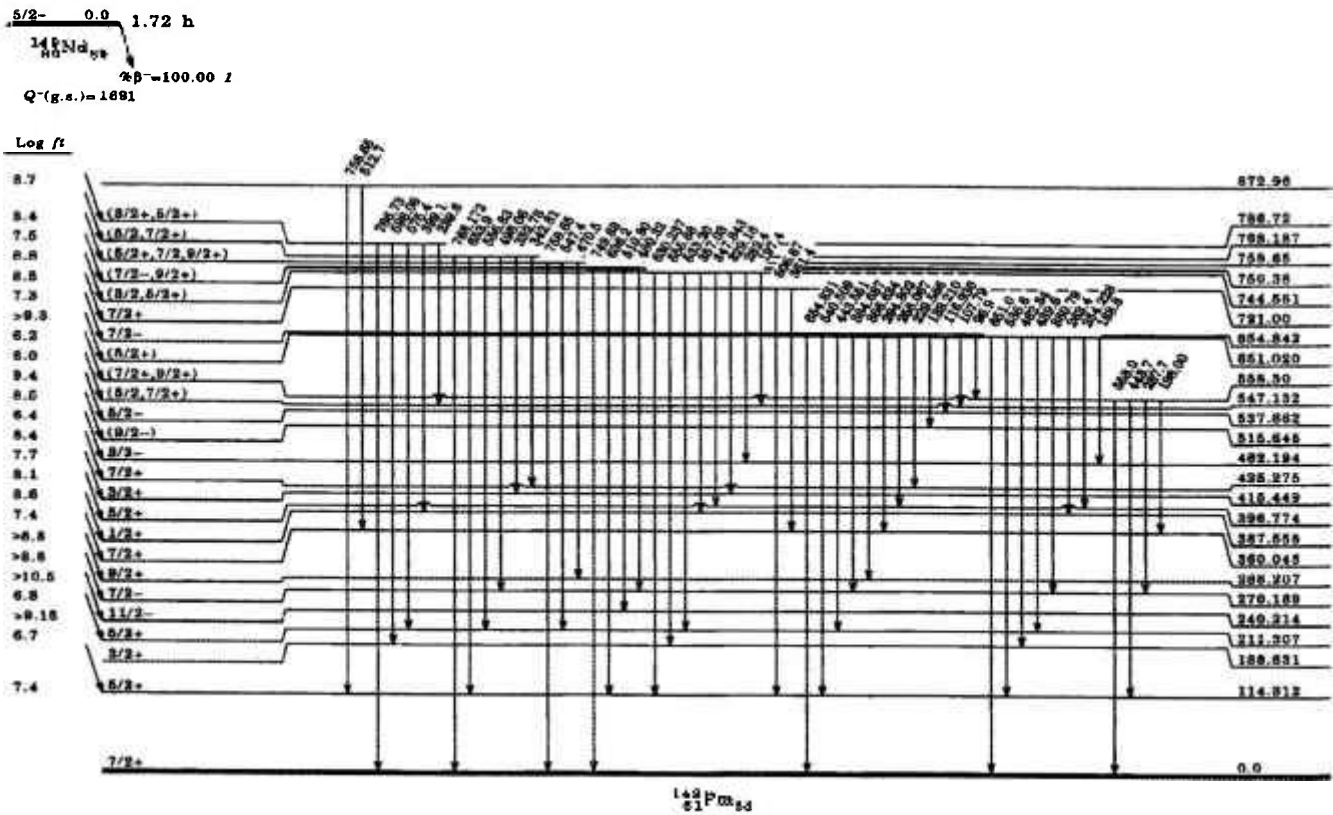


Figura 3.2 c: Esquema de decaimento do ^{149}Nd proposto por Firestone [19].

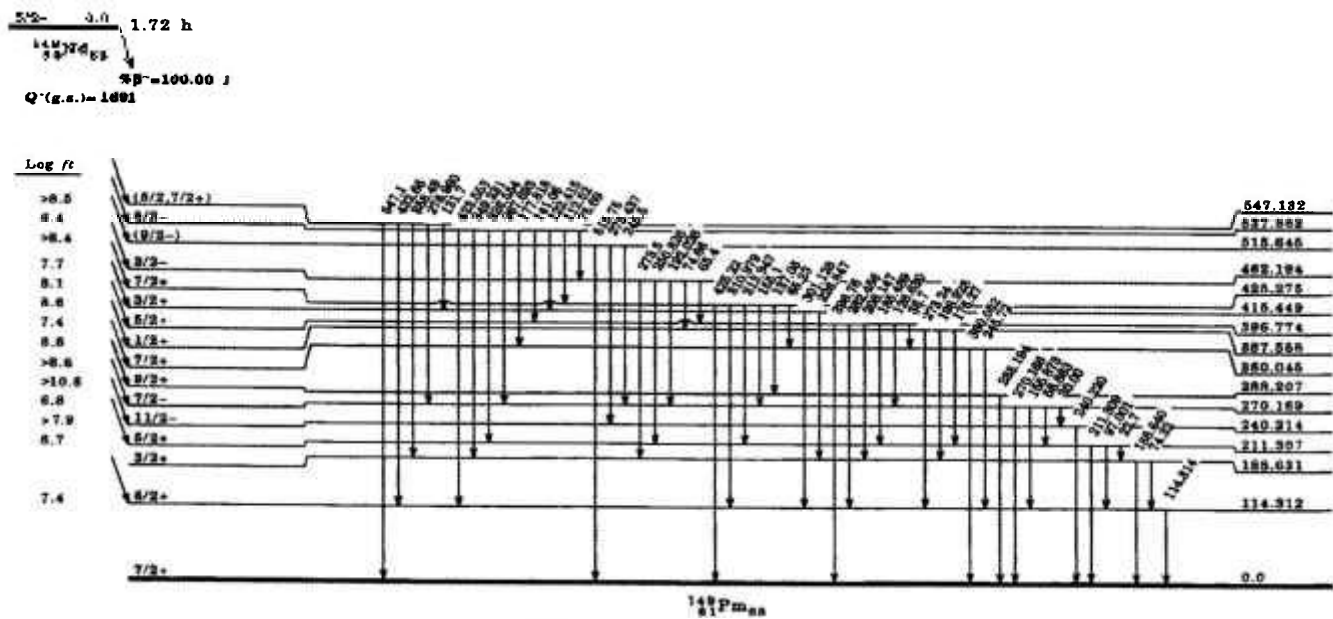


Figura 3.2 d: Esquema de decaimento do ^{149}Nd proposto por Firestone [19].

Na tabela 3.2 são apresentados os valores das energias dos níveis bem como o spin e paridade estabelecidos no presente estudo juntamente com os valores propostos na medida realizadas por Schneider *et al* [2].

Tabela 3.2: Energia do nível ($E_{\text{nível}}$), spin e paridade atribuídos aos níveis do decaimento β^- do ^{149}Nd

$E_{\text{nível}}$ (keV)	Spin(J^{π}) Presente Estudo	Spin(J^{π}) [2]
0	—	$7/2^+$
114,3534 (15)	$5/2^+$	$5/2^+$
188,6796 (17)	$3/2^+$	$3/2^+$
211,3624 (15)	$5/2^+$	$5/2^+$
240,3946 (19)	$11/2^-$	$11/2^-$
270,2069 (15)	$7/2^-$	$7/2^-$
288,2274 (21)	$9/2^+$	$(9/2)^-$
360,139 (5)	$7/2^+$	$7/2^+, (9/2)^+$
387,609 (4)	$1/2^+$	$1/2^+$
396,8556 (23)	$5/2^+$	$5/2^+$
415,559 (5)	$3/2^+$	$3/2^+, (5/2)^+$
425,2798 (22)	$7/2^+$	$7/2^+, (5/2)^+$
462,3498 (35)	$3/2^-$	$3/2^-$
515,796 (5)	$9/2^-$	$(7/2)^-, 9/2^-$
537,9789 (20)	$5/2^-$	$5/2^-$
547,076 (6)	$5/2, 7/2^+$	—
556,233 (4)	$9/2^+$	—
635,983 (25)	$3/2^+, 5/2^+$	—
651,132 (6)	$5/2^+$	—
654,9478 (23)	$7/2^-$	$7/2^-$
721,929 (26)	$7/2^+$	—
744,575 (6)	$3/2, 5/2^+$	—
750,491 (15)	$7/2^-$	$7/2^-$
758,076 (19)	$5/2^+, 7/2, 9/2^+$	—
767,482 (12)	$5/2, 7/2^+$	—
785,860 (26)	$3/2^+, 5/2^+$	$3/2^+, (5/2)^+$

$E_{\text{nível}}$ (keV)	Spin(J^{π}) Presente Estudo	Spin(J^{π}) [2]
885,82 (14)	$5/2^+$	—
924,049 (21)	$5/2^+, 7/2^+$	—
942,50 (20)	$3/2^+, 5/2, 7/2^+$	—
956,836 (7)	$7/2^+$	—
1031,75 (4)	$7/2^+$	—
1043,69 (20)	$3/2^+, 5/2, 7/2$	—
1049,655 (24)	$1/2^+, 3/2, 5/2^+$	—
1141,66 (4)	$5/2^+$	—
1156,971 (8)	$3/2^+, 5/2, 7/2^+$	—
1181,18 (6)	$3/2^+, 5/2^+$	—
1190,728 (7)	$5/2$	$(5/2^-)$
1234,242 (6)	$7/2^-$	$(7/2)^-$
1239,76 (3)	$5/2^+, 7/2$	—
1264,28 (5)	$5/2, 7/2$	—
1290,085 (22)	$3/2^+, 5/2, 7/2$	—
1293,4 (4)	$3/2^+, 5/2, 7/2$	—
1312,506 (20)	$5/2$	$(5/2^-)$
1328,79 (9)	$(3/2^+)$	—
1363,85 (4)	$5/2^+$	—
1367,91 (13)	$5/2^+, 7/2, 9/2$	—
1391,69 (6)	$5/2^+, 7/2^+$	—
1406,88 (6)	$9/2^-$	—
1411,9 (3)	$7/2^-$	—
1449,250 (23)	$3/2^+, 5/2, 7/2^+$	—
1495,19 (11)	$5/2^+, 7/2^+$	—
1568,63 (6)	$5/2^+, 7/2$	$7/2^-$

Na tabela 3.3 são apresentados os valores obtidos para alimentação beta dos níveis juntamente com os valores propostos na medida realizadas por Schneider *et al* [2].

Tabela 3.3: Energia do nível ($E_{\text{nível}}$), Intensidade associada a transição β (I_{β}) e $\log ft$ atribuídos aos níveis do decaimento β^{-} do ^{149}Nd .

$E_{\text{nível}}$ (keV)	I_{β} (%) Presente Estudo	I_{β} (%) [2]	$\log ft$ Presente Estudo	$\log ft$ [2]
0	—	—	—	—
114,3534 (15)	2,709	5,4	7,8	7,49
188,6796 (17)	—	—	—	—
211,3624 (15)	20,44	24,8	6,8	6,73
240,3946 (19)	0,519	—	9,15	> 7,9*
270,2069 (15)	12,195	17,2	6,9	- 6,82
288,2274 (21)	0,025	—	10,39	> 10,51*
360,139 (5)	0,629	—	8,8	> 8,6*
387,609 (4)	0,037	0,3	10,04	8,44
396,8556 (23)	2,189	3,2	7,53	7,39
415,559 (5)	0,262	0,17	8,46	8,62
425,2798 (22)	1,204	0,52	7,8	8,15
462,3498 (35)	1,125	1,5	7,69	7,63
515,796 (5)	0,454	0,15	8,76	8,57
537,9789 (20)	23,81	21,3	6,3	6,38
547,076 (6)	0,249	0,10	8,3	8,72
556,233 (4)	0,704	0,11	8,37	0,06
635,983 (25)	0,031	—	8,96	—
651,132 (6)	0,120	0,29	8,37	8,08
654,9478 (23)	23,89	19,2	6,07	6,26
721,929 (26)	0,167	—	8,19	> 9,3*
744,575 (6)	1,984	1,12	7,06	7,35
750,491 (15)	0,343	0,07	8,31	8,54
758,076 (19)	0,236	0,04	8,43	8,81
767,482 (12)	1,083	0,66	7,29	7,54
785,860 (26)	0,049	0,062	8,6	8,54

$E_{\text{nível}}$ (keV)	$I_{\beta}(\%)$ Presente Estudo	$I_{\beta}(\%)$ [2]	$\log ft$ Presente Estudo	$\log ft$ [2]
885,82 (14)	0,015	0,011	8,93	9,11
924,049 (21)	0,236	0,29	7,67	7,62
942,50 (20)	0,566	0,081	7,25	8,13
956,836 (7)	0,014	—	8,85	—
1031,75 (4)	0,090	0,115	7,86	7,78
1043,69 (20)	0,019	0,023	8,51	8,45
1049,655 (24)	0,159	0,022	7,78	8,45
1141,66 (4)	0,052	0,084	7,83	7,65
1156,971 (8)	0,441	0,031	6,93	8,05
1181,18 (6)	0,111	—	7,39	—
1190,728 (7)	1,063	0,15	6,37	7,25
1234,242 (6)	1,578	0,93	6,09	6,33
1239,76 (3)	0,159	0,094	7,04	7,31
1264,28 (5)	0,058	0,014	6,99	8,07
1290,085 (22)	0,107	0,090	7,04	7,16
1293,4 (4)	0,0025	—	8,68	—
1312,506 (20)	0,273	0,18	6,57	6,77
1328,79 (9)	0,039	—	7,33	—
1363,85 (4)	0,068	—	6,97	—
1367,91 (13)	0,022	—	7,42	—
1391,69 (6)	0,101	0,016	6,7	7,50
1406,88 (6)	0,049	—	6,88	—
1411,9 (3)	0,110	0,06	6,5	7,20
1449,250 (23)	0,067	0,0047	6,7	7,74
1495,19 (11)	0,014	0,0099	7,0	7,11
1568,63 (6)	0,063	0,0018	5,93	6,22

* NDS [21]

4 Discussão dos Resultado

4.1 Análise dos níveis excitados do ^{149}Pm

O esquema de níveis excitados do ^{149}Pm foi elaborado de acordo com os procedimentos descritos anteriormente. Os valores das energias das transições foram obtidos utilizando o programa INTERCOV [15] e a intensidade relativa associada a transição γ pelo programa INTEN [16]. Posteriormente, o cálculo da energia dos níveis foi obtido empregando-se o programa da ajuste Ninja [20]. De posse destes dados, outros parâmetros relacionados aos níveis de energia, como a intensidade de alimentação beta (I_β), $\log ft$, spin (J) e paridade (π) foram estabelecidos.

Particularmente, a espectroscopia simples associada à análise estatística empregada sugere a existência de 198 transições pertencentes ao esquema de decaimento do núcleo ^{149}Nd , das quais 45 transições foram observadas pela primeira vez. Estas transições são apresentadas na tabela 4.1 bem como a informação com relação ao seu posicionamento, quando foi possível.

A obtenção da intensidade relativa, na faixa de energia abaixo da energia de 50keV, não foi possível em função de poucos dados disponíveis (referentes a fontes padrão) na elaboração da curva de eficiência (figura 1.2).

Tabela 4.1: Transições γ observadas pela primeira vez no decaimento do núcleo ^{149}Nd na medida de espectroscopia simples.

Energia(keV)	$I_{\gamma}(\%)$	Posicionamento	
		Energia do Nível (keV)	
		E_{ni}	E_{nf}
26,394 (22)	—	—	—
33,964 (16)	—	—	—
39,065 (9)	—	—	—
44,341 (14)	—	—	—
58,526 (11)	54,7 (9)	—	—
67,20 (19)	1,7 (4)	—	—
69,510 (21)	2,5 (3)	—	—
72,753 (12)	23,0 (5)	—	—
77,097 (10)	23,5 (5)	—	—
80,305 (10)	17,4 (3)	—	—
90,12 (5)	1,99 (11)	515,796 (4)	425,2798 (22)
92,89 (3)	2,16 (13)	—	—
171,17 (10)	1,24 (22)	—	—
224,49 (6)	0,92 (9)	1181,18 (6)	956,83 (7)
238,611 (3)	34,32 (11)	—	—
290,374 (20)	2,43 (6)	651,132 (6)	360,139 (5)
332,167 (18)	0,68 (4)	1363,85 (4)	1031,75 (4)
371,92 (6)	0,86 (10)	1328,79 (9)	956,83 (7)
413,693 (15)	0,67 (5)	1049,655 (24)	635,983 (25)
434,90 (7)	0,14 (4)	1156,971 (8)	721,929 (26)
441,47 (13)	1,22 (10)	956,83 (7)	515,796 (5)
590,74 (17)	0,16 (4)	1312,506 (20)	721,929 (26)
652,744 (7)	26,46 (15)	1190,728 (7)	537,9789 (20)
665,22 (7)	0,59 (4)	1181,18 (6)	515,796 (4)
726,822 (12)	1,54 (10)	1264,28 (5)	537,9789 (20)
736,18 (11)	0,71 (16)	924,05 (21)	188,6796 (17)
771,91 (4)	1,0 (5)	1234,242 (6)	462,349 (3)

Energia(keV)	I γ (%)	Posicionamento	
		Energia do Nível (keV)	
		E_{ni}	E_{nf}
794,58 (3)	3,28 (18)	1156,971 (8)	360,139 (5)
806,10 (8)	0,97 (9)	1363,85 (4)	556,233 (4)
835,18 (6)	1,24 (8)	1391,691 (6)	556,233 (4)
839,24 (5)	1,06 (8)	1049,655 (24)	211,3624 (15)
858,74 (11)	0,76 (7)	1406,88 (6)	547,076 (6)
933,24 (4)	2,25 (20)	—	—
976,2 (3)	0,25 (10)	1363,85 (4)	387,609 (4)
1016,1 (3)	0,14 (5)	1411,89 (3)	396,8556 (23)
1040,7 (4)	0,21 (7)	1156,971 (8)	114,3534 (15)
1119,79 (5)	3,1 (18)	1234,242 (6)	114,3534 (15)
1170,88 (19)	0,68 (9)	1568,63 (6)	396,8556 (23)
1180,54 (26)	1,53 (11)	1181,18 (6)	0
1206,7 (3)	0,15 (6)	1495,19 (11)	288,2274 (21)
1237,61 (3)	1,49 (9)	1449,250 (23)	211,3624 (15)
1293,4 (4)	0,07 (3)	1293,4 (4)	0
1367,96 (13)	0,6 (5)	1367,91 (13)	0
1400,95 (9)	0,38 (4)	—	—
1407,26 (6)	0,58 (5)	1406,88 (6)	0

Com relação à determinação da energia e intensidade relativa obteve-se, para maioria dados, uma melhor precisão. Isto foi possível devido ao uso de detectores de melhor resolução em energia, alta estatística, aquisição e análise de dados que permitiram o acompanhamento de até quatro das meia-vidas das transições que compõem o Espectro-Soma do ^{149}Nd bem como a análise detalhada do espectro de fundo e cápsula (invólucro da fonte). Além disso, a análise das incertezas foi obtida utilizando-se a metodologia de covariâncias que pode ser considerada como uma forma mais completa de avaliar incertezas em dados experimentais, pois além da estimativa da incerteza total tem-se informações sobre as correlações entre os erros de todos os parâmetros envolvidos.

Desta forma, na medida de espectroscopia foi possível a identificação de transições pouco intensas bem como de vários multipletos. Na Tabela 4.2 são apresentados os casos identificados no presente estudo.

Tabela 4.2. Valores de energia associados aos multipletos identificados no presente estudo.

Energia da transição γ (keV)	
Presente Estudo	Schneider <i>et al.</i> [2]
58,526(11)	58,85(3)
59,652 (8)	
224,49 (6)	226,85 (4)
227,072 (9)	
238,611 (3)	240,23 (2)
240,4660 (18)	
288,2516 (25)	288,20 (2)
290,374 (20)	
432,76 (7)	432,81 (7)
434,90 (7)	
652,744 (7)	654,83 (3)
654,838 (3)	
726,822 (12)	727,87 (8)
727,23 (3)	
793,19 (3)	793,48 (8)
794,58 (3)	
806,10 (8)	808,89 (5)
808,892 (12)	
976,09 (23)	978,8 (5)
978,43 (21)	
979,52 (22)	978,99 (7)
1040,7 (4)	1041,89 (9)
1042,36 (17)	
1170,88 (19)	1171,74 (18)
1172,76 (7)	

As transições γ sugeridas como singletos no experimento realizado por Schneider *et al.* [2] são apresentadas na coluna da direita.

Outra melhoria, em termos instrumentais, diz respeito a utilização do sistema multidetetor, desenvolvido no LAL [17]. Este sistema possibilitou aquisição de espectros de coincidências com maior rapidez na aquisição dos dados experimentais, em função da utilização de componentes eletrônicos de concepção moderna propiciando uma melhoria na estatística de contagens e, conseqüentemente, resultados finais mais precisos. Este sistema, uma vez acoplado ao espectrômetro de coincidência $\gamma\gamma$, permite o estudo de núcleos complexos que se desexcitam por vários multipletos, como no caso do núcleo em estudo.

Desta forma, utilizando o sistema multidetetor nas medidas de coincidência foi possível obter e analisar espectros bidimensionais que fornecem pares de coincidências $(E_{\gamma 1}, E_{\gamma 2})$ e $(E_{\gamma 2}, E_{\gamma 1})$, onde o índice refere-se ao detetor no qual a transição γ com energia E_{γ} foi depositada. Este recurso forneceu condições de propor multipletos, cuja identificação não foi possível na medida de espectroscopia γ em função da resolução em energia, além de fornecer relações que possibilitaram o posicionamento das transições γ no esquema de decaimento beta do ^{149}Nd .

Os resultados obtidos no término da análise de coincidência permitiram confirmar o posicionamento de 181 transições bem como a identificação de 45 transições observadas pela primeira vez. Além disso 8 transições propostas por Schneider *et al.* [2], pela regra da soma, foram confirmadas (Tabela 4.3).

Tabela 4.3: Energia (E_γ) e posição das transições γ , pertencentes ao decaimento beta do ^{149}Nd , propostas por um único estudo [21] e confirmadas no presente estudo.

Energia da transição γ (keV)	Posicionamento	
	Energia do Nível (keV)	
	E_{n_i}	E_{n_f}
318	556,233(4)	240,3946(19)
449	635,983(25)	188,6796(17)
750	750,491(15)	0
809	1234,242(6)	425,2798(22)
992	1181,18(6)	188,6796(17)

O conhecimento do spin e paridade de níveis bem estabelecidos, a saber: estado fundamental ($7/2^+$), 114 keV($5/2^+$), 188 keV($3/2^+$), 211 keV($5/2^+$), 240 keV($11/2^-$), 270 keV($7/2^-$), 288 keV($9/2^+$), 360 keV($7/2^+$), 387 keV($1/2^+$), 396 keV($5/2^+$) e 425 keV($7/2^+$), foram utilizados na análise dos demais níveis propostos e ou confirmados.

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho 6 novos níveis de energia foram sugeridos, a saber: 1181, 1293, 1329, 1364, 1368 e 1407keV. Além disso 10 níveis, sugeridos anteriormente, por um único estudo, foram confirmados: 758, 1044, 1050, 1157, 1234, 1240, 1290, 1412, 1449 e 1495keV. Para as análises destes níveis foram utilizadas as informações já estabelecidas por outros estudos, isto é: o esquema de níveis apresentado na compilação de dados do Nuclear Data Sheets [21], o spin e paridade do estado fundamental do ^{149}Nd , estabelecido como: $5/2^-$, bem como informações referentes aos estudos com reações nucleares [19]. A descrição desses níveis é apresentada a seguir

Nível 758keV. De acordo com presente experimento este nível é depopulado pelas transições de 470keV, 549keV e 759keV para os estados excitados de 288keV ($9/2^+$), 211keV ($5/2^+$) e fundamental ($7/2^+$), respectivamente. Estas transições foram observadas em medidas anteriores de espectroscopia simples e de acordo com a compilação do NDS [21] apresentavam-se sem confirmação. A intensidade de alimentação β^- obtida foi de 0,236 % com $\log ft = 8,43$ entretanto, não foi possível definir spin e paridade dentre as possibilidades $5/2^+$, $7/2^-$ e $9/2^+$.

Nível 1044keV. O presente estudo confirma a existência deste nível atribuindo-lhe intensidade alimentação beta 0,019% valor de $\log ft = 8,51$, além de confirmar o posicionamento da transição de 832keV, a qual alimenta o nível bem estabelecido a 211keV ($5/2^+$). As demais transições 618 keV e 929 keV, propostas como depopulando este nível [19], não foram observadas nem na espectroscopia simples nem na espectroscopia de coincidência. As possibilidades spin e a paridade, $3/2^+$, $5/2$ e $7/2$, são condizentes com os resultados obtidos no presente estudo.

Nível 1050keV. Este nível foi sugerido em um único estudo via desexcitação beta [19]. No presente estudo este nível foi confirmado obtendo-se $I_\beta = 0,159\%$ e $\log ft = 7,78$ compatíveis com as possibilidades de spin: $1/2^+$, $3/2$ e $5/2^+$. De acordo com nossos dados as transições que o depopulam são 414keV e 839keV, ambas observadas pela primeira vez, bem como a transição de 860 keV. Particularmente, a transição de 936 keV, sugerida como depopulando este nível [19] não foi observada em nossas medidas de espectroscopia simples e de coincidências.

Nível 1157keV. Trata-se de um nível sugerido só em medidas que envolvem o decaimento beta do ^{149}Nd [19]. Nossos dados são compatíveis com a existência deste nível, sendo que as energias de 741keV, 795keV e 968keV que depopulam este nível foram confirmadas, além disso, duas novas transições foram associadas à desexcitação deste nível: 435keV e 1041keV, mas nenhuma evidência foi obtida em nosso estudo que confirme a presença da transição de 1156keV neste decaimento, sugerida por Schneider *et al* [2]. De acordo com nosso estudo a intensidade de alimentação beta foi estimada em 0,441 % mas nenhuma alimentação por transição γ foi verificada. As possibilidades associadas ao spin e paridade deste nível são $3/2^+$, $5/2$ e $7/2^+$.

Nível 1181keV. Medidas envolvendo as reações nucleares: $^{148}\text{Nd}(^3\text{He},d)$ e $^{148}\text{Nd}(\alpha,t)$ [22] propõem a existência de um nível a 1181(3) keV com $J^\pi = 3/2^+, 5/2^+$. No presente estudo este nível é sugerido em função do posicionamento da transição de 992 keV entre os níveis de energia a 1181keV e 189keV, bem como em função das transições de 224keV, 665keV e 1180 keV, observadas pela primeira vez, que populam os níveis bem

estabelecidos a 956keV ($7/2^+$), 515keV ($9/2^-$) e estado fundamental ($7/2^+$), respectivamente. A intensidade de alimentação beta de 0,111 % e o valor de $\log ft = 7,39$, obtidos no presente estudo, são compatíveis com as possibilidades de J^π sugeridas.

Nível 1234keV. Trata-se de um nível sugerido só em medidas envolvendo decaimento beta conforme compilação do NDS [21]. No presente estudo, as energias das transições de: 484keV, 579keV, 583keV, 676keV, 687keV, 696keV, 718keV, 809keV, 875keV, 946keV, 964keV, 1023keV e 1234keV depopulam este nível. Além disso, neste estudo, foi acrescentada a desexcitação deste nível as transições γ de 772keV e 1120keV, observadas pela primeira vez. Entretanto as energias de 513keV e 837keV também associadas a depopulação deste nível [19] não foram observadas no presente estudo. De acordo com nossos resultados a alimentação beta calculada para este nível foi de 1,578 % e $\log ft = 6,09$ compatíveis com $J^\pi = 7/2^-$.

Nível 1240keV. Os resultados obtidos no presente estudo confirmam a inclusão deste nível no esquema de decaimento do ^{149}Nd , considerando as relações de coincidências que envolvem as transições de 681keV, 843keV, 951keV e 1125keV, entretanto nenhuma evidência foi encontrada que confirme a presença das transições de 588keV e 1239keV neste decaimento depopulando este nível, conforme proposto por Schneider *et al* [2]. Os valores de alimentação beta e $\log ft$ obtidos são compatíveis com as possibilidades $5/2^+$ e $7/2^-$.

Nível 1290keV. Trata-se de nível duvidoso associado ao decaimento beta. Aparentemente nenhuma transição γ o popula mas várias energias foram associadas a sua desexcitação, a saber: 865keV, 893keV, 930keV, 1079keV, 1176keV e 1290keV [2]. No presente estudo as transições de 865keV, 893keV e 1079keV foram também observadas sendo compatíveis com seu posicionamento em 1290keV, entretanto nenhuma evidência foi verificada com relação as demais transições. De acordo com nossos dados este nível possui intensidade de alimentação beta de 0,107 % e $\log ft = 7,04$, mas não foi possível estabelecer o spin e a paridade dentre as possibilidades : $3/2^+$, $5/2^-$ e $7/2^-$, sugeridas pelas regras de seleção do decaimento beta-gama.

Nível 1293keV. Este nível está sendo proposto com base na presença da transição de 1293keV, observada pela primeira vez neste estudo na medida de espectroscopia, bem como nos resultados de coincidência, onde nenhuma relação foi observada. A existência da transição para o estado fundamental estabelece intensidade de alimentação beta de 0,0025% e sugere como possíveis os spins mais baixos : 3/2, 5/2 e 7/2 e paridade positiva.

Nível 1329keV. Estudos envolvendo diferentes reações nucleares: $^{148}\text{Nd}(\alpha, t)$ e $^{150}\text{Sm}(d, ^3\text{He})$ [22], bem como $^{150}\text{Sm}(\text{pol } t, \alpha)$ [19] sugerem a existência do nível 1329(4)keV com $3/2^+$. No presente estudo este nível é atribuído ao decaimento beta do ^{149}Nd em função da transição de 372keV, observada pela primeira vez, e pela transição de 813,1keV sugerida por Schneider *et al* [2] mas não posicionada. Este nível aparentemente não é alimentado por nenhuma transição γ . Possui intensidade de alimentação beta de 0,039 % e $\log ft = 7,33$ compatíveis com spin e paridade $3/2^+$.

Nível 1364keV. Este nível é sugerido pelo presente estudo com $J^\pi = 5/2^+$, intensidade de alimentação beta de 0,068 % e $\log ft = 6,97$, com base nas transições de 332keV, 806keV e 976keV, observadas pela primeira vez, que populam os níveis bem estabelecidos a 1032keV ($7/2^+$), 556keV ($9/2^+$) e 387 ($1/2^+$)keV, respectivamente.

Nível 1368keV. Estudos envolvendo medidas com as reações nucleares: $^{148}\text{Nd}(^3\text{He}, d)$ [22] e $^{150}\text{Sm}(d, ^3\text{He})$ [19] sugerem a existência de um nível à 1367(4) keV. No presente estudo este nível é proposto também, para o esquema de decaimento do ^{149}Nd , em função da transição de 1368keV observada na medida de espectroscopia. Como nenhuma relação de coincidência foi observada considerou-se que a transição de 1368keV decai para o estado fundamental ($7/2^+$). Nesta condição obteve-se para este nível intensidade de alimentação beta de 0,022 %, $\log ft = 7,42$ e paridade positiva, entretanto não foi possível estabelecer o spin deste nível dentre as possibilidades: 5/2, 7/2 e 9/2.

Nível 1407keV. Este nível é sugerido pelo presente estudo com $J^\pi = 9/2^-$ e intensidade de alimentação beta de 0,049%. Baseado nos dados do presente estudo nenhuma transição γ popula este nível. As transições que o depopulam são: 859keV e 1407keV, ambas observadas pela primeira vez. Medidas envolvendo as reações nucleares:

$^{148}\text{Nd}(\beta^-\text{He},d)$ e $^{148}\text{Nd}(\alpha,t)$ [22] sugerem a existência de um nível a 1405(3)keV com possibilidades de spin e paridade : $9/2^-$ e $11/2^-$.

Nível 1412keV. Várias transições foram associadas à desexcitação deste nível a saber: 661keV, 855keV, 865keV, 986keV, 1051keV e 1141keV, que propõem $J = 5/2$ e $7/2$, com alimentação beta de 0,06 % [19]. No presente estudo foi possível confirmar a presença deste nível no decaimento do ^{149}Nd em função das energias de desexcitação de 661keV, 776keV, 1016keV, 1051keV e 1173keV, sendo as transições de 1016keV e 1173keV observadas pela primeira vez. Nenhuma evidência foi obtida no presente estudo que possa confirmar a existência das transições de 855keV e 986keV sugeridas anteriormente [2]. No caso da transição de 865keV nossos dados são compatíveis com seu posicionamento no nível a 1290keV e não no presente nível como proposto por Schneider *et al.* [2]. Deste modo a intensidade de alimentação beta é de 0,110 % com $\log ft = 6,5$ que restringem $J^\pi = 7/2^-$.

Nível 1449 keV. Este nível foi associado ao decaimento beta [2] supondo que as energias de 1259keV e 1449keV o depopulam. O presente estudo é compatível com estas previsões além de propor que a transição de 1238keV, observada pela primeira vez, também depopula o nível a 1449keV alimentando o nível bem estabelecido a 211keV ($5/2^+$). Deste modo as possibilidades de spin mais baixos são possíveis ($3/2$, $5/2$, $7/2$) sendo favorecida paridade positiva.

Nível 1495 keV. Este nível foi sugerido no estudo de decaimento beta realizado por Schneider *et al* [2] assumindo que as energias de 1136keV, 1226keV, 1284keV, 1308keV, 1381keV e 1496keV o depopulam, porém no presente estudo somente a transição de 1496keV foi confirmada. Outra transição de 1207keV, observada pela primeira vez, também foi associada a desexcitação deste nível. Deste modo, o nível a 1496keV foi confirmado no presente estudo sendo sua intensidade de alimentação dada por 0,014% e $\log ft = 7,0$ com paridade positiva. Entretanto não foi possível a seleção em termos de spin sendo possíveis ambos $5/2$ e $7/2$.

4.2 Estrutura nuclear do ^{149}Pm

Quando um núcleo é dito esférico espera-se que seu comportamento estrutural seja descrito pelo modelo de camadas.

O modelo de camadas é um dos mais importantes pois sua formulação é base para os demais modelos nucleares. Sua proposição surgiu quando verificou-se, experimentalmente, que muitas propriedades nucleares variam periodicamente (de um modo similar ao sistema periódico na Física Atômica) quando o número de prótons (Z) e/ou o número de nêutrons (N) nos núcleos eram iguais a 2, 8, 20, 28, 50, 82 e 126, os quais foram denominados números mágicos.

Núcleos que possuem número mágico, de Z e/ou N , podem ser interpretados como se estivessem formando camadas, onde cada nucleon move-se em uma órbita específica dentro do núcleo, independentemente de todos os outros nucleons. Desta forma, o núcleo está sujeito a um potencial médio produzido pela resultante do movimento independente de todos os nucleons. Assim, para o estado fundamental de núcleos par - par o modelo de camadas prevê spin (J) zero e paridade (π) positiva e no caso de A - ímpar (Z ou N) o spin e paridade do estado fundamental passam a ser dados pelo nucleon desemparelhado. Entretanto, quando a camada é parcialmente preenchida é necessário introduzir outros possíveis efeitos de interação entre os nucleons da camada incompleta, para sua correta interpretação. Para propor quais seriam estes efeitos é preciso interpretar o que acontece quando o número de nucleons se distancia dos números mágicos.

A medida que o número de prótons e ou neutrons fora da configuração de uma camada fechada aumenta, as forças de longo alcance entre os nucleons em órbita, com diferentes valores de momento angular (J), tendem a alterar a forma esférica do núcleo. Esta constatação de deformação nuclear surgiu a partir das medidas de momento de quadrupolo elétrico de níveis excitados (Q_E), parâmetro que fornece a distribuição de cargas, isto é, de prótons no núcleo.

Um modo de tratar núcleos levemente deformados consiste em considerar que os nucleons que ocupam as camadas fechadas como um "caroço inerte" interagindo com os nucleons da camada parcialmente preenchida (fora do caroço). Desta forma, estas interações, denominadas fracas, seriam responsáveis pelas propriedades dos estados excitados. No caso dos isótopos de $^{147,149,151}_{61}\text{Pm}$ tem-se a camada de prótons e nêutrons parcialmente preenchidas. Considerando as prováveis interações entre caroço-inerte os estados $g_{7/2}$ e ou $d_{5/2}$ (como estado fundamental ou primeiro excitado) a maioria dos níveis excitados previstos, com paridade positiva, são observados nesses isótopos (figura 4.1). Entretanto, este tipo de acoplamento fraco não prevê a presença de estados de paridade negativa (figura 4.2). É importante ressaltar que para elaboração destas figuras foram considerados os níveis estabelecidos por mais de um estudo [19].

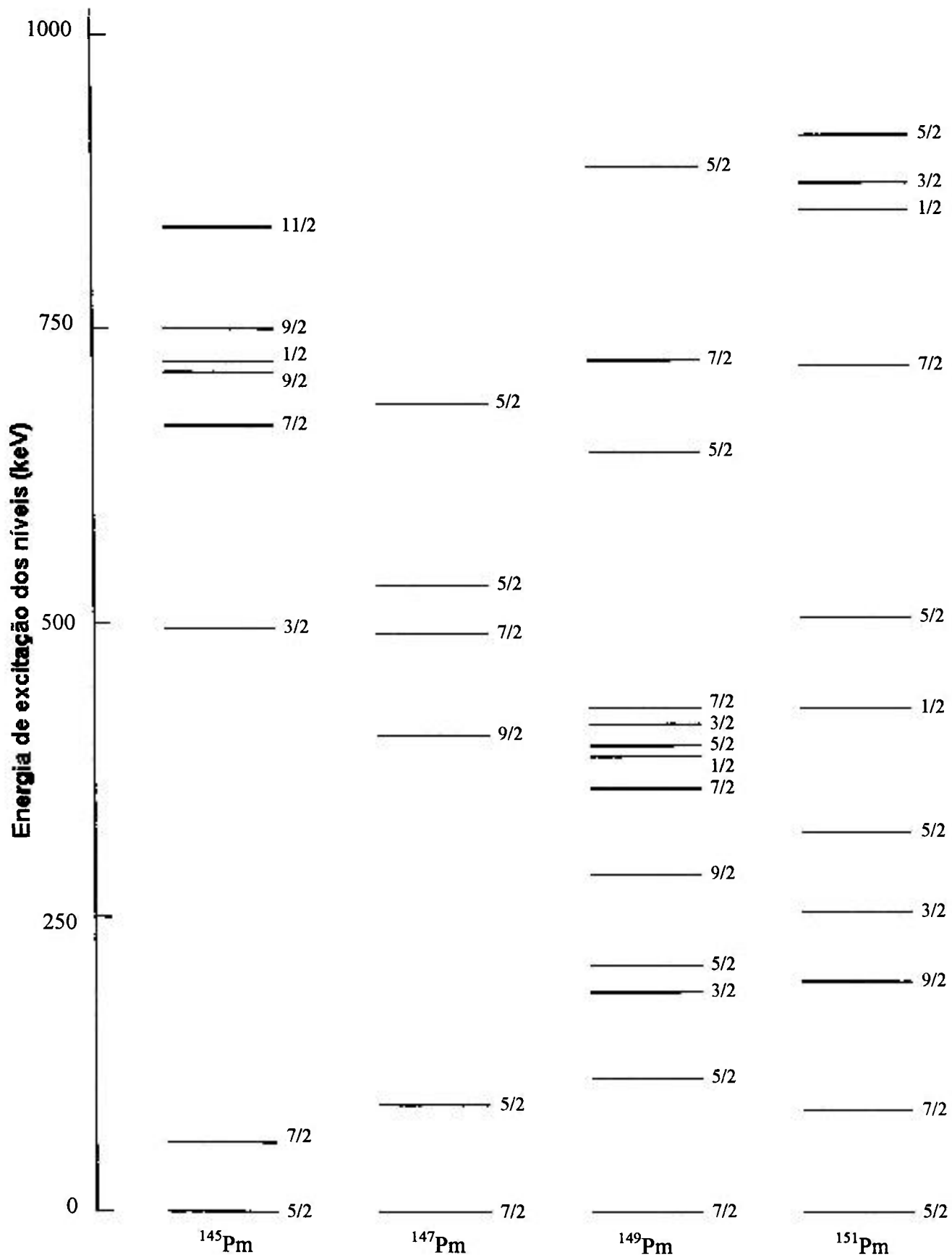


Figura 4.1: Sistemática dos estados de paridade positiva dos isótopos (A-ímpar) do Pm.

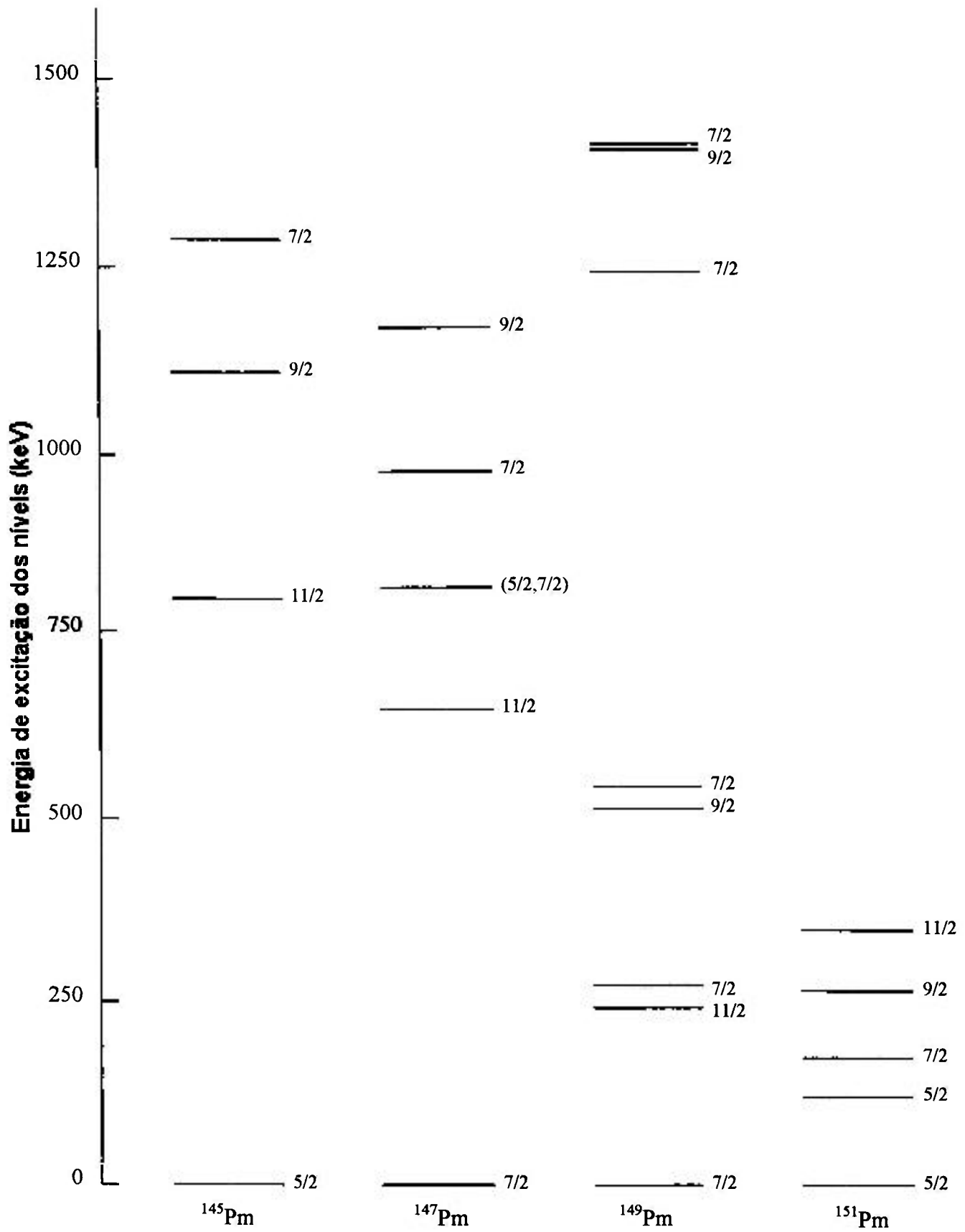


Figura 4.2: Sistemática dos estados de paridade negativa dos isótopos (A-ímpar) do Pm.

Analisando o comportamento dos níveis excitados desses isótopos (figura 4.1 e 4.2), tanto para os estados de paridade positiva como negativa, observa-se similaridades entre a densidade de níveis do ^{149}Pm e ^{151}Pm . Isto significa que além das interações fracas estes núcleos estão sujeitos a outros modos de interação. Portanto outros efeitos entre caroço e nucleons da camada semicompleta devem ser avaliados na tentativa de descrever corretamente estes núcleos.

Outras interações nucleares responsáveis por deformações nucleares são associadas a possibilidade do caroço vibracionar e interagir com os nucleons (modelo "vibrador mais partícula"), gerando pequenas deformações nas órbitas, ou o caroço rotacionar e interagir com os nucleons (modelo "partícula mais rotor"), causando grandes deformações.

Particularmente para o núcleo de ^{149}Pm , que possui $Z=61$ e $N=88$, a presença de estados excitados com paridade negativa, à baixas energias de excitação, como é o caso dos níveis a 240keV ($11/2^-$), 270keV ($7/2^-$), 515keV ($9/2^-$), 538keV ($5/2^-$), 655keV ($7/2^-$), 750keV ($7/2^-$), 1234keV, ($7/2^-$), 1407keV ($9/2^-$) e 1411keV ($7/2^-$), identificados no presente estudo, sugerem um comportamento que se aproxima ao tratamento de núcleos deformados dado pelo modelo "rotor mais partícula" pois este modo de excitação é apropriado para descrição de estados com paridade negativa. Cálculos desta natureza foram realizados no núcleo de $^{151}_{63}\text{Eu}$ ($N=88$) [23] resultaram em bom acordo com os dados experimentais estabelecidos.

Uma vez que o presente estudo identifica a presença de vários níveis excitados com paridade negativa no ^{149}Pm , cálculos utilizando o modelo partícula mais rotor indicam a possibilidade de interpretá-los. As propriedades nucleares previstas por este modelo dizem respeito ao spin, paridade, energia e momento de quadrupolo elétrico de estados excitados, os quais poderiam ser comparados com os dados experimentais. Entretanto, não são conhecidas medidas de quadrupolo elétrico de estados excitados neste núcleo (Q_E), conseqüentemente, a realização de um experimento envolvendo correlação angular perturbada $\gamma\gamma$ por campo elétrico contribuiria para melhor compreensão destes níveis.

5 Conclusões

Os estados excitados do núcleo ^{149}Pm a partir do decaimento β^- do ^{149}Nd foram investigados utilizando as técnicas de espectroscopia - γ e coincidência $\gamma\gamma$. Para realização de todas as medidas foram utilizadas fontes radioativas de ^{149}Nd preparadas no Reator IEA-R1m.

Os resultados obtidos na medida de espectroscopia e coincidência propõem a existência de 198 transições γ associadas ao decaimento β^- do ^{149}Nd , das quais 181 foram posicionadas em 51 níveis de energia, sendo 45 transições observadas pela primeira vez. Estas medidas permitiram também a determinação da energia e intensidade relativa das transições com melhor precisão bem como a determinação da energia dos níveis que compõem o esquema de decaimento do ^{149}Nd com precisão de pelo menos uma ordem de grandeza melhor do que os valores estabelecidos anteriormente, para a maioria dos níveis excitados. Um sumário destes dados é apresentado a seguir:

- 45 transições γ foram observadas pela primeira vez: 26, 34, 39, 44, 58, 67, 69, 73, 77, 80, 90, 93, 171, 224, 239, 290, 332, 372, 414, 435, 441, 591, 653, 665, 727, 736, 772, 795, 806, 835, 839, 859, 933, 976, 1016, 1041, 1120, 1171, 1180, 1207, 1238, 1293, 1368, 1401, 1407keV;
- 30 transições γ observadas pela primeira vez e posicionados: 90, 224, 290, 332, 372, 414, 435, 441, 591, 653, 665, 727, 736, 772, 795, 806, 835, 839, 859, 976, 1016, 1041, 1120, 1171, 1180, 1207, 1238, 1293, 1368 e 1407keV;
- 5 transições γ observadas anteriormente[21] em um único estudo foram confirmadas e posicionadas pelo presente estudo : 318, 449, 750, 809 e 992keV.

Em função do uso de detetores de melhor resolução em energia, alta estatística na medida de espectroscopia simples foi possível a identificação de transições pouco intensas ($I < 0,1\%$) bem como de dubletos, com precisão, sugeridos como singletos no experimento realizado por Schneider *et al* [2], a saber: 58,5 e 59,6keV; 224,5 e 227,1keV; 238,6 e 240,5keV; 288,2 e 290,4keV; 432,8 e 434,9keV; 652,7 e 654,8keV; 726,8 e 727,2keV; 793,2 e 794,6keV; 806,1 e 808,9keV; 1040,7 e 1042,4keV ; 1170,9 e 1172,8keV. Além disso, utilizando o sistema multidetector na medida de coincidência foi possível obter e analisar espectros bidimensionais que forneceram condições de identificar e em alguns casos confirmar vários dubletos observados na medida de espectroscopia além de fornecerem relações que possibilitaram o posicionamento de 181 transições γ no esquema de decaimento beta do ^{149}Nd .

A análise das incertezas, em todas as etapas, foi obtida utilizando-se a metodologia de covariâncias a qual leva em conta as correlações entre os erros de todos os parâmetros envolvidos.

Desta forma, em função dos resultados experimentais envolvendo os parâmetros: E_γ , I_γ , E_n , I_β^- e $\log ft$ e J^π , obtidos no presente estudo, propõe-se para o decaimento beta do ^{149}Nd um esquema de níveis constituído por 181 transições posicionadas em 51 níveis, dos quais 6 são sugeridos pela primeira vez: 1181, 1293, 1329, 1364, 1368 e 1407keV e 10 confirmados: 758, 1044, 1050, 1157, 1234, 1240, 1290, 1412, 1449 e 1495keV.

Finalmente, pode-se concluir que os experimentos realizados acrescentaram informações relevantes, no que diz respeito aos parâmetros relacionados aos níveis excitados, na faixa de energia que abrange o decaimento beta, fornecendo dados que possibilitaram aos físicos teóricos a interpretação deste núcleo. Entretanto, é evidente a necessidade de medidas de coincidência $\gamma\gamma$ abaixo de 100keV para que seja possível posicionar as transições observadas nesta região de energia, bem como medidas de correlação angular direcional $\gamma\gamma$ que auxiliam na seleção de spin dos níveis, na faixa de energia de $Q_{\beta\text{ max}}$, além de fornecer os valores de mistura multipolar das transições γ .

Particularmente, o estudo à baixas energias necessita de confecção de fontes padrão, tais como: ^{55}Fe , ^{88}Sr , ^{111}In , ^{113}Sn , ^{154}Eu e ^{207}Bi . Entretanto essas fontes não são usualmente produzidas no IPEN e dependendo do material é necessária sua importação. Além disso é preciso estabelecer qual metodologia de preparo deve ser empregada na confecção destas fontes. A obtenção dessas soluções já está sendo estudada no LEN, que já possui a instrumentação adequada para a realização das medidas (detetor de Si(Li) e eletrônica convencional em energia).

No que diz respeito à interpretação teórica do ^{149}Pm a densidade de níveis com paridade positiva pode ser associada a interação fraca, isto é, devido a interação entre caroço inerte e nucleons da camada incompleta. Entretanto, em função da proposição de vários níveis excitados com paridade negativa a realização de cálculos utilizando modelo partícula mais rotor é sugerida para futuros estudos teóricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHEN, C. H.; ARNS R, G. Energy Levels of ^{149}Pm . *Nucl. Phys.*, v.63, p.233-240, 1965.
- [2] SCHNEIDER, E. W.; GLASCOCK, M. D.; WALTERS W. B. Radioactive Decay of 1.7-h ^{149}Nd to Levels of Transitional ^{149}Pm . *Z. Physik A*, v.291, p.77-86, 1979.
- [3] GOPINATHAN, K.P.; JOSHI, M.C. Decay of ^{149}Nd to ^{149}Pm . *Phys. Rev. 2B*, v.134, p.297-307, 1964.
- [4] GOPINATHAN, K.P.; SINGRU, R.M. Levels of ^{149}Pm from the Decay of ^{149}Nd . *Phys. Rev.*, v.150, p.985-995, 1966.
- [5] NIESCHIMIDT, E.B.; POTNIS, V.R.; ELSSWORTH, L.D.; MANDEVILLE, C.E. Nuclear States of ^{149}Pm . *Nucl. Phys.* v.72, p.236, 1965.
- [6] HELMER, R.G.; MCLSAAC, L.D. Decay of ^{149}Nd . *Phys. Rev.* v.143, p.923-942, 1966.
- [7] GOPINATHAN, K.P. Gamma-Gamma Directional Correlations in ^{149}Pm . *Phys. Rev.* v.141, p.1185-1193, 1966.
- [8] SVENSON, A.G.; BOSTON, L.; JOSHI, M.C. The 114keV Level in ^{149}Pm . *Nucl. Phys.* v.89, p.348-358, 1966.
- [9] BACKLIN, A.; MALMSKOG, S.G.; SOLHED, H. Transitions, Lifetimes and Levels in ^{149}Pm . *Ark. Fys.*, p495-529, 1967.
- [10] TANDON, P.N.; DEVARE, H.G.G Factor of 114 keV State in ^{149}Pm . *Ind. J. Pure Appl. Phys.*, v.7, p.1, 1969.
- [11] HIDEKI, I.; TAKESHI, S.; SHIGERU, Y. Energy Levels and Gamma-ray Transitions in ^{149}Pm . *J. Phys. Soc. Jap.*, v.55(4), p1108-1121, 1986.
- [12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *X-ray and γ -ray Standards for Detector Calibration.*, 1991. (IAEA-TECDOC – 619).
- [13] MEDEIROS, J.A.G. *Correlação Angular Direcional Gama Gama No Núcleo ^{72}Ge* . 2000. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

- [14] GOUFFON, P. *Manual do Programa IDF*. Instituto de Física de São Paulo, Laboratório do Acelerador Linear, São Paulo, 1982.
- [15] KENCHIAN, G. *Manual do Programa INTERCOV*. Instituto de Física de São Paulo, Laboratório do Acelerador Linear São Paulo, 1992.
- [16] KENCHIAN, G. *Manual do Programa INTEN*, Instituto de Física de São Paulo, Laboratório do Acelerador Linear São Paulo, 1992.
- [17] BARG F^o.D.; NEVES R.C.; VANIN, V.R. Isa-to-CAMAC Interface. *Proceedings of the XX Brazilian Workshop on Nuclear Physics*, Guaratingueta S.P., 424-426, 1997.
- [18] GUIMARÃES FILHO, Z. O. *Medidas Precisas de Energias de Transições Gama em Coincidência : Espectroscopia das Séries do ²³²U e ²³³U*. 1998. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [19] FIRESTONE R.B. *Table of Isotopes, 8 ed*, New York, N.Y.: Wiley, 1996.
- [20] KENCHIAN, G. O. *Espectroscopia Gama do ¹⁰⁰Rh*. 1996. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [21] SZUECS, J.A.; JOHNS, M.W.; SINGH, B. *Nucl. Data Sheets for A=149*. v.46(1), p.1-185, 1985.
- [22] STRAUME, O.; LOVHOIDEN, G.; BURKE, D.G. Proton States in N=88 Nuclei ¹⁴⁹Pm, ¹⁵¹Eu and ¹⁵³Tb Populated in (TAU,D) and (ALPHA,T) Reactions: *Nucl. Phys. A*. v.266, p.390-412, 1976.
- [23] LEIGH, J.R.; DRARACOULIS, G. D.; SLOCOMBE, M.G; NEWTON, J. O. Band-Structure in N=88 Nucleus ¹⁵¹Eu. *J. Phys. G Nucl Partic* 3. v.4, p.519-532, 1977.