

Universidade de São Paulo

Instituto de Física



# Energias de raios gama padrões: suas covariâncias e relações com as constantes fundamentais

*Zwinglio de Oliveira Guimarães Filho*

Orientador: Prof. Dr. Otaviano Augusto Marcondes Helene

Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Física da  
Universidade de São Paulo como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Doutor em Ciências

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Paulo Geraldo (UNISANTOS)

SBI-IFUSP

Prof. Dr. Mauro da Silva Dias (IPEN)



305M810T4092

Prof. Dr. Giorgio Moscati (IFUSP)

Prof. Dr. Nilberto Heder Medina (IFUSP)

Prof. Dr. Otaviano Augusto Marcondes Helene (IFUSP)

São Paulo

2004

*Armando Corbani Ferraz*  
Prof. Armando Corbani Ferraz  
Presidente da Comissão de Pós Graduação

*af. 25/08/04*

539.7  
G 9636  
3  
Ex. 1

**FICHA CATALOGRÁFICA**  
**Preparada pelo Serviço de Biblioteca e**  
**Informação**  
**do Instituto de Física da Universidade de São**  
**Paulo**

Guimarães Filho, Zwinglio de Oliveira

Energias de Raios Gama Padrões: Suas Covariâncias e Relações com as Constantes Fundamentais.

São Paulo - 2004.

Tese (Doutoramento) - Universidade de São Paulo  
Instituto de Física - Depto. de Física  
Experimental

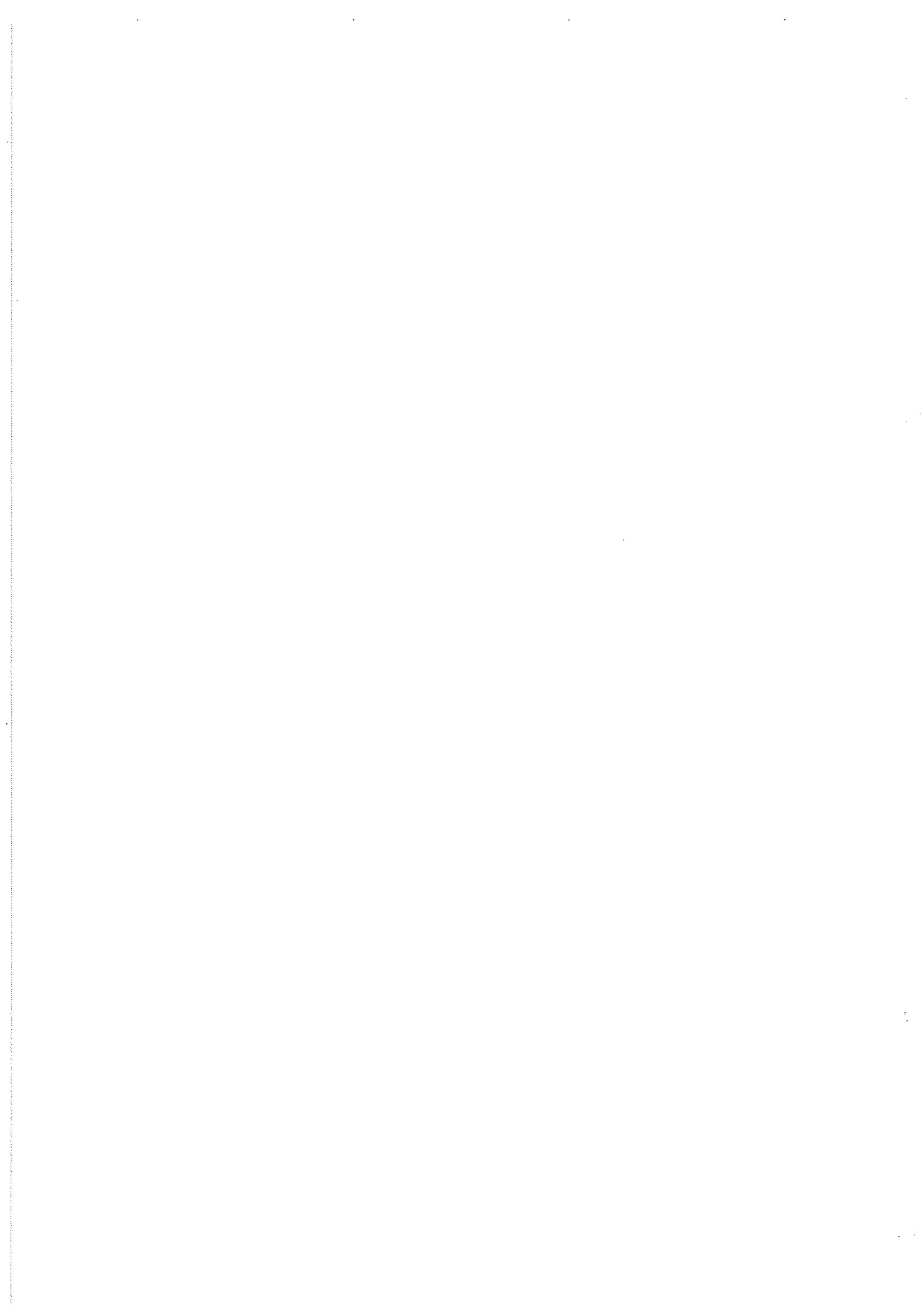
Orientador: Prof. Dr. Otaviano Augusto M Helene  
Área de Concentração: Física

Unitermos

1. Física Nuclear;
2. Metrologia;
3. Estrutura Nuclear

USP/IF/SBI-052/2004

**Aos  
meus pais**



## Agradecimentos

Esta Tese é fruto de empenhos realizados por muitas pessoas que me acompanharam ao longo dos últimos anos de tal modo que seria necessário incluir diversos outros nomes na identificação da autoria deste trabalho. Gostaria de manifestar um pouco sobre a participação de alguns destes outros autores:

Certamente este trabalho não teria sido possível sem a fundamental participação do professor Otaviano Helene que tem me orientado ao longo de quase uma década ensinando-me a cada dia um pouco mais sobre como fazer e gostar de Física. A paciência que ele teve comigo em todos estes anos é digna de nota.

De fundamental importância também foi à colaboração da professora Lighia Matsushigue, principalmente na etapa de redação do trabalho, quando se dedicou, praticamente em tempo integral, a me auxiliar na revisão da Tese.

O amigo Ruy Castro, além de colaborar durante o desenvolvimento do trabalho, também se dispôs a ler detalhadamente versões preliminares da Tese.

O meu irmão físico, Cesar Guimarães cujo auxílio incluiu até o desenvolvimento do programa para auxiliar o acesso às matrizes de correlação.

Os professores Paulo Pascholati, Vito Vanin, Giorgio Moscati, Ewa Cybulski, Philippe Gouffon, Manoel Tiago, Iuda Goldman, Marcos Martins, Jesuína Pacca, Nora Maidana e Márcia Rizzato pelos muitos auxílios que me forneceram.

Os amigos e colegas do IFUSP: Eduardo Nascimento, Antonio Hernandez, Carlos Quinrelli, Renato Neves, Juan Zevallos-Chávez, Ricardo Barbosa, Wanderley Pires Sá, Sandra Santos, Therezinha Farachini, Washington Carvalho, Ana Cecília,

Carla Guimarães, Adriana Barioni, Theotônio Pauliquevis, Paulo Siqueira, Eduardo Monteiro, David Barg, Diogo Tridapalli, Márcia Cândido, Alexandre Malafronte, Guilherme Hanninger, Joel Mesa, Francis Bringas, Carlos Takiya, Shan Tsai, Tiago Fiorini, Alfredo Bonini, Graziela das Neves, Leila Thieghi, Fábio Cuppo, Militão Figueiredo, Gabriel Zarnauskas, Eliana Lima e José Morel que, de muitas maneiras, contribuíram para que o ambiente de trabalho aqui no IFUSP fosse sempre muito agradável.

Este trabalho têm muitos autores não Físicos. Em especial, meus pais que me deram imenso suporte e auxílio em todas as dificuldades, me apoiando e incentivando em todos os momentos. A paciência que eles tem tido comigo também é, certamente, digna de nota. No importante âmbito do suporte familiar também se encontram meus irmãos Samuel e Cesar, minha avó e minha tia Marlene.

A realização deste trabalho também contou com o apoio da FAPESP.

Sobretudo, sou grato a Deus por ter me possibilitado a alegria desta realização e, principalmente, por ter colocado ao meu lado um tão grande número de pessoas especiais.

# Índice

<i>Capítulo I. Introdução</i>	1
<i>Capítulo II. Reavaliação dos padrões de calibração de energia gama</i>	9
II.1 - Seleção das informações experimentais	11
II.2 – A construção do ajuste	12
II.3 – Classificação das informações consideradas	19
II.4 – Medidas baseadas em difração	20
II.4.1 - Medidas “absolutas” de comprimento de onda	22
II.4.2 – Medidas relativas de comprimento de onda	29
II.5 – Medidas em detectores semicondutores	34
II.5.1 – Medidas em detectores semicondutores calibrados	37
II.5.2 – Medidas de diferença de energia em detectores semicondutores	39
II.6 – Relações baseadas nos esquemas de decaimento	47
II.6.1 – Os esquemas de decaimento utilizados no ajuste	49
II.7 – Valores adotados para as constantes fundamentais relacionadas às energias dos raios gama	57
II.7.1 O fator de conversão de comprimento de onda em energia	57
II.7.2 O parâmetro de rede do Silício	58
II.7.3 O parâmetro relacionado às constantes fundamentais, $f$	61
II.8 – Relação entre os dados e os parâmetros do ajuste	61

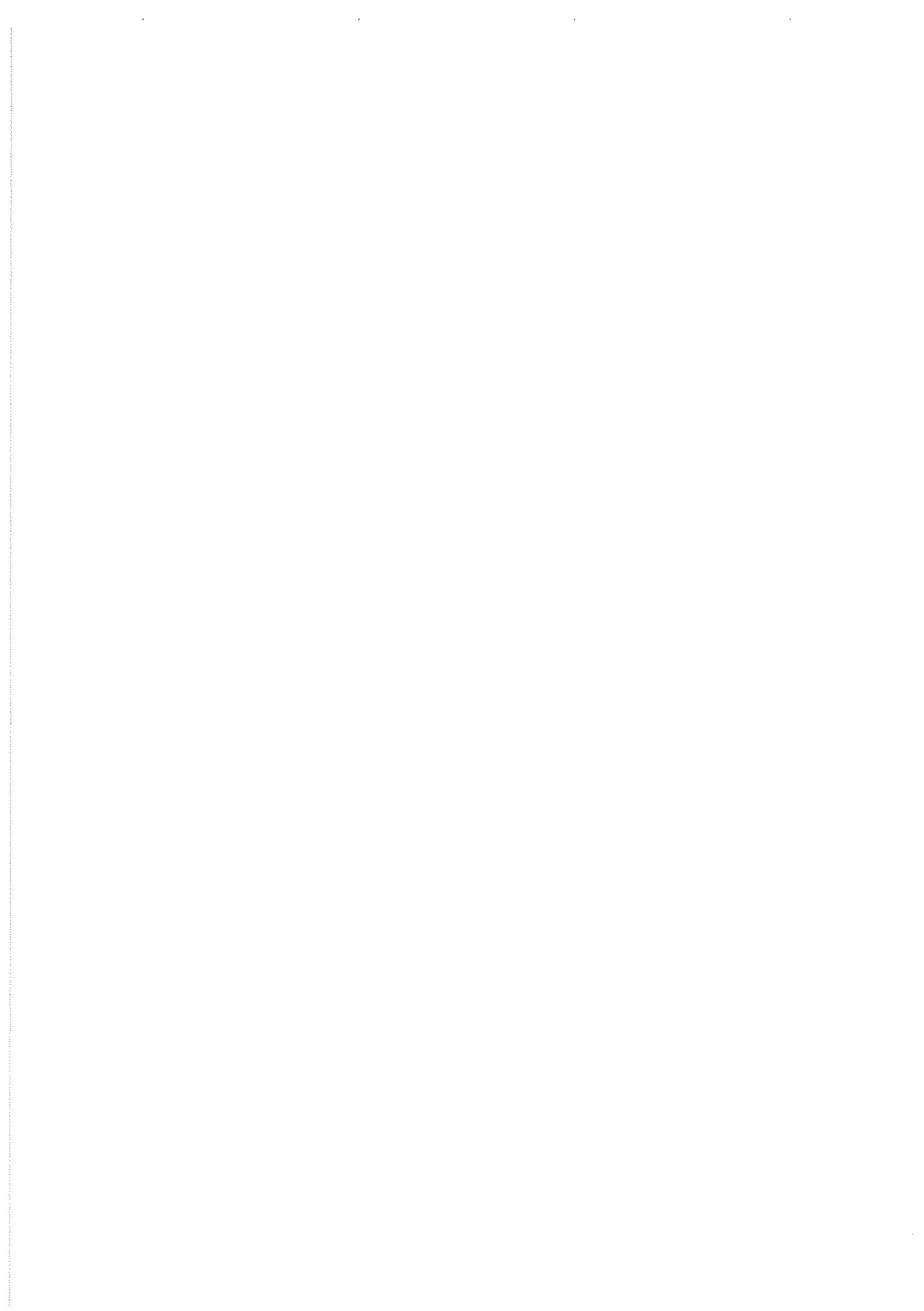
<b><i>Capítulo III. Resultados do ajuste de energias dos padrões gama</i></b>	<b>67</b>
<b>III.1 – Testes de qualidade do ajuste</b>	<b>67</b>
III.1.1 Teste de Qui-quadrado	68
III.1.2 Análise de resíduos	70
III.1.3 Correção das incertezas dos dados	76
<b>III.2 Valores recomendados para as energias dos padrões gama adotando as constantes fundamentais do CODATA 86</b>	<b>79</b>
<b>III.3 Correlações importantes</b>	<b>82</b>
<b>III.4 Interpretação das origens das correlações</b>	<b>86</b>
III.4.1 Correlações originadas pelas constantes fundamentais	86
III.4.2 Correlações originadas por medidas de diferença de energia em detectores semicondutores	89
III.4.3 Correlações originadas por medidas relativas de comprimento de onda	91
III.4.4 Correlações originadas pelas relações baseadas nos esquemas de decaimento	92
<b>III.5 O “gold standard”</b>	<b>95</b>
<b>III.6 Informações sobre as Constantes Fundamentais</b>	<b>97</b>
<b>III.7 Incertezas das relações baseadas nos esquemas de decaimento</b>	<b>99</b>
<b>III.8 Diferenças com relação à compilação de Helmer e van der Leun</b>	<b>103</b>
III.8.1 Interpretação das origens das diferenças	106
<b><i>Capítulo IV. Atualização das energias gama para as constantes fundamentais de 2002</i></b>	<b>111</b>
<b>IV.1 Valores adotados para as constantes fundamentais</b>	<b>111</b>
IV.1.1 O fator de conversão de comprimento de onda em energia	112
IV.1.2 O parâmetro de rede do Silício	113

IV.1.3 Novo valor para o parâmetro relacionado às constantes fundamentais, $f$	115
<hr/>	
<b>IV.2 Atualização dos padrões de energia gama para os valores recomendados para as constantes fundamentais de 2002</b>	<b>117</b>
IV.2.1 Valores adotados e incertezas dos padrões de energia gama	118
IV.2.2 Principais correlações entre os padrões de energia gama	125
<b>IV.3 Diferenças devidas à atualização para as constantes fundamentais de 2002</b>	<b>128</b>
IV.3.1 Correlações entre as energias gama e $f$	128
IV.3.2 O “gold standard” na escala de 2002	129
IV.3.3 Diferenças nos valores adotados e nas incertezas das energias gama	131
IV.3.4 Diferenças nas correlações importantes	132
<b><i>Capítulo V. O Método do Ajuste Único</i></b>	<b>135</b>
<b>V.1 Análise de medidas de espectroscopia gama com detectores semicondutores</b>	<b>135</b>
V.1.1 O procedimento tradicional	137
<b>V.2 Procedimentos de Auto-Calibração em espectroscopia gama</b>	<b>139</b>
V.2.1 Método da Auto-Calibração	139
V.2.2 O Método do Ajuste Único	140
<b>V.3 Exemplo da utilização do Método do Ajuste Único</b>	<b>143</b>
<b><i>Capítulo VI. O esquema de decaimento do <math>^{229}\text{Th}</math> e a energia do primeiro estado excitado</i></b>	<b>147</b>
VI.1 Medidas precisas de energias de raios gama emitidos pelo $^{229}\text{Th}$	148
VI.2 O esquema de decaimento do $^{229}\text{Th}$	151
VI.3 Primeiro passo: utilização da parte comum das hipóteses consideradas	
	153

<b>VI.4 Segundo passo: a determinação da energia do primeiro estado excitado, Δ</b>	<b>156</b>
VI.4.1 A construção do ajuste: as três hipóteses	157
VI.4.2 Avaliação das diferenças entre as três hipóteses	159
VI.4.3 As transições de 317 keV e 320 keV	161
VI.4.4 Conclusões e consequências deste estudo	162
<b><i>Capítulo VII. Discussões finais e conclusões</i></b>	<b>163</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>167</b>
<b><i>Apêndice A. Resultados considerando as constantes fundamentais de 1986</i></b>	<b>179</b>
<b><i>Apêndice B. Resultados considerando as constantes fundamentais de 2002</i></b>	<b>193</b>
<b><i>Apêndice C. Conteúdo do CD-ROM</i></b>	<b>221</b>

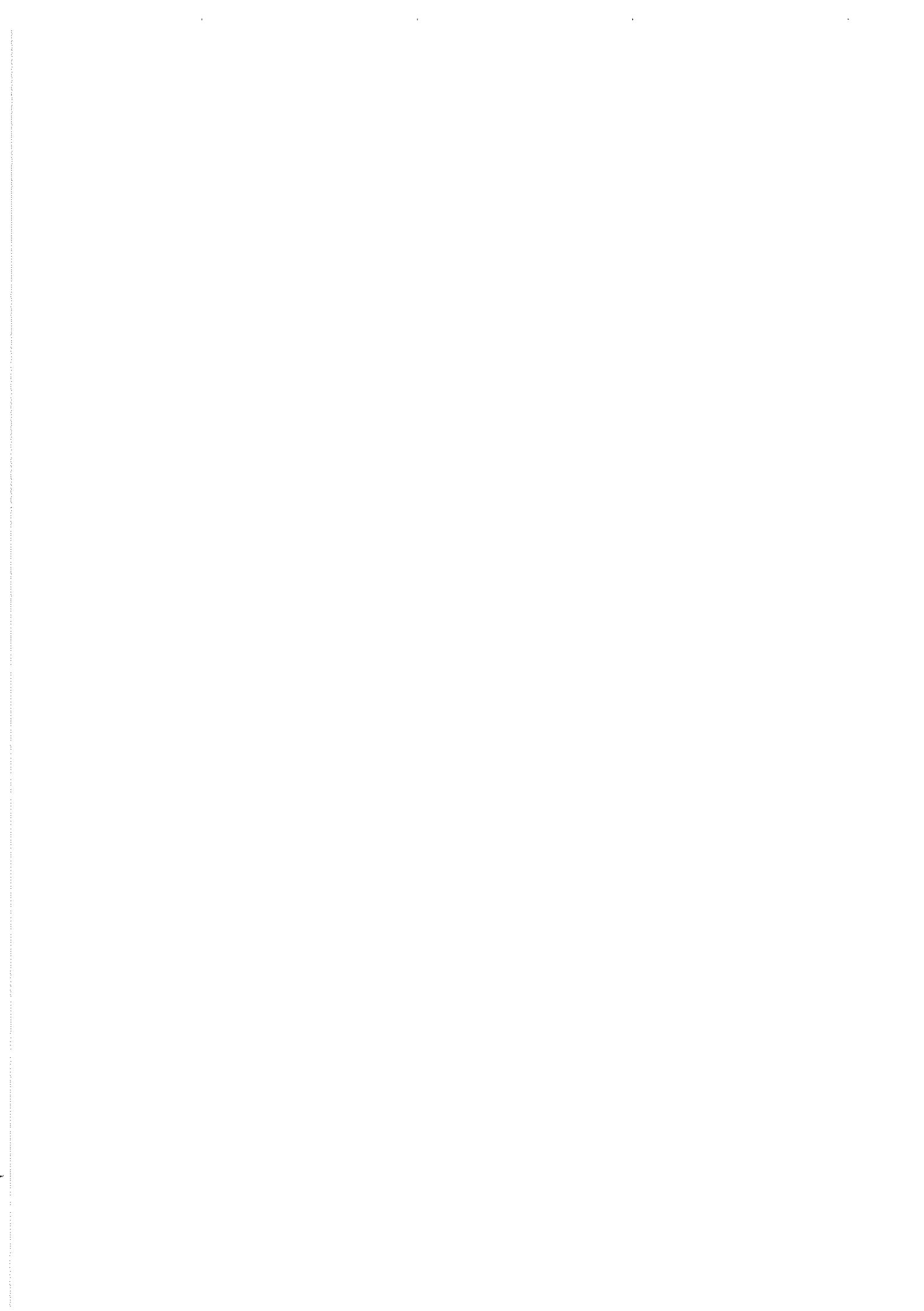
# Resumo

Este trabalho apresenta o procedimento que desenvolvemos e empregamos para determinar os valores a serem adotados para as energias de um conjunto de raios gama comumente utilizados como padrões de calibração, bem como sua respectiva matriz de covariância, esta obtida pela primeira vez. A matriz de covariância entre as energias destes padrões revelou muitos casos de correlações com valores absolutos maiores que 0,8, correlações estas que precisam ser corretamente consideradas para não comprometer a qualidade das análises efetuadas com o uso daquelas energias. No procedimento desenvolvido foi considerada a relação entre as energias dos raios gama (em múltiplos de eV) e as constantes fundamentais das quais dependem:  $h$ ,  $e$ ,  $c$  e o parâmetro de rede do Silício ( $a_{Si}$ ), o que possibilitou atualizar os resultados para as constantes fundamentais recomendadas de 2002. Uma metodologia para a inclusão de novos resultados experimentais ao conjunto de padrões de modo a preservar sua auto-consistência também foi desenvolvida neste trabalho. Este método considera adequadamente as covariâncias e atualiza todo o conjunto de padrões para incorporar as novas informações experimentais em uma única etapa. Por fim, utilizamos as metodologias de análise desenvolvidas e o conjunto de padrões aqui recomendados para analisar dados de medidas dos raios gama do decaimento  $\alpha$  do  $^{233}\text{U}$  e, assim, estudar a adequação de três diferentes modelos de estrutura nuclear para o  $^{229}\text{Th}$ , bem como as energias de excitação dos estados nucleares. A energia do primeiro estado excitado do  $^{229}\text{Th}$ , um estado metaestável de energia inferior a 10 eV, foi determinada com base naqueles diferentes modelos.



# Abstract

This work presents the procedure which we developed and employed to determine the values to be adopted for the energies of a set of gamma-rays in common use as calibration standards, publishing for the first time their respective covariance matrix. Several correlations with absolute values exceeding 0.8 were found, revealing the necessity of considering correctly the covariance matrix in any analysis to be done with the use of these standards in order not to interfere with the quality of the analysis. The procedure here presented considers correctly the relation between the gamma-ray energies (given in eV) and the fundamental constants  $h$ ,  $e$ ,  $c$ , besides with the lattice parameter ( $a_{\text{Si}}$ ), allowing the updating of the set with respect to the 2002 recommended values of those constants. A methodology for the inclusion of new experimental results in the set of standards, in a way which preserve its self-consistency, was also developed in this work. In this method the updating of the whole set of standards is performed in one single step, while considering adequately the covariances. Finally, the here recommended standard set and the methodology developed were employed to analyze data of measurement of gamma-rays which follow the  $^{233}\text{U}$   $\alpha$  decay and therewith to decide about the adequacy of three different nuclear structure models for  $^{229}\text{Th}$  and the excitation energy of its nuclear states. The energy of the first excited state of  $^{229}\text{Th}$ , a meta-stable state of less than 10 eV, was determined taking into account those different models.



# **Capítulo I. Introdução**

A disponibilidade de padrões precisos e confiáveis é importante para fomentar os avanços tecnológico e científico, uma vez que estes continuamente exigem, e simultaneamente possibilitam, o progresso dos padrões disponíveis. De fato, há uma evolução circular em ciência e tecnologia, já que resultados experimentais precisos só podem ser obtidos com a utilização de padrões de elevada precisão, os quais, por sua vez, dependem de inovações técnicas e científicas que proporcionam a realização de medições com precisão crescente.

A ampliação do conhecimento científico envolve confrontar resultados experimentais obtidos por várias técnicas, já que o completo conhecimento da função-resposta dos equipamentos e a acurácia das medições não podem ser garantidos a priori. Decorre daí a necessidade de um conjunto, freqüentemente amplo, de padrões secundários para a calibração de equipamentos experimentais. Tal conjunto de padrões deve ser baseado em resultados de experimentos precisos, entretanto a auto-consistência é certamente sua qualidade mais desejável. A auto-consistência do conjunto é que garante, em princípio, a equivalência dos resultados obtidos utilizando quaisquer subconjuntos dos padrões. Assim, para que resultados experimentais sejam acrescentados a um conjunto de padrões é necessários que sejam compilados e incorporados de modo a manter a auto-consistência do mesmo.

Técnicas de análise de dados baseadas em propriedades estatísticas desejáveis, quais sejam, não tendenciosidade, consistência e mínima variância dos valores representativos de um conjunto de dados aleatórios, são auxiliares preciosos nesta tarefa. O presente trabalho ocupa-se em mostrar a potencialidade destas técnicas no caso específico da Espectroscopia Gama. Nesta área de estudo, padrões de energia gama são necessários principalmente para a calibração de detectores, que são utilizados para determinar a energia de raios gama. Estes padrões gama, por sua vez,

correspondem a energias de raios gama, representando uma condição circular semelhante à referida acima. A compilação de Helmer e van der Leun<sup>[1]</sup> é um dos conjuntos de padrões mais amplos em uso na Espectroscopia Gama.

Entretanto, é necessário frisar que não basta dispor de conjuntos de valores recomendados para a energia (e/ou intensidade) de raios gama adequados para serem utilizados como padrões de calibração: é absolutamente essencial conhecer, além de seus valores e incertezas, as respectivas covariâncias.

Embora a covariância entre variáveis aleatórias seja um tema bem conhecido em Estatística, ela ainda vem sendo incorporada pela Física Experimental. Provavelmente um dos motivos que levaram a esta tardia consideração das covariâncias estava na dificuldade em efetuar os cálculos envolvendo as matrizes de covariâncias (principalmente inversões de matrizes) antes da ampla disponibilidade de computadores capazes de fazer rapidamente as operações necessárias.

Um trabalho de grande repercussão sobre covariâncias em Física Experimental foi o de Mannhart<sup>[2]</sup> em 1981, que chamou a atenção para importância da correta consideração das covariâncias na avaliação de resultados experimentais, usando exemplos de medidas de seção de choque de reações ( $n, X$ ) e de intensidades de transições gama.

As covariâncias são indispensáveis para preservar a auto-consistência de conjuntos de valores recomendados para padrões<sup>[3]</sup>, pois possibilitam determinar os efeitos em todas as grandezas do conjunto em decorrência das alterações provocadas no conhecimento de qualquer uma delas quando, por exemplo, se obtém um novo resultado experimental.

Buscando, em princípio, a auto-consistência em relação às energias de raios gama, Helmer e van der Leun publicaram, em 2000<sup>[1]</sup>, sua compilação de resultados experimentais de medidas precisas de energias gama para fornecer um conjunto de valores recomendados para cerca de 300 raios gama adequados para serem utilizados como padrões para calibração de detectores semicondutores.

Os dados experimentais utilizados por aqueles autores podem ser agrupados segundo sua origem, em quatro tipos de experimentos: medidas “absolutas” de comprimento de onda, medidas relativas de comprimento de onda, medidas de diferença de energia em detectores semicondutores e medidas com detectores semicondutores calibrados.

Nos experimentos do primeiro tipo, medidas “absolutas” de comprimentos de onda, determina-se, na verdade, a razão entre o comprimento de onda do raio gama e o parâmetro de rede de cristais de Silício ou Germânio utilizados no espectrômetro, e não o valor “absoluto” do comprimento de onda da transição gama.

Os parâmetros de rede dos cristais utilizados no espectrômetro, por sua vez, foram determinados em relação ao parâmetro de rede,  $a_{Si}^{\#}$ , de um cristal hiperpuro de Silício que, neste trabalho, identificaremos por PERFX XROI. Assim, a energia de todos os raios gama determinados nas medidas “absolutas” de comprimentos de onda são proporcionais a relação,  $f = E_{\lambda} / a_{Si}^{\#}$ , que também envolve o fator de conversão de comprimento de onda em energia,  $E_{\lambda} = h.c / e$  (onde  $h$  é a Constante de Planck,  $c$  a velocidade de luz e  $e$  a carga elementar).

Nos outros tipos de experimentos considerados por aqueles autores são determinadas apenas relações entre energias dos raios gama, sendo todas as energias assim determinadas também proporcionais a  $f$ .

Como consequência dos dados experimentais considerados na ref. 1, as energias de raios gama são covariantes entre si e com as constantes fundamentais. Porém, a matriz de covariância das energias dos padrões de calibração, apesar de essencial para a correta utilização dos padrões, não foi, entretanto, determinada por Helmer e van der Leun<sup>11</sup>. Uma das contribuições do presente trabalho é a determinação de um conjunto de energias de raios gama padrões para calibração com matriz de covariância conhecida.

Além disso, os valores recomendados para as constantes fundamentais têm sido revisados de maneira sistemática<sup>[4, 5, 6, 7]</sup> pelo CODATA (“Committee on Data for Science and Technology”). A referência 1 adotou os valores para as constantes fundamentais da compilação de 1986<sup>[5]</sup>. Porém, após esta, já foram divulgados os resultados de duas novas compilações de valores para as constantes fundamentais: o CODATA 1998<sup>[6]</sup> e o CODATA 2002<sup>[7]</sup>. No presente trabalho determinamos a alteração nos valores e na matriz de covariância do conjunto de padrões quando se utilizam os valores para as constantes fundamentais de 2002. Parte destes resultados de atualização, contendo as alterações produzidas nas energias do raio gama de 411keV do  $^{198}\text{Au}$  e dos raios gama do  $^{192}\text{Ir}$  quando são adotadas as constantes fundamentais de 1998, foram publicadas em 2002<sup>[8]</sup>. As principais correlações entre as energias dos raios gama do conjunto de padrões já haviam sido publicadas em 2001<sup>[9]</sup>, ainda com a análise baseada nos valores das constantes fundamentais de 1986.

Como contribuição para aplicação em quaisquer situações de medições que envolvem calibração de equipamentos, foi ainda desenvolvido, neste trabalho, um método para análise de dados experimentais com equipamentos de escala arbitrária, como são, por exemplo, as medições com detectores semicondutores. Este método, que chamaremos de Método do Ajuste Único, efetua, em uma única etapa, a calibração do equipamento, a determinação dos novos valores para as grandezas observadas e a atualização dos padrões de calibração produzida pela consideração das informações adicionadas pelo experimento. Este método, publicado em 2003<sup>[10]</sup>, foi também utilizado em um mestrado defendido no IFUSP<sup>[11]</sup>.

Finalmente, como demonstração da importância de uma análise consistente também para Física Básica, em particular quando estão disponíveis medidas precisas de energia de transições gama, apresentamos uma revisão do esquema de decaimento gama do  $^{229}\text{Th}$ . Este, por apresentar o primeiro nível nuclear excitado com energia comparável com a energia de ligação dos elétrons menos ligados do Tório<sup>[12, 13]</sup>, tem despertado bastante interesse por sua utilização no estudo do acoplamento de graus

de liberdade nucleares e atômicos<sup>[14, 15, 16, 17]</sup> e potencial aplicação no desenvolvimento de um “laser nuclear”<sup>[18, 19, 20]</sup>.

A meia vida daquele estado tem sido investigada recentemente apresentando, entretanto, resultados inconsistentes<sup>[21, 22]</sup>. Esta inconsistência pode estar relacionada com a composição química das amostras estudadas, uma vez que, se a energia do estado metaestável for inferior à energia de ligação do elétron menos ligado do Tório (~5,9 eV)<sup>[23]</sup>, o decaimento via conversão eletrônica interna, com a liberação de um elétron, não pode ocorrer. Porém, pode haver decaimento pela excitação de elétrons entre níveis eletrônicos ligados, o que implica na dependência da meia vida deste estado com as propriedades químicas e físicas da amostra, abrindo interessantes perspectivas para estudos nas áreas de física atômica e da matéria condensada<sup>[13]</sup>.

Como ainda não foi possível observar diretamente a transição eletromagnética entre aquele estado excitado e o estado fundamental do  $^{229}\text{Th}$ <sup>[24, 25]</sup>, a determinação de sua energia foi realizada por Reich e Helmer<sup>[13, 12]</sup> a partir de medições precisas das energias das transições gama emitidas pelo  $^{229}\text{Th}$  com o uso de detectores semicondutores. Assim, a determinação da energia daquele estado também depende de considerações sobre o esquema de decaimento do  $^{229}\text{Th}$ , que ainda não está completamente estabelecido. Recentemente (2002 e 2003) foram apresentadas duas propostas para o esquema de decaimento do  $^{229}\text{Th}$ , diferentes da considerada por Reich e Helmer<sup>[13, 12]</sup>, uma por Gulda e colaboradores<sup>[26]</sup> e outra por Barci e colaboradores<sup>[27]</sup>, baseadas em modelos para a estrutura nuclear desse isótopo.

Utilizando os resultados da reanálise dos padrões de calibração efetuados neste trabalho e os dados experimentais disponíveis na literatura, empregamos o procedimento de análise desenvolvido para avaliar qual dos esquemas de decaimento e, portanto, qual modelo nuclear é mais consistente com as energias das transições gama determinadas experimentalmente. Também determinamos o efeito das três propostas de esquemas de decaimento sobre o valor a ser considerado para a energia do primeiro nível excitado do  $^{229}\text{Th}$ . Vale a pena salientar que essa análise só foi

possível porque as energias das transições gama padrões de calibração são conhecidas com precisões da ordem de elétron-volt.

Para a orientação do leitor indicamos a seguir a seqüência de temas abordados na presente tese.

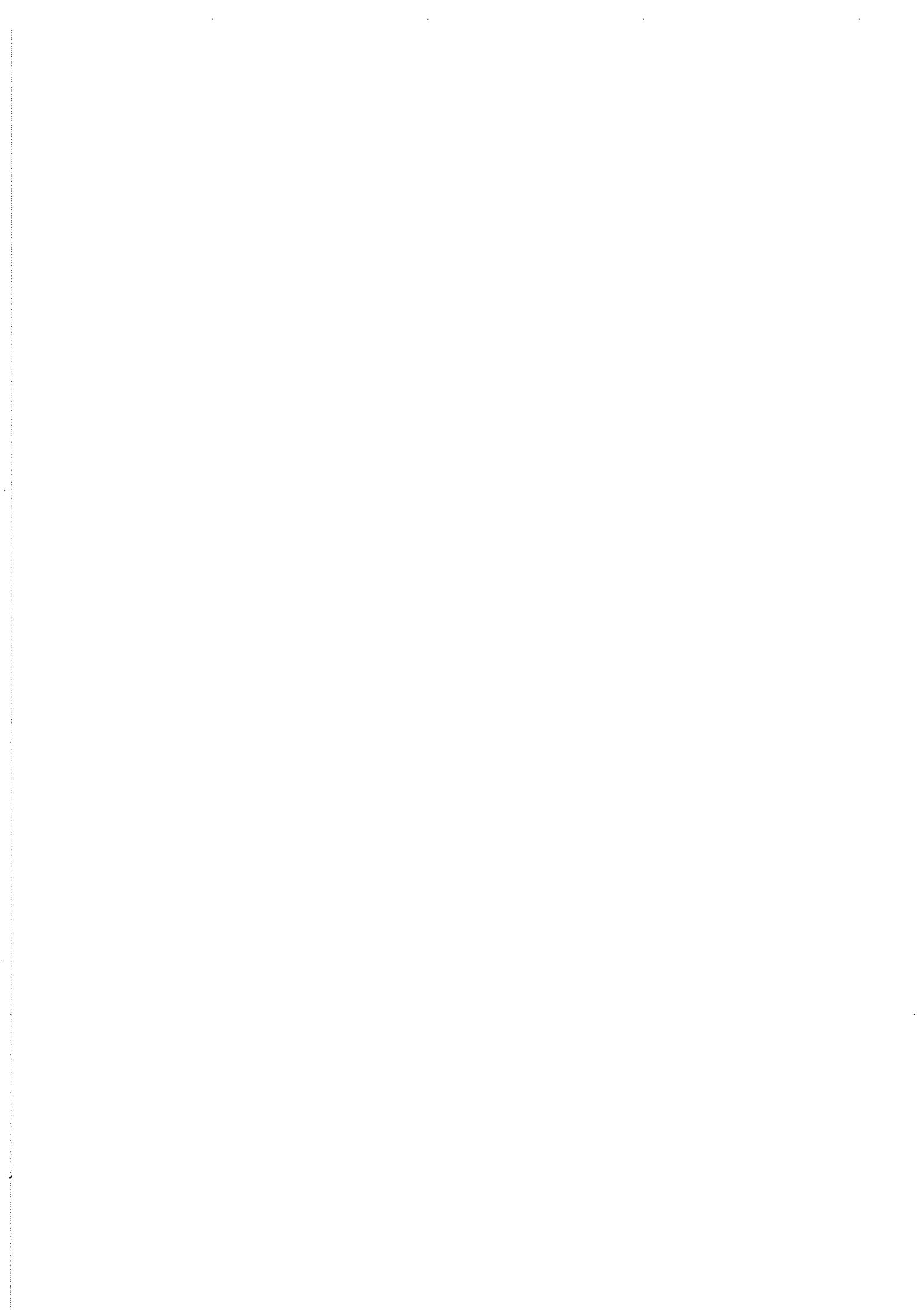
No Capítulo II descrevemos a metodologia e os dados experimentais utilizados para determinar os valores recomendados para as energias de um conjunto de 330 raios gama adequados para serem utilizados como padrões para a calibração de detectores semicondutores. Para avaliar os efeitos da diferença na metodologia de análise com relação à empregada na compilação de Helmer e van der Leun<sup>[1]</sup>, os dados utilizados para as energias gama e os valores adotados para as constantes fundamentais das quais as energias gama dependem foram os mesmos da ref. 1, isto é, utilizamos nesta parte do trabalho os valores recomendados pelo CODATA 86 para as constantes fundamentais.

Assim, o procedimento desenvolvido para reavaliar o conjunto de padrões de energias gama e determinar sua matriz de covariância é apresentado no Capítulo II e os resultados obtidos no Capítulo III, juntamente com a análise desses resultados. Essas análises incluem: a interpretação das origens das maiores correlações (em módulo); a avaliação dos efeitos das incertezas dos valores adotados para as constantes fundamentais envolvidas em  $f$  (e a determinação do valor de  $f$  obtido apenas do conjunto das energias dos raios gama); e algumas discussões dos efeitos das diferenças de procedimento com relação à compilação, efetuada sobre os mesmos dados, da ref. 1.

A atualização do conjunto de padrões de energias de raios gama para torná-los compatíveis com as constantes fundamentais mais recentes, de 2002, é efetuada no Capítulo IV, no qual também são apresentadas discussões sobre os efeitos desta atualização.

O Capítulo V desenvolve o Método do Ajuste Único (MAU), explicitando como incorporar informações experimentais novas de forma auto-consistente em procedimentos de calibração de equipamentos.

A análise da consistência das três propostas para o esquema de decaimento gama do  $^{229}\text{Th}$  com as informações experimentais disponíveis, e a consequente determinação da energia do seu primeiro nível nuclear excitado, é o tema do Capítulo VI. As conclusões a que o presente estudo permite chegar são, por fim, apresentadas no Capítulo VII.



## Capítulo II. Reavaliação dos padrões de calibração de energia gama

A necessidade de um conjunto de energias de raios gama adequados para serem utilizados como padrões para a calibração de detectores semicondutores foi reconhecida em 1971 pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA<sup>\*</sup>), após a constatação de que sua falta acarretava dificuldades ao avanço de várias áreas de pesquisa que utilizavam a técnica de espectroscopia gama<sup>[28]</sup>.

Um conjunto de padrões de energias de raios gama foi determinado por Helmer, van Assche e van der Leun em 1979<sup>[28]</sup> utilizando os valores das constantes fundamentais de 1973<sup>[4]</sup>. A divulgação de outro conjunto de valores recomendados para as constantes fundamentais, CODATA 1986<sup>[5]</sup>, alterou substancialmente os valores adotados e as incertezas das constantes fundamentais das quais as energias gama dependem. Esta mudança nas constantes fundamentais, aliada à disponibilização de diversos resultados experimentais de medidas precisas de energias gama, resultaram na necessidade de uma outra compilação do conjunto de padrões de raios gama.

Em 2000, Helmer e van der Leun<sup>[11]</sup> divulgaram um novo conjunto de padrões de energia de raios gama. Para a determinação desse conjunto de padrões, foram consideradas medidas de energia de raios gama, utilizando tanto espectrômetros baseados na difração em cristal quanto detectores semicondutores, além de relações entre energias de raios gama baseadas nos esquemas de decaimento.

---

\* Em inglês, International Atomic Energy Agency.

Entretanto, as covariâncias entre as energias, apesar do reconhecimento de sua relevância pelos autores, não foram determinadas na ref. 1, embora sejam necessárias para garantir a confiabilidade de todos os resultados de análises e testes estatísticos que vierem a ser efetuados com o uso daqueles dados. De fato, a determinação da matriz de covariância das energias é fundamental, principalmente por se tratar de padrões de calibração.

O procedimento que empregamos para determinar os valores das energias dos padrões, e a respectiva matriz de covariância, consiste em efetuar um ajuste pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), incluindo como dados todas as informações experimentais envolvidas nestas determinações: valores adotados para as constantes fundamentais, resultados de medidas por difração em cristais, resultados de medidas em detectores semicondutores e relações entre as energias gama baseadas no esquema de decaimento. Os parâmetros a serem determinados pelo ajuste são: as energias dos raios gama; as energias dos níveis nucleares envolvidos nas relações baseadas nos esquemas de decaimento; e a relação entre as constantes fundamentais de que as energias dos raios gama dependem.

Como consequência da diferença de procedimento entre o que empregamos e o utilizado por Helmer e van der Leun, os valores recomendados para as energias dos padrões de calibração gama e respectivas incertezas, embora baseados nas mesmas informações experimentais, não são iguais. Para facilitar a compreensão da origem das diferenças devidas apenas ao procedimento de análise empregado, inicialmente (neste capítulo e no próximo) consideramos os valores das constantes fundamentais do CODATA 86<sup>[5]</sup>, embora nossos valores recomendados para as energias de raios gama sejam os determinados no Capítulo IV (baseados nos valores atualizados para as constantes fundamentais<sup>[7]</sup>).

## ***II.1 - Seleção das informações experimentais***

A escolha de quais informações experimentais considerar (e, consequentemente, quais não considerar) dentre todos os resultados disponíveis na literatura é uma etapa fundamental para a aceitação e utilização pela comunidade científica do conjunto de padrões obtidos como resultado de uma compilação. A credibilidade do responsável por esta seleção frente à comunidade científica foi o motivo pelo qual optamos por considerar em nossa reavaliação exatamente as mesmas informações experimentais e as mesmas relações baseadas em esquemas de decaimento selecionadas e consideradas por Helmer e van der Leun na ref. 1.

Com o objetivo de fornecer um conjunto de padrões de energias de raios gama que sejam adequados para serem utilizados para a calibração de detectores semicondutores, Helmer e van der Leun<sup>[1]</sup> estabeleceram a disponibilidade para o experimentador como o principal critério para seleção de quais fontes radioativas incluir na avaliação. Assim, foram incluídas fontes de fácil obtenção (vendidas comercialmente ou de produção simples) e comumente utilizadas para determinar a curva de calibração de energia (ou de eficiência) de detectores semicondutores.

Os critérios adicionais para a inclusão dos dados experimentais estabelecidos pela ref. 1 foram os seguintes:

- Trabalhos publicados ou aceitos para publicação\*;
- Medidas de comprimentos de onda, ou cuja conversão para comprimentos de onda seja facilmente efetuada com as informações disponíveis no trabalho;
- Experimentos bem documentados, que permitam avaliação da qualidade do trabalho;
- Resultados de boa qualidade e precisão, com incertezas relativas inferiores a  $10 \text{ ppm}$  ( $10 \cdot 10^{-6}$ ).

---

\* Houve uma exceção à esta regra no caso de alguns dados de medidas relativas do  $^{160}\text{Tb}$  que aparecem na referência 1 citando uma comunicação privada de J.J. Reidy<sup>[42]</sup>.

Para os dados de espectroscopia gama com detectores semicondutores, a ref. 1 ainda exigiu que:

- Tenham sido utilizados pelo menos dois detectores diferentes;
- As amostras de interesse e de calibração tenham sido medidas simultaneamente e com as fontes colocadas próximas umas das outras para evitar os efeitos de variação da posição dos fotópicos com relação ao tempo (passeio) e com a posição da amostra.

## ***II.2 – A construção do ajuste***

A principal diferença no procedimento de análise apresentado neste trabalho com relação ao da ref. 1 reside na forma como as informações experimentais foram consideradas para a obtenção das energias do conjunto de padrões de calibração. Assim, enquanto Helmer e van der Leun<sup>[1]</sup> consideraram os dados experimentais obtidos através da medida de relações entre dois raios gama como sendo úteis para a determinação da energia de apenas um deles, neste trabalho consideramos estas informações como úteis para a determinação simultânea das energias de ambos. Este é um ponto central e reflete o modo como serão consideradas todas as situações de tratamento de dados neste trabalho.

Para facilitar o entendimento desta diferença de procedimento, tomemos o exemplo da determinação de três grandezas A, B e C, tendo à disposição os dados experimentais apresentados no Quadro II-1.

**Quadro II-1 - Identificação dos dados disponíveis sobre as grandezas A, B e C.**

<i>Representação</i>	<i>Significado</i>
$x_A$	<i>Medida direta do valor da grandeza A;</i>
$x_B$	<i>Medida direta do valor da grandeza B;</i>
$x_C$	<i>Medida direta do valor da grandeza C;</i>
$d_{AB}$	<i>Medida da diferença entre as grandezas A e B;</i>
$d_{BC}$	<i>Medida da diferença entre as grandezas B e C.</i>

Para simplificar, porém sem perder a generalidade, consideremos o caso em que todos os dados experimentais ( $x_A$ ,  $x_B$ ,  $x_C$ ,  $d_{AB}$  e  $d_{BC}$ ) sejam estatisticamente independentes uns dos outros e possuam incertezas iguais ( $\sigma_0$ ). Segundo o procedimento de tratamento de dados da ref. 1, há, basicamente, três possíveis caminhos para a análise deste dados:

## **Caminho 1**

- 1º Passo: Determinar  $x_B' = x_C + d_{BC}$ ;
- 2º Passo: Determinar o valor a ser adotado para a grandeza B,  $x_{B1}$ , como a média ponderada entre  $x_B$  e  $x_B'$ ;
- 3º Passo: Determinar  $x_A' = x_{B1} + d_{AB}$ ;
- 4º Passo: Determinar o valor a ser adotado para grandeza A,  $x_{A1}$ , como a média ponderada entre  $x_A$  e  $x_A'$ .

O valor a ser adotado para a grandeza C,  $x_{C1}$ , segundo este caminho será  $x_C$ , portanto permanecendo inalterado.

## **Caminho 2**

- 1º Passo: Determinar  $x_B' = x_A - d_{AB}$  e  $x_B'' = x_C + d_{BC}$ ;
- 2º Passo: Determinar o valor a ser adotado para a grandeza B,  $x_{B2}$ , como a média ponderada entre  $x_B$ ,  $x_B'$  e  $x_B''$ ;

Neste caso, os valores a serem adotados para as grandezas A,  $x_{A2}$ , e C,  $x_{C2}$ , seriam  $x_A$  e  $x_C$ , respectivamente, permanecendo inalterados.

### Caminho 3

1º Passo: Determinar  $x_B' = x_A - d_{AB}$ ;

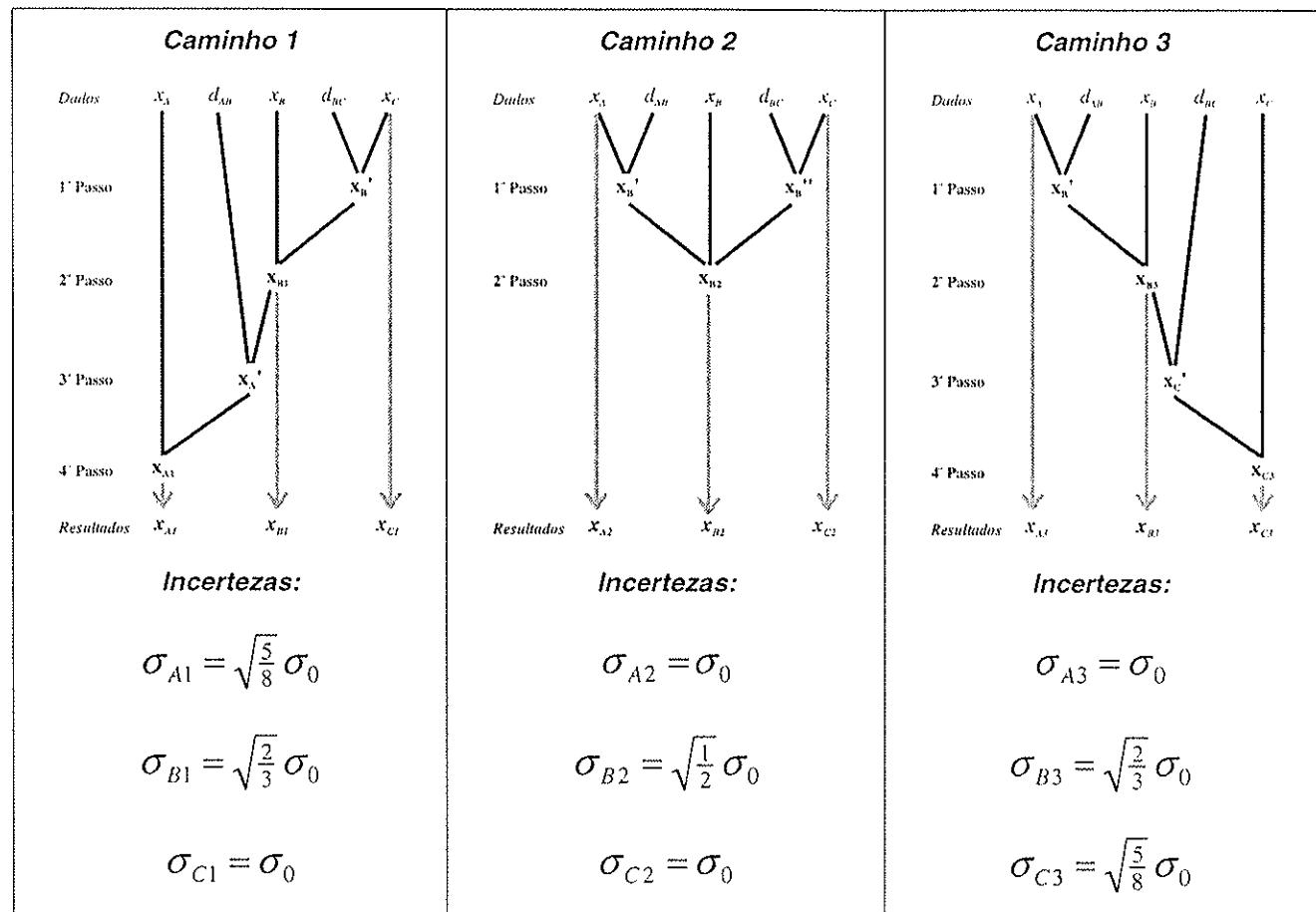
2º Passo: Determinar o valor a ser adotado para a grandeza **B**,  $x_{B3}$ , como a média ponderada entre  $x_B$  e  $x_B'$ ;

3º Passo: Determinar  $x_C' = x_{B3} - d_{BC}$ ;

4º Passo: Determinar o valor a ser adotado para a grandeza **C**,  $x_{C3}$ , como a média ponderada entre  $x_C$  e  $x_C'$ .

O valor adotado para grandeza **A**,  $x_{A3}$ , será  $x_A$ , permanecendo inalterado.

A opção por um dos caminhos, 1, 2 ou 3, é determinada pela incerteza dos dados e pela escolha da(s) grandeza(s) para a qual(is) se deseja obter a melhor precisão, uma vez que a precisão final das grandezas **A**, **B** e **C** depende do caminho utilizado. A grandeza **A** é determinada com melhor precisão pelo caminho 1, enquanto a melhor precisão para **B** é obtida com o caminho 2 e a melhor precisão para **C** com o caminho 3. A Figura II.1 apresenta uma representação gráfica destes três caminhos, bem como as correspondentes incertezas finais obtidas para cada uma das grandezas.



**Figura II.1- Representação esquemática dos três caminhos considerados e as correspondentes incertezas finais.**

O exemplo evidencia que nesse modo de interpretar os dados experimentais a incerteza final das grandezas é dependente de escolhas arbitrárias efetuadas durante o procedimento de análise, o que revela que não está sendo aproveitada toda a informação contida nos dados.

Vamos agora aplicar, para este mesmo exemplo, o modo de interpretar as informações experimentais que utilizamos neste trabalho, onde a determinação dos valores das grandezas **A**, **B** e **C** é efetuada por um ajuste pelo Método dos Mínimos Quadrados ao conjunto de dados. A primeira etapa consiste em definir as relações entre as informações experimentais e os valores verdadeiros (e desconhecidos) das grandezas ( $x_A^0$ ,  $x_B^0$  e  $x_C^0$ ). Para este exemplo, (dados do Quadro II-1), temos que:

$$x_A = x_A^0 + \varepsilon_{x_A} \quad (1)$$

$$x_B = x_B^0 + \varepsilon_{x_B} \quad (2)$$

$$x_C = x_C^0 + \varepsilon_{x_C} \quad (3)$$

$$d_{AB} = x_A^0 - x_B^0 + \varepsilon_{d_{AB}} \quad (4)$$

$$d_{BC} = x_B^0 - x_C^0 + \varepsilon_{d_{BC}} \quad (5)$$

onde os erros  $\varepsilon$  são as diferenças entre o valor experimental da grandeza e seu valor verdadeiro (por exemplo:  $\varepsilon_{x_A} = x_A - x_A^0$ ) e, assim como os valores verdadeiros das grandezas, também são desconhecidos, porém se relacionam com as incertezas experimentais por  $\langle \varepsilon^2 \rangle = \sigma^2$ , onde  $\langle \rangle$  representa o valor esperado da grandeza.

Podemos escrever as equações de (1) a (5) usando o formalismo matricial como

$$\begin{pmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \\ d_{AB} \\ d_{BC} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_A^0 \\ x_B^0 \\ x_C^0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{x_A} \\ \varepsilon_{x_B} \\ \varepsilon_{x_C} \\ \varepsilon_{d_{AB}} \\ \varepsilon_{d_{BC}} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

que é uma equação do tipo

$$\vec{Y} = \mathbf{X} \cdot \vec{\mathbf{A}}^0 + \vec{\varepsilon}, \quad (7)$$

onde o vetor  $\vec{Y}$  é comumente chamado de vetor de dados, a matriz  $\mathbf{X}$  de matriz de planejamento e o vetor  $\vec{\varepsilon}$  é chamado de vetor de erros. O vetor de erros está relacionado com a matriz de covariância dos dados por:  $\mathbf{V}_Y = \langle \vec{\varepsilon} \cdot \vec{\varepsilon}^T \rangle$ , onde o índice T é usado para indicar transposição, sendo  $\vec{\varepsilon}^T$  o vetor linha obtido pela transposição do vetor de erros.

O vetor  $\vec{\mathbf{A}}^0$  contém os valores verdadeiros, e desconhecidos, das grandezas que desejamos determinar no ajuste, e por isso é conhecido como vetor dos valores verdadeiros dos parâmetros.

As estimativas dos parâmetros pelo Método dos Mínimos Quadrados são obtidas a partir da determinação de qual é o vetor de parâmetros que minimiza a variável

$$Q = (\bar{\mathbf{Y}} - \mathbf{X} \cdot \bar{\mathbf{A}})^T \cdot (\mathbf{V}_Y)^{-1} \cdot (\bar{\mathbf{Y}} - \mathbf{X} \cdot \bar{\mathbf{A}})$$

onde o índice  $-1$  representa o inverso da matriz. A solução é dada por<sup>[29]</sup>

$$\tilde{\mathbf{A}} = [\mathbf{X}^T \cdot (\mathbf{V}_Y)^{-1} \cdot \mathbf{X}]^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot (\mathbf{V}_Y)^{-1} \cdot \bar{\mathbf{Y}}, \quad (8)$$

onde  $\tilde{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} \tilde{x}_A \\ \tilde{x}_B \\ \tilde{x}_C \end{pmatrix}$  é o vetor com as estimativas dos parâmetros verdadeiros  $\bar{\mathbf{A}}^0$ , que no

caso deste exemplo correspondem aos valores das grandezas **A**, **B** e **C**. A matriz de covariância dos valores estimados dos parâmetros,

$$\mathbf{V}_{\tilde{\mathbf{A}}} = \begin{pmatrix} \sigma_{\tilde{x}_A}^2 & cov(\tilde{x}_A, \tilde{x}_B) & cov(\tilde{x}_A, \tilde{x}_C) \\ cov(\tilde{x}_A, \tilde{x}_B) & \sigma_{\tilde{x}_B}^2 & cov(\tilde{x}_B, \tilde{x}_C) \\ cov(\tilde{x}_A, \tilde{x}_C) & cov(\tilde{x}_B, \tilde{x}_C) & \sigma_{\tilde{x}_C}^2 \end{pmatrix}, \text{ é calculada por}$$

$$\mathbf{V}_{\tilde{\mathbf{A}}} = [\mathbf{X}^T \cdot (\mathbf{V}_Y)^{-1} \cdot \mathbf{X}]^{-1}. \quad (9)$$

Usando este procedimento no caso das medidas apresentadas no Quadro II-1, as incertezas das estimativas e a matriz de covariância dos parâmetros são:

$$\sigma_{\tilde{x}_A} = \sqrt{\frac{5}{8}} \sigma_0$$

$$\sigma_{\tilde{x}_B} = \sqrt{\frac{1}{2}} \sigma_0$$

$$\sigma_{\tilde{x}_C} = \sqrt{\frac{5}{8}} \sigma_0$$

$$\mathbf{V}_{\tilde{\mathbf{A}}} = (\sigma_0)^2 \begin{pmatrix} \frac{5}{8} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{4} & \frac{5}{8} \end{pmatrix}.$$

É importante perceber que as incertezas obtidas para as três grandezas **A**, **B** e **C** são iguais às menores incertezas obtidas para cada uma delas dentre os caminhos **1**, **2** e **3**, ou seja, o procedimento que empregamos equivale a aplicar simultaneamente

todos os caminhos e tomar como estimativa para cada uma das grandezas aquele que resulta na menor incerteza para aquela grandeza.

Observando que, somente quanto às medidas de diferença de energia com detectores semicondutores, são considerados cerca de 270 dados experimentais, fica óbvio que quando é usado o procedimento da referência 1 muita informação é perdida por conta da necessidade de se estabelecer um caminho para efetuar a análise dos dados. O procedimento aqui proposto, além de resultar em valores mais precisos, simultaneamente para todas as energias, ainda facilita determinar a matriz de covariância dos parâmetros ajustados.

A matriz de covariância é indispensável para a correta utilização dos resultados obtidos e, embora contenha toda a informação necessária para avaliar a interdependência entre os resultados das grandezas, é de difícil interpretação qualitativa. Para facilitar a interpretação das dependências estatísticas comuns entre diversas grandezas é mais conveniente avaliar as correlações<sup>[30]</sup>, que se relacionam com a matriz de covariância por

$$\rho_{AB} = \frac{cov(A, B)}{\sigma_A \cdot \sigma_B}. \quad (10)$$

Assim, a matriz de correlação para os dados deste exemplo é

$$\rho_{\tilde{A}} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{\sqrt{5}}{5} & \frac{1}{5} \\ \frac{\sqrt{5}}{5} & 1 & \frac{\sqrt{5}}{5} \\ \frac{1}{5} & \frac{\sqrt{5}}{5} & 1 \end{pmatrix},$$

onde percebemos que as estimativas das grandezas **A** e **C** são menos correlacionadas entre si (0,2) do que com **B** (~0,45). A origem desta diferença de correlações está no fato de haver medidas da diferença entre as grandezas **A** e **B** ( $d_{AB}$ ) e entre **B** e **C** ( $d_{BC}$ ) e não entre **A** e **C**. Um efeito prático desta diferença de correlações será que, por exemplo, uma nova informação sobre a grandeza **A** produzirá alteração tanto nos

valores adotados\* quanto nas incertezas das outras grandezas, porém afetando mais a grandeza **B** do que a **C**.

É importante salientar que, embora no procedimento tradicional (com a escolha de determinados caminhos para efetuar a análise<sup>[55, 107]</sup>) a informação contida nos dados não seja aproveitada de forma completa (isto é, a variância mínima do conjunto não é alcançada), este, assim como o procedimento que empregamos (análise pelo MMQ), é não tendencioso. Os efeitos da diferença entre os procedimentos de análise ficarão mais claros durante a apresentação das etapas de construção do ajuste nas seções a seguir e nas discussões dos resultados, no Capítulo III.

### ***II.3 – Classificação das informações consideradas***

Conforme já exposto, foram considerados os dados experimentais de medidas baseadas em dois princípios físicos diferentes (difração em cristais e formação de pares elétron-lacuna em detectores semicondutores), além de relações físicas baseadas nos esquemas de decaimento.

Para fins de classificação quanto ao modo como os dados são incluídos no ajuste, cada um dos dois tipos de medida foi subdividido em dois grupos, relacionados com detalhes da metodologia experimental empregada. Para facilitar a visualização dos tipos de informações consideradas, a Figura II.2 traz a representação dos tipos de dados e os correspondentes grupos.

---

\* A alteração no valor adotado pode não ocorrer. Para isso, o valor da nova informação experimental sobre *A* deve coincidir numericamente com o valor anterior obtido para *A* pela equação (8).

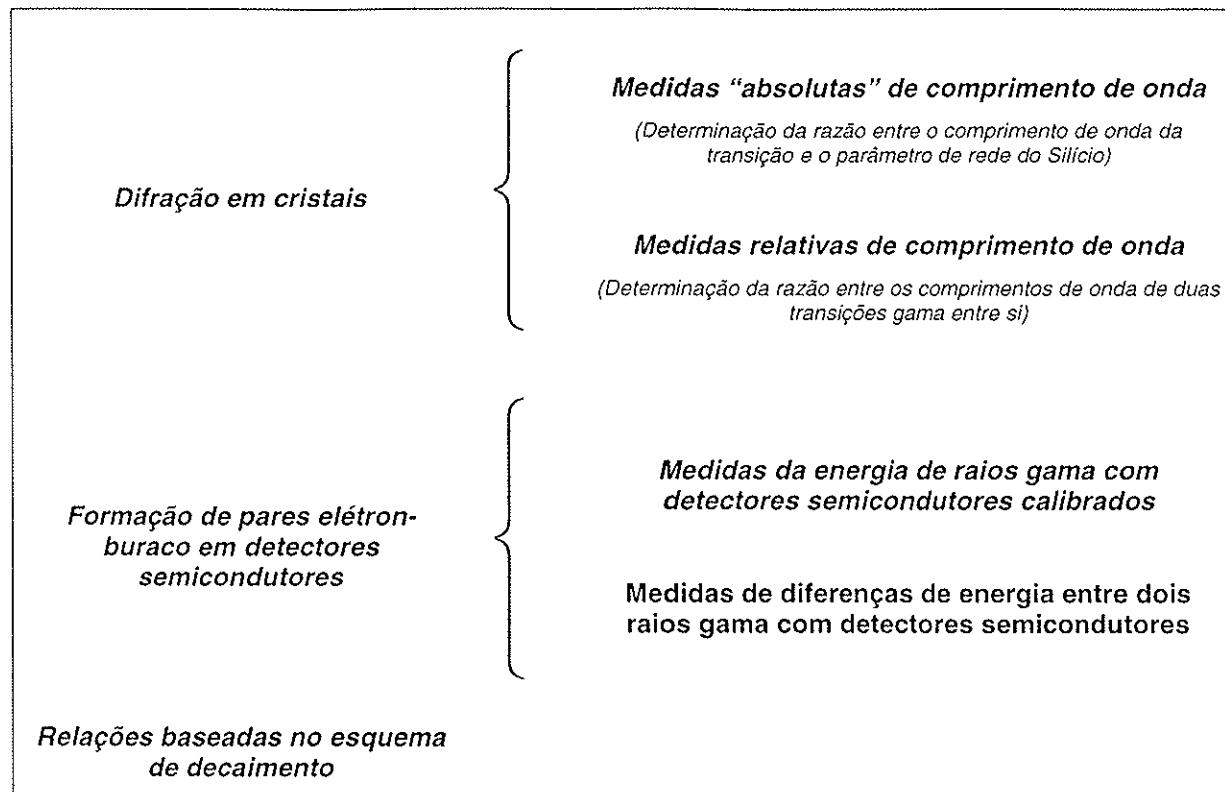


Figura II.2 – Classificação das informações consideradas na análise quanto à sua origem.

Nas seções seguintes serão apresentadas as especificidades de cada tipo de dado.

## II.4 – Medidas baseadas em difração

As medidas que utilizam este princípio são realizadas através da localização dos ângulos de difração em que há interferências construtivas ( $\theta$ ), determinando-se assim a razão entre o comprimento de onda do raio gama ( $\lambda$ ) e o espaçamento ( $d_{HKL}$ ) entre os planos selecionados do cristal\*. A relação entre estas grandezas, para o caso de difração por reflexão (caso de Bragg), é dada pela Lei de Bragg corrigida para o efeito de refração:

\* Utilizando-se os índices de Laue (H, K e L) a relação entre a ordem da difração (n) e os índices de Miller é dada por<sup>[102]</sup>  $d_{HKL} = d_{nh nk nl} = \frac{d_{hkl}}{n}$ .

$$\lambda = 2.d_{HKL} \cdot \operatorname{sen}(\theta) \left( 1 - \frac{1-\mu}{\operatorname{sen}^2(\theta)} \right), \quad (11)$$

onde  $\mu$  é o índice de refração do raio gama no cristal, que depende da constituição química deste e do comprimento de onda da radiação (para maiores detalhes ver as referências 72 e 103, p.103).

A origem do fator  $1 - \frac{1-\mu}{\operatorname{sen}^2(\theta)}$  na equação (11) é devida ao fato de que a radiação sofre refração tanto ao entrar quanto ao sair do cristal. Portanto, o ângulo entre os feixes incidente e refletido medido fora do cristal é diferente do correspondente ângulo no interior do cristal. No caso em que a difração é efetuada em uma geometria de transmissão (caso de Laue), esta correção desaparece uma vez que a refração ao entrar no cristal é compensada pela refração ao sair deste, e a razão entre  $\theta$ ,  $\lambda$  e  $d_{HKL}$ , para este caso, é dada pela equação de Bragg-Laue:

$$\lambda = 2.d_{HKL} \cdot \operatorname{sen}(\theta)$$

Usando um cristal com parâmetro de rede conhecido com grande precisão, como é o caso do Silício, o comprimento de onda do gama pode ser determinado de modo absoluto. Porém, mesmo usando um cristal que tenha distância entre os planos cristalinos desconhecida (ou indefinível, como é o caso dos cristais curvados) é possível determinar o valor relativo do comprimento de onda de um raio gama, pois obtém-se a razão dos comprimentos de onda de gamas entre si.

Medidas de difração apresentam resoluções em energia que são ordens de grandeza melhores do que as obtidas em detectores semicondutores (largura a meia altura, FWHM, de  $\sim 10\text{eV}$  contra  $\sim 500\text{eV}$  para raios gama de energias próximas a  $100\text{keV}$ ), porém possuem uma eficiência de detecção várias ordens de grandeza inferior a dos detectores semicondutores.

As medidas relativas de comprimento de onda são efetuadas com cristais curvos (ou melhor, “curvados”), aproveitando-se do fato de que com estes se

conseguiam resoluções cerca de uma ordem de grandeza superiores à dos espectrômetros de cristais planos de uma mesma época<sup>[73]</sup>.

A eficiência é um fator limitante das medidas baseadas em difração, pois, como a discriminação em energia é baseada em princípios geométricos, para obter boa resolução em energia é necessário restringir bastante a aceitação angular. Esta limitação é muito maior nos espectrômetros de cristais planos do que nos de cristais curvados<sup>[73]</sup>.

Como consequência desta restrição, para usar este tipo de espectrômetro são necessárias fontes de elevada intensidade (da ordem de centenas ou milhares de Ci), enquanto as medidas com detectores semicondutores necessitam de fontes com atividades muitas ordens de grandeza menores (da ordem de  $10^{-5}$  Ci).

#### II.4.1 - Medidas “absolutas” de comprimento de onda

As medidas deste grupo foram efetuadas ao longo da década de 1970<sup>[31, 34, 32]</sup> por Deslattes, Kessler e colaboradores no *National Bureau of Standards*\* (NBS) em um experimento constituído de três etapas, no qual o comprimento de onda de raios gama foi determinado em relação a parâmetros de rede de cristais que haviam sido calibrados com relação ao parâmetro de rede do Si, que por sua vez foi medido com relação ao comprimento de onda de uma transição óptica.

Por serem de relevância para a compreensão do presente trabalho, daremos alguns detalhes sobre a determinação experimental destes parâmetros de rede. Na primeira etapa o valor do parâmetro de rede de um cristal “hiperpuro” de Si (identificado como PERFX XROI<sup>†</sup>) foi determinado através de sua relação com o

\* Em 1988 o nome foi trocado para *National Institute of Standards and Technology* (NIST) incorporando explicitamente o objetivo de auxiliar e promover desenvolvimentos tecnológicos.

† O cristal PERFX, produzido no final da década de 1960, contém reduzidíssimas taxas de contaminação de Oxigênio e de Carbono (concentrações de C e O somadas inferiores a  $10^{16}$  atomos/cm<sup>3</sup>)<sup>[104, 105]</sup>.

comprimento de onda do laser de  $^3\text{He}^{22}\text{Ne}$  estabilizado no pico B do  $^{192}\text{I}_2$  (cujo comprimento de onda era conhecido com incerteza relativa de  $4.10^{-9}$ ), com o uso de um interferômetro de acoplamento de raios-X/Óptico<sup>[31]</sup>. A precisão relativa com que o parâmetro de rede do Si foi determinado nesta etapa foi de  $0,1.10^{-6}$ .

Na segunda etapa os parâmetros de rede de alguns outros cristais maiores de Si e de Ge foram comparados com o parâmetro de rede do cristal “hiperpuro” de Si usando um comparador de parâmetro de rede de cristais. As incertezas relativas nas razões de comprimentos de onda determinadas nesta etapa também foram da ordem de  $0,1.10^{-6}$ , equivalentes, portanto, às da primeira etapa.

Na terceira etapa as razões entre os comprimentos de onda de raios gama e o parâmetro de rede destes cristais de Si e de Ge foram determinadas através da difração de Laue com o uso de um espectrômetro duplo de cristais planos. Foram medidos neste espectrômetro raios gama que se seguiam aos decaimentos do  $^{198}\text{Au}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{169}\text{Yb}$ ,  $^{170}\text{Tm}$  e  $^{99}\text{Mo}$ . As incertezas relativas com que os ângulos de difração foram determinados nesta etapa variaram entre  $0,1.10^{-6}$  e  $5.10^{-6}$ .

Entretanto, no início da década de 1980 Becker e colaboradores, da *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB), obtiveram para o parâmetro de rede do Si um resultado inconsistente<sup>[65]</sup> (diferença relativa de  $1,80(12).10^{-6}$ ) com o do NBS. Esta diferença não poderia ser atribuída apenas a diferenças entre as amostras de Si utilizadas<sup>[65, 67]</sup> (a PTB usou um cristal de Si identificado como WASO 4.2A), porque ambos os cristais possuíam contaminações de Carbono e de Oxigênio tais que a alteração relativa que estas produziriam no parâmetro de rede dos cristais seria inferior a  $10^{-7}$ .

As medições realizadas na PTB foram repetidas com algumas melhorias instrumentais e após um cuidadoso estudo dos efeitos sistemáticos<sup>[66, 68]</sup>. O parâmetro de rede do Si obtido nesta nova medida<sup>[66]</sup> foi consistente com o do trabalho anterior da PTB. Neste trabalho também foram efetuadas medidas relativas de parâmetros de rede com algumas (5) amostras de cristais de Si de boa regularidade e baixa

concentração de impurezas (incluindo uma amostra de PERFX) e as diferenças relativas observadas entre os parâmetros de rede destes cristais foram, em todos os casos, inferiores a  $0,23(6)\cdot10^{-6}$ .

Apenas no final da década de 1980 os pesquisadores do NBS conseguiram identificar o problema<sup>[69,70]</sup> em suas medidas do parâmetro de rede do Si. Porém, como os equipamentos utilizados em cada uma das três etapas da determinação do comprimento de onda das gamas eram diferentes, este erro na determinação do parâmetro de rede do Si não afeta os outros resultados obtidos no NBS<sup>[31]</sup>. Neste trabalho consideramos somente os dados das etapas 2 e 3, da ref. 31 e, portanto, o erro da primeira etapa também não afeta os nossos resultados.

Usando os dados das etapas 2 e 3, os resultados das medidas “absolutas” de comprimento de onda correspondem a:

$$\lambda_i = 2.(d_{HKL})_i \cdot \text{sen}(\theta_i) \quad (12)$$

onde  $(d_{HKL})_i$  representa o espaçamento correspondente aos índices de Laue H, K e L do cristal utilizado na i-ésima medida. Este espaçamento se relaciona com o parâmetro de rede do Si nas condições em que a comparação de cristais foi efetuada ( $a_{Si}^{\#}$ ) por:

$$(d_{HKL})_i = \frac{\psi_i \cdot a_{Si}^{\#}}{\sqrt{H^2 + K^2 + L^2}}, \quad (13)$$

onde  $\psi$  é a razão entre o parâmetro de rede,  $a$ , do particular cristal (SiI, SiII ou Ge) utilizado no espectrômetro e o do cristal de Si PERFEX XROI, razões estas que foram determinadas na segunda etapa, cujos resultados estão reproduzidos na Tabela II-1.

**Tabela II-1** Medidas relativas de parâmetros de rede efetuadas no NBS.

<i>Cristal</i>	$\psi = \frac{a}{a_{Si}^{\#}}$ (ref. 31)	$\frac{\sigma_{\psi}}{\psi}$ ( $\times 10^6$ )
<i>SiI</i>	0,999 999 83 (10)	0,10
<i>SiII</i>	0,999 999 96 (7)	0,07
<i>Ge</i>	1,041 758 87 (10)	0,10

Os dados experimentais da terceira etapa da ref. 31 são os ângulos de difração obtidos com um dos cristais (SiI, SiII ou Ge), em um determinado plano de Laue. Estes dados estão reproduzidos na 3<sup>a</sup> coluna da Tabela II-2, acompanhados da incerteza relativa (4<sup>a</sup> coluna).

Os dados da Tabela II-2 seguem o padrão de identificação dos raios gama adotado neste trabalho, ou seja, origem identificadas pelo nuclídeo *pai* (mostrado na 1<sup>a</sup> coluna) e raio gama nomeado pela energia em keV desprezando a parte não inteira (coluna 2). Assim, a identificação 411 keV do <sup>198</sup>Au corresponde ao raio gama de energia de aproximadamente 411,8 keV que segue o decaimento  $\beta^-$  do <sup>198</sup>Au, portanto uma transição entre níveis do <sup>198</sup>Hg. Este raio gama, cujo comprimento de onda foi medido diversas vezes entre Abril de 1976 e Maio de 1977, é geralmente utilizado como referência para medidas relativas de comprimento de onda, sendo também chamado de *gold standard*<sup>\*</sup>.

Além de dar informações sobre o particular cristal utilizado na medida (coluna 5) e os respectivos índices de Laue (coluna 6), a Tabela II-2 ainda apresenta, nas últimas duas colunas, as razões,  $R_i = \frac{a_{Si}^{\#}}{\lambda_i}$ , e suas incertezas relativas, que serão considerados no ajuste, conforme explicado adiante.

\* Equivalente a “padrão ouro”.

**Tabela II-2 – Medidas “absolutas” de comprimento de onda.**

<i>Nuclideo</i>	<i>Gama</i> (keV)	$\theta^{(a)}$ (graus)	$\frac{\sigma_\theta}{\theta}^{(a)}$ ( $\times 10^6$ )	<i>Cristal</i> <sup>(a)</sup>	<i>H K L</i> <sup>(a)</sup>	<i>R</i> <sup>(b)</sup>	$\frac{\sigma_R}{R}$ ( $\times 10^6$ )
198-Au	411	0,449 199 485	1,29	Sil	2 2 0	180,386 031	1,31
198-Au	411	0,898 426 284	0,22	Sil	4 4 0	180,386 091	0,31
198-Au	411	0,898 425 927	0,36	Sil	4 4 0	180,386 163	0,42
198-Au	411	1,797 073 397	0,39	Sil	8 8 0	180,386 108	0,45
198-Au	411	0,898 425 959	0,29	Sil	4 4 0	180,386 157	0,37
198-Au	411	1,797 072 441	0,33	Sil	8 8 0	180,386 204	0,40
198-Au	411	0,609 804 297	0,72	Ge	4 0 0	180,386 129	0,75
198-Au	411	1,219 677 236	0,21	Ge	8 0 0	180,386 196	0,31
198-Au	411	1,219 677 130	0,31	Ge	8 0 0	180,386 211	0,38
198-Au	411	1,829 688 590	0,25	Ge	12 0 0	180,386 201	0,34
198-Au	411	1,829 688 333	0,23	Ge	12 0 0	180,386 227	0,32
198-Au	411	0,609 804 610	0,54	Ge	4 0 0	180,386 037	0,58
198-Au	411	0,609 804 696	0,44	Ge	4 0 0	180,386 011	0,49
198-Au	411	1,219 678 077	0,6	Ge	8 0 0	180,386 071	0,64
198-Au	411	1,219 677 512	0,65	Ge	8 0 0	180,386 155	0,69
198-Au	411	0,609 803 762	0,34	Ge	4 0 0	180,386 288	0,41
198-Au	411	0,609 804 030	0,55	Ge	4 0 0	180,386 208	0,59
198-Au	411	0,609 804 469	1,2	Ge	4 0 0	180,386 079	1,22
198-Au	411	1,219 677 328	0,24	Ge	8 0 0	180,386 182	0,33
198-Au	411	1,219 677 550	0,35	Ge	8 0 0	180,386 149	0,42
198-Au	411	1,829 688 840	0,6	Ge	12 0 0	180,386 177	0,64
198-Au	675	0,371 536 856	0,97	Ge	4 0 0	296,064 655	1,00
192-Ir	205	1,220 310 063	1,02	Ge	4 0 0	90,146 333	1,04
192-Ir	205	1,220 310 122	1,34	Ge	4 0 0	90,146 328	1,36
192-Ir	295	0,848 513 541	0,74	Ge	4 0 0	129,641 044	0,77
192-Ir	295	1,697 212 897	0,38	Ge	8 0 0	129,641 070	0,44
192-Ir	295	1,250 141 968	0,35	Sil	4 4 0	129,641 135	0,42
192-Ir	308	0,814 129 626	1,02	Ge	4 0 0	135,115 906	1,04
192-Ir	308	1,628 422 834	0,69	Ge	8 0 0	135,115 976	0,73
192-Ir	308	1,199 478 807	0,52	Sil	4 4 0	135,116 020	0,57
192-Ir	316	0,793 419 507	0,91	Ge	4 0 0	138,642 515	0,94
192-Ir	316	1,586 990 053	0,22	Ge	8 0 0	138,642 616	0,31
192-Ir	316	1,168 963 574	0,28	Sil	4 4 0	138,642 650	0,36
192-Ir	316	2,338 413 333	1,74	Sil	8 8 0	138,642 695	1,75
192-Ir	468	0,536 497 438	0,79	Ge	4 0 0	205,033 165	0,82
192-Ir	468	1,073 041 480	0,5	Ge	8 0 0	205,033 249	0,55
192-Ir	468	1,073 041 384	0,75	Ge	8 0 0	205,033 268	0,78
192-Ir	468	0,790 418 024	0,52	Sil	4 4 0	205,033 413	0,57
192-Ir	468	0,790 418 117	0,61	Sil	4 4 0	205,033 388	0,65
192-Ir	484	0,518 221 976	1,16	Ge	4 0 0	212,263 596	1,18
192-Ir	484	0,518 221 162	1,03	Ge	4 0 0	212,263 929	1,05
192-Ir	588	0,426 646 532	1,48	Ge	4 0 0	257,822 737	1,50
192-Ir	588	0,426 647 449	1,72	Ge	4 0 0	257,822 183	1,73
192-Ir	588	0,853 316 228	1,45	Ge	8 0 0	257,822 887	1,47
192-Ir	604	0,415 472 656	2,46	Ge	4 0 0	264,756 591	2,47
192-Ir	604	0,415 472 235	3,05	Ge	4 0 0	264,756 860	3,06
192-Ir	604	0,415 473 131	3,83	Ge	4 0 0	264,756 289	3,84
192-Ir	604	0,830 966 833	2,5	Ge	8 0 0	264,756 696	2,51
192-Ir	612	0,410 010 956	2,85	Ge	4 0 0	268,283 316	2,86
192-Ir	612	0,410 010 438	1,72	Ge	4 0 0	268,283 655	1,73
192-Ir	612	0,410 011 733	2,26	Ge	4 0 0	268,282 808	2,27
192-Ir	612	0,820 043 878	2,7	Ge	8 0 0	268,283 000	2,71
169-Yb	63	1,794 898 257	1,32	Sil	1 1 1	27,649 322	1,34
169-Yb	93	1,976 357 352	1,33	Sil	2 2 0	41,007 034	1,35
169-Yb	93	1,210 117 723	3,11	Sil	1 1 1	41,006 995	3,12
169-Yb	109	2,288 052 167	0,45	Ge	4 0 0	48,087 803	0,50

<i>Nuclideo</i>	<i>Gama</i> (keV)	$\theta^{(a)}$ (graus)	$\frac{\sigma_{\theta}}{\theta}^{(a)}$ (x10 <sup>6</sup> )	<i>Cristal</i> <sup>(a)</sup>	<i>H K L</i> <sup>(a)</sup>	<i>R</i> <sup>(b)</sup>	$\frac{\sigma_R}{R}$ (x10 <sup>6</sup> )
169-Yb	109	1,685 254 336	0,92	Sil	2 2 0	48,087 796	0,95
169-Yb	118	2,125 160 664	1,14	Ge	4 0 0	51,771 797	1,16
169-Yb	118	1,565 301 953	1,54	Sil	2 2 0	51,771 840	1,56
169-Yb	130	1,924 268 106	0,09	Ge	4 0 0	57,174 383	0,24
169-Yb	130	1,417 360 090	0,27	Sil	2 2 0	57,174 424	0,35
169-Yb	177	1,417 162 915	0,68	Ge	4 0 0	77,626 486	0,72
169-Yb	177	1,043 882 097	0,88	Sil	2 2 0	77,626 549	0,91
169-Yb	177	2,088 110 840	0,2	Sil	4 4 0	77,626 552	0,30
169-Yb	197	1,268 632 768	0,38	Ge	4 0 0	86,713 154	0,44
169-Yb	197	1,268 633 146	0,88	Ge	4 0 0	86,713 128	0,91
169-Yb	197	0,934 483 937	0,4	Sil	2 2 0	86,713 181	0,46
169-Yb	197	1,869 217 279	0,97	Sil	4 4 0	86,713 148	1,00
169-Yb	197	1,869 217 289	0,27	Sil	4 4 0	86,713 148	0,35
169-Yb	197	0,572 236 716	1,31	Sill	1 1 1	86,713 114	1,33
169-Yb	197	0,572 236 259	1,31	Sill	1 1 1	86,713 183	1,33
169-Yb	261	0,961 884 872	4,5	Ge	4 0 0	114,362 259	4,51
169-Yb	261	0,708 542 397	3,63	Sil	2 2 0	114,362 313	3,64
169-Yb	307	0,816 032 429	2,79	Ge	4 0 0	134,800 867	2,80
169-Yb	307	1,632 230 335	0,33	Ge	8 0 0	134,800 876	0,40
169-Yb	307	0,601 108 239	1,23	Sil	2 2 0	134,800 962	1,25
169-Yb	307	1,202 283 422	1,03	Sil	4 4 0	134,800 876	1,05
170-Tm	84	2,196 013 287	0,85	Sil	2 2 0	36,907 028	0,88
99-Mo	40					17,777 118 <sup>(c)</sup>	3,28 <sup>(c)</sup>

(a) – Dados da referência 31.

(b) – Valores calculados usando a expressão (15).

(c) – Dado reconstruído a partir da energia, E<sub>40</sub>=40,583 47(17) keV, fornecida na referência 36, usando

$$R = \frac{E_{40}}{f_{40}}, \text{ com } f_{40} = \frac{E_{\lambda}(1973)}{a_{Si}^{\#}(1980)}$$

As incertezas apresentadas na quarta coluna da Tabela II-2 são estatisticamente independentes entre si e correspondem apenas à incerteza na determinação do ângulo de difração<sup>[31]</sup> ( $\theta_i$ ). Segundo Deslattes, Kessler e colaboradores<sup>[31]</sup> há ainda outras fontes de incerteza a serem consideradas, devidas a fatores comuns a vários resultados e, portanto, covariantes entre si. São as incertezas devidas a:

- (a) Calibração do goniômetro, com incerteza relativa de 0,1.10<sup>-6</sup>;
- (b) Correção para divergência vertical, com incerteza relativa de 0,1.10<sup>-6</sup>;
- (c) Outros efeitos sistemáticos não controlados, com incerteza relativa de 0,14.10<sup>-6</sup>.

Como nosso critério quanto às incertezas é o de considerar as avaliações efetuadas pelos autores dos respectivos trabalhos (mesmo critério adotado na compilação da ref.1), incluímos todos os itens, embora acreditemos que o último item possa resultar em uma incerteza superestimada (como os próprios autores afirmam na

p.415 da ref. 31), correspondendo à visão de que há um “lado seguro” ou “melhor” para errar nas avaliações de incerteza.

As fontes de incertezas listadas nos itens (a), (b) e (c) foram consideradas covariantes entre todas as medidas de um mesmo raio gama e independentes entre as medidas de raios gamas distintos. Isto é consistente com o procedimento adotado pelos autores da ref. 31, pois na realização dos testes de consistência dos resultados baseados nos esquemas de decaimento (testes do princípio de Ritz, p.416 da ref. 31) estas incertezas foram consideradas estatisticamente independentes quando correspondiam a raios gama diferentes.

Nos dados deste tipo de experimento, o comprimento de onda é determinado em relação ao parâmetro de rede do Silício e a conversão de comprimento de onda em energia dependente da constante de Planck,  $h$ , da velocidade da luz,  $c$ , e da carga elementar,  $e$ , (para fornecer esta energia em elétron-volt). Por esse motivo, todas as energias das transições gama determinadas neste tipo de experimentos são proporcionais à seguinte relação entre constantes fundamentais\*,

$$f = \frac{h.c}{e.a_{Si}^{\#}}. \quad (14)$$

Com isso, percebe-se que o dado experimental primário obtido neste tipo de medida não é o comprimento de onda do raio gama ( $\lambda_i$ ), como consideraram Helmer e van der Leun, mas sim, a razão ( $R_i = \frac{a_{Si}^{\#}}{\lambda_i}$ ) entre o parâmetro de rede do cristal PERFX-XROI e o comprimento de onda do gama. Sua relação com os dados obtidos no experimento (Tabela II-2) é dada por

\* O parâmetro de rede do cristal de Si PERFX XROI nas condições do NBS,  $a_{Si}^{\#}$ , não é uma constante fundamental, porém, como mostrado nas seções II.7.2 e IV.1.2 seu valor pode ser determinado a partir do valor recomendado para o parâmetro de rede do Silício ( $a_{Si}$ ), que vem sendo apresentado nas compilações das constantes fundamentais desde 1986<sup>[5, 6, 7]</sup>.

$$R_i = \frac{\sqrt{H^2 + K^2 + L^2}}{2\psi_i \cdot \operatorname{sen}(\theta_i)}, \quad (15)$$

onde  $\psi_i$  se refere aos dados da Tabela II-1.

A consideração destes dados no ajuste se dá pela sua relação com as energias dos correspondentes raios gama e com a relação  $f$  entre as constantes fundamentais envolvidas, através de

$$R_i = \frac{E_i^0}{f^0} + \varepsilon_{R_i}, \quad (16)$$

onde  $E_i^0$  e  $f^0$  são os valores verdadeiros e desconhecidos, a serem estimados pelo ajuste, da energia da transição gama e da relação entre as constantes fundamentais, respectivamente. O erro,  $\varepsilon_{R_i}$ , também é desconhecido, relacionando-se, porém, com as incertezas experimentais,  $\sigma_{R_i}$ , por  $\langle \varepsilon_{R_i}^2 \rangle = \sigma_{R_i}^2$ . De modo mais geral, os erros dos valores experimentais  $R$  se relacionam com a matriz de covariância,  $V_R$ , através de  $V_{R_{i,k}} = \langle \varepsilon_{R_i} \cdot \varepsilon_{R_k} \rangle$ .

#### II.4.2 – Medidas relativas de comprimento de onda

Neste tipo de medida, os comprimentos de onda de dois raios gama são comparados entre si por difração em cristais curvos (“curvados”) de quartzo ou silício. As informações experimentais obtidas neste tipo de medida dizem respeito à razão entre os comprimentos de onda (e, consequentemente, das energias) de dois gamas observados, contribuindo, portanto, para a determinação da energia de ambos.

A interpretação comumente atribuída a este tipo de experimento, inclusive na compilação da ref. 1, é a de que um dos gamas (considerado como referência) é usado para determinar a energia do outro. Com isso, apenas parte da informação experimental é aproveitada, conforme já comentado na Seção II.2. Na verdade, os dados obtidos,

$$F_{ik} = \frac{\lambda_k}{\lambda_i} = \frac{\sin(\theta_k)}{\sin(\theta_i)}, \quad (17)$$

se relacionam com os valores verdadeiros (a serem estimados) das energias  $E_i^0$  e  $E_k^0$  dos raios gamas observados através da seguinte equação,

$$F_{ik} = \frac{E_i^0}{E_k^0} + \varepsilon_{F_{ik}}. \quad (18)$$

Os erros  $\varepsilon_{F_{ik}}$  são sempre desconhecidos, porém relacionados com as incertezas experimentais dos dados por  $\langle \varepsilon_{F_{ik}}^2 \rangle = \sigma_{F_{ik}}^2$ . As razões  $F_{ik}$  não são estatisticamente independentes umas das outras, porque uma das fontes de incerteza dessas razões é a determinação dos ângulos de interferência construtiva do raio gama de referência (geralmente o 411 keV do  $^{198}\text{Au}$ ) que é comum a todos os dados obtidos naquele experimento.

A Tabela II-3 apresenta os dados de medidas relativas de comprimento de onda considerados no ajuste. Nas primeiras três colunas estão indicados os nuclídeos pai e respectivas energias dos raios gama envolvidos na razão,  $F$ , apresentada na 4<sup>a</sup> coluna. O segundo gama só é explicitamente apresentado quando não corresponde ao 411 keV do  $^{198}\text{Au}$ , usualmente utilizado como referência neste tipo de medida. A quinta coluna informa a referência da qual foram obtidos os dados.

Dados com indicadores de covariâncias iguais (sétima coluna) são dados covariantes entre si. A covariância, que é devida à incerteza com que a transição de referência foi determinada, é calculada a partir do fator relativo de covariância,  $\varsigma$ , (apresentado na oitava coluna da Tabela II-3) utilizando:

$$\text{cov}(F_{ik}, F_{jk}) = (\varsigma \cdot F_{ik})(\varsigma \cdot F_{jk}). \quad (19)$$

**Tabela II-3 - Dados de medidas relativas de comprimento de onda.**

<i>Nuclídeo 1</i>	<i>Gama 1</i> (keV)	<i>Gama 2</i> (Nuclídeo 2) <sup>(n)</sup>	<i>F</i>	$\frac{\sigma_F}{F}$ (x10 <sup>6</sup> )	<i>Origem</i> <i>do dado</i>	<i>Indicador de</i> <i>covariância</i>	$\zeta$ (x10 <sup>6</sup> )	<i>Observação</i>	
51-Cr	320		0,777 272 4	(10)	1,3	[A]			
57-Co	122		0,296 406 12	(29)	1,0	[B]			
	136		0,331 405 7	(7)	2,1	[B]			
60-Co	1173		2,849 022	(15)	5,3	[B]			
	1332		3,235 768	(17)	5,3	[B]			
109-Cd	88		0,213 776 5	(25)	11,7	[C]	IC.1	4,0	
110-Ag	446		1,085 006	(12)	11,1	[D]			
	620		1,085 025	(12)	11,1	[E]			
			1,506 457	(41)	27,2	[D]			
			1,506 451	(15)	10,0	[E]			
	657		1,597 262	(10)	6,3	[D]			
			1,597 268	(5)	3,1	[E]			
	677		1,645 47	(3)	18,2	[D]			
			1,645 492	(17)	10,3	[E]			
	687		1,668 29	(3)	18,0	[D]			
	706		1,716 059	(12)	7,0	[D]			
			1,716 060	(12)	7,0	[E]			
	744		1,807 32	(5)	27,7	[D]			
	763		1,855 141	(10)	5,4	[D]			
			1,855 089	(17)	9,2	[E]			
	818		1,986 49	(4)	20,1	[D]			
	884		2,148 32	(4)	18,6	[D]			
	937		2,276 54	(5)	22,0	[D]			
			2,276 54	(3)	13,2	[E]			
	1384		3,361 63	(19)	56,5	[D]			
			3,361 57	(7)	20,8	[E]			
	1505		3,654 86	(22)	60,2	[D]			
137-Cs	661		1,606 748	(13)	8,1	[B]			
139-Ce	165		0,402 756	(15)	37,2	[C]	IC.1	4,0	
141-Ce	145		0,353 188	(3)	8,5	[C]	IC.1	4,0	
152-Eu	121		0,295 728 7	(7)	2,4	[B]			
	244		0,594 211 4	(19)	3,2	[B]			
	344		0,836 030 6	(41)	4,9	[B]			
	367		0,893 114	(10)	11,2	[B]			
	411		0,998 332	(17)	17,0	[B]			
	443		1,078 158	(15)	13,9	[B]		dubleto	
	778		1,891 492	(32)	16,9	[B]			
	964		2,340 993	(85)	36,3	[B]		dubleto	
153-Gd	69		0,169 190 44	(34)	2,0	[B]			
	75		0,183 151 8	(8)	4,4	[B]			
	83		0,202 444 7	(6)	3,0	[B]			
	89		0,217 303 2	(7)	3,2	[B]			
	97		0,236 596 9	(6)	2,5	[B]			
	103		0,250 557 4	(5)	2,0	[B]			
	172		0,419 751 9	(40)	9,5	[B]			
160-Tb	86		0,210 751 0	(8)	3,8	[F]			
	93		0,228 068	(15)	65,8	[G]			
	197		0,478 468 0	(24)	5,0	[F]			
	215		0,523 662 3	(26)	5,0	[F]			
	298		0,725 052 9	(41)	5,7	[F]			
161-Tb	48	25 keV (161-Tb)	1,906 930 2	(9)	0,5	[H]	IC.2	0,17	não Au
		74 keV (161-Tb)	0,655 994 5	(3)	0,5	[H]	IC.2	0,17	não Au

<i>Nuclídeo 1</i>	<i>Gama 1</i> (keV)	<i>Gama 2</i> (Nuclídeo 2) <sup>a)</sup>	<i>F</i>	$\frac{\sigma_F}{F}$ (x10 <sup>6</sup> )	<i>Origem</i> do <i>dado</i>	<i>Indicador de</i> <i>covariância</i>	$\zeta$ (x10 <sup>6</sup> )	<i>Observação</i>
169-Yb	63		0,153 278 61	(7)	0,5 [A]			
			0,153 276 2	(7)	4,6 [I]			inconsistente
	93		0,227 328 71	(15)	0,7 [A]			
	109		0,266 582 54	(12)	0,5 [A]			
			0,266 583 98	(11)	0,4 [J]			inconsistente
	118		0,287 005 1	(5)	1,7 [A]			
	130		0,316 955 53	(17)	0,5 [A]			
			0,316 956 48	(15)	0,5 [J]			inconsistente
	177		0,430 335 75	(19)	0,4 [A]			
			0,430 337 01	(17)	0,4 [J]			inconsistente
	197		0,480 708 49	(19)	0,4 [A]			
			0,480 709 80	(21)	0,4 [J]			inconsistente
170-Tm	261		0,633 987 6	(6)	0,9 [A]			
	307		0,747 291 10	(34)	0,5 [A]			
			0,747 292 75	(33)	0,4 [J]			inconsistente
	84		0,204 596 7	(9)	4,4 [I]			inconsistente
			0,204 599 02	(32)	1,6 [A]			
		48 keV (161-Tb)	1,722 458 4	(27)	1,6 [H]			não Au
		67 keV (182-Ta)	1,243 616 7	(19)	1,5 [H]			não Au
	31		0,077 070 3	(12)	15,6 [K]	IC.3	8,0	
	42		0,103 727 6	(19)	18,3 [K]	IC.3	8,0	
	65		0,159 596 35	(36)	2,3 [L]			
			0,159 599 0	(14)	8,8 [K]	IC.3	8,0	
182-Ta	67		0,164 519 78	(32)	1,9 [L]			
			0,164 523 0	(14)	8,5 [K]	IC.3	8,0	
			0,164 520 23	(29)	1,8 [F]			
		48 keV (161-Tb)	1,385 042 8	(5)	0,4 [H]			não Au
	84		0,205 638 7	(24)	11,7 [K]	IC.3	8,0	
	100		0,243 092 40	(15)	0,6 [L]			
			0,243 099 0	(21)	8,6 [K]	IC.3	8,0	inconsistente
	113		0,276 035 1	(6)	2,2 [L]			
			0,276 029 5	(37)	13,4 [K]	IC.3	8,0	
	116		0,282 702 5	(47)	16,6 [K]	IC.3	8,0	
	152		0,370 153 0	(7)	1,9 [L]			
156			0,370 157 2	(45)	12,2 [K]	IC.3	8,0	
			0,379 761 8	(9)	2,4 [L]			
			0,379 758 1	(42)	11,1 [K]	IC.3	8,0	
	179		0,435 631 5	(13)	3,0 [L]			
			0,435 633	(6)	13,8 [K]	IC.3	8,0	
	198		0,481 667 3	(11)	2,3 [L]			
			0,481 669	(7)	14,5 [K]	IC.3	8,0	
	222		0,539 356 7	(11)	2,0 [L]			
			0,539 350	(7)	13,0 [K]	IC.3	8,0	
	229		0,556 871 1	(15)	2,7 [L]			
			0,556 871	(9)	16,2 [K]	IC.3	8,0	
264			0,641 265 0	(15)	2,3 [L]			
			0,641 270	(14)	21,8 [K]	IC.3	8,0	

<i>Nuclídeo 1</i>	<i>Gama 1</i> (keV)	<i>Gama 2</i> ( <i>Nuclídeo 2</i> ) <sup>(a)</sup>	<i>F</i>	$\frac{\sigma_F}{F}$ ( $\times 10^6$ )	<i>Origem</i> do <i>dado</i>	<i>Indicador de</i> <i>covariância</i>	$\zeta$ ( $\times 10^6$ )	<i>Observação</i>
<i>192-Ir</i>	136		0,331 088 6 0,331 087 4	(17) (17)	5,1 5,1	[A] [I]	<i>IC.4</i>	4,1
	205		0,499 742 3 0,499 737 8	(15) (34)	3,0 6,8	[A] [C]	<i>IC.1</i>	4,0
	295		0,718 687 0 0,718 681 2 0,718 687 4	(12) (39) (63)	1,7 5,4 8,8	[A] [I] [C]	<i>IC.4</i> <i>IC.1</i>	4,1 4,0
	308		0,749 033 0 0,749 031 6 0,749 040 8	(53) (39) (85)	7,1 5,2 11,3	[A] [I] [C]	<i>IC.4</i> <i>IC.1</i>	4,1 4,0
	316		0,768 589 4 0,768 583 8 0,768 587 8	(7) (39) (58)	0,9 5,1 7,5	[A] [I] [C]	<i>IC.4</i> <i>IC.1</i>	4,1 4,0
	416		1,011 331 2 1,011 311	(73) (13)	7,2 12,9	[A] [I]	<i>IC.4</i>	4,1
	468		1,136 636 8 1,136 616 8 1,136 649	(15) (85) (15)	1,3 7,5 13,2	[A] [I] [C]	<i>IC.4</i> <i>IC.1</i>	4,1 4,0
	484		1,176 716 0	(44)	3,7	[A]		
	588		1,429 289 9 1,429 236	(97) (19)	6,8 13,3	[A] [I]		
	604		1,467 719 5 1,467 714	(53) (20)	3,6 13,6	[A] [I]	<i>IC.4</i>	4,1
	612		1,487 275 9 1,487 263	(63) (23)	4,2 15,5	[A] [I]	<i>IC.4</i>	4,1
	884		2,147 950	(59)	27,5	[I]	<i>IC.4</i>	4,1
<i>198-Au</i>	675		1,641 288	(9)	5,5	[B]		
<i>199-Au</i>	49		0,120 996 3	(4)	3,3	[L]		
	158		0,384 598 73	(19)	0,5	[L]		
	208		0,505 594 28	(22)	0,4	[L]		
<i>203-Hg</i>	279		0,677 983 9 0,677 982 8	(24) (71)	3,5 10,5	[A] [C]	<i>IC.1</i>	4,0

(a) Apenas indicado se diferente do 411 keV (198-Au)

[A] ref. 37

[B] ref. 38

[C] ref. 39

[D] ref. 40

[E] ref. 41

[F] ref. 42

[G] ref. 43

[H] ref. 44

[I] ref. 45

[J] ref. 46

[K] ref. 47

[L] ref. 48

Nota-se que, apesar de alguns dos dados terem sido apresentados na ref. 1 como sendo medições relativas à linha de 411 keV do  $^{198}\text{Au}$ , através das informações contidas na ref. 44 é possível verificar que as informações experimentais obtidas foram, na verdade, relações de comprimentos de onda de transições do  $^{161}\text{Tb}$ ,  $^{170}\text{Tm}$  e  $^{182}\text{Ta}$  entre si e, portanto, foram estes os dados considerados no ajuste. Estes dados estão indicados na Tabela II-3 com a observação “não Au”.

Alguns dados das refs. 45 e 47 não foram considerados na ref. 1 por serem inconsistentes com outros dados. Seguindo nosso procedimento de incluir no ajuste apenas os mesmos dados da ref. 1, estes dados, indicados na Tabela II-3 com a observação “*inconsistente*”, também foram desconsiderados no nosso ajuste.

Há ainda raios gama do  $^{152}\text{Eu}$  que são dubletos conhecidos e que também não foram considerados no ajuste. Os dados relacionados com estes raios gama estão indicados pela observação “*dubleto*”.

A observação “*digitação*” indica um dado em que a razão entre as energias calculada a partir dos dados originais apresentados no artigo<sup>[56]</sup> resulta em um valor diferente do adotado na ref. 1. Em nosso ajuste utilizamos para este dado o valor calculado a partir das informações divulgadas pelos experimentadores, ignorando o erro de digitação da ref. 1.

## **II.5 – Medidas em detectores semicondutores**

Com o aparecimento dos detectores semicondutores na década de 1960, diversos resultados experimentais de medidas precisas de energias gama passaram a ser realizados com o uso destes espectrômetros.

Nesses detectores a amplitude dos pulsos elétricos depende do número de elétrons liberados na região ativa do semicondutor que, por sua vez, é relacionado com a energia depositada também na região ativa do detector. Digitalizando-se estas amplitudes é obtido um histograma, chamado de espectro, que contém o número de eventos detectados em função da amplitude do pulso elétrico (em unidades arbitrárias).

A relação entre a escala horizontal (canal) do histograma e a energia depositada não é exatamente linear, por motivos que vão desde a formação do sinal (por exemplo, a forma do pulso elétrico é dependente da região em que ocorre a interação

da radiação no interior do semicondutor), até a sua digitalização (por exemplo, não linearidade do conversor analógico digital).

Não há nenhum modelo baseado apenas em primeiros princípios que descreva a forma funcional da relação entre a escala arbitrária e a energia que seja amplamente aceito pela comunidade de espectroscopistas gama. No entanto, empiricamente tem-se observado que esta relação apresenta um comportamento suave, sendo geralmente bem descrita por polinômios de terceiro grau. Além disso, considerando-se apenas uma pequena região do espectro, é possível descrever localmente essa relação com o uso de polinômios de segundo grau<sup>[85]</sup>.

Nos dados considerados na seção II.5.1, as energias dos raios gama foram determinadas através da interpolação das posições dos fotópicos diretamente na curva de calibração do detector usando uma faixa extensa de energia. Já nos dados da seção II.5.2, diferenças de energia entre dois raios gama foram determinadas através da diferença entre a posição de seus fotópicos, interpolados na curva de calibração definida para uma pequena região do espectro ao redor dos fotópicos de interesse.

Em ambas as técnicas, os detectores semicondutores são calibrados usando as energias de algumas transições gama conhecidas como referência. Assim, como as energias das transições gama são todas proporcionais à razão entre as constantes fundamentais  $f$ ,

$$E = \alpha \cdot f \quad (20)$$

(com  $\alpha$  uma constante de proporcionalidade relacionada com a transição gama) as energias obtidas com detectores semicondutores também o serão, pois os parâmetros da curva de calibração do detector (relação entre energia e a escala arbitrária) também são proporcionais a  $f$ .

A covariância entre as energias determinadas com detectores semicondutores e  $f$  é obtida a partir de

$$V(E, f) = \langle (E - E^0) \cdot (f - f^0) \rangle = \langle (\alpha \cdot f - \alpha^0 \cdot f^0) \cdot (f - f^0) \rangle.$$

Substituindo  $\alpha \cdot f = (\alpha^0 + \varepsilon_\alpha) \cdot (f^0 + \varepsilon_f)$ , onde  $\varepsilon_\alpha$  é o erro de  $\alpha$  e  $\varepsilon_f$  o erro de  $f$ , obtemos

$$V(E, f) = \langle (\alpha^0 \cdot f^0 + \alpha^0 \cdot \varepsilon_f + \varepsilon_\alpha \cdot f^0 + \varepsilon_\alpha \cdot \varepsilon_f - \alpha^0 \cdot f^0) \cdot (\varepsilon_f) \rangle.$$

Supondo  $\alpha$  e  $f$  estatisticamente independentes por terem origens diferentes (isto é,  $\langle \varepsilon_\alpha \cdot \varepsilon_f \rangle = 0$ ) e que não haja erro sistemático em  $\alpha$  (isto é,  $\langle \varepsilon_\alpha \rangle = 0$ ), resulta

$$V(E, f) = \alpha^0 \cdot \langle \varepsilon_f^2 \rangle,$$

que, na prática, considerando que  $\alpha$  seja aproximadamente igual a  $\alpha^0$  (o que é bastante razoável, uma vez que as incertezas relativas em  $\alpha$  são da ordem de  $10^{-6}$ ), pode ser calculada por

$$V(E, f) \equiv \frac{E}{f} \cdot (\sigma_f)^2. \quad (21)$$

A equação (21) é útil para determinar, de modo mais geral, a covariância entre as energias determinadas em detectores semicondutores e a razão entre as constantes fundamentais  $f$ . Essa covariância deve ser considerada entre todos os dados de energia (inclusive das medidas de diferença de energia) obtidos com o uso de detectores semicondutores. Assim, como todos os dados experimentais de energias determinadas com estes espectrômetros são covariantes com as constantes fundamentais, eles também apresentam covariância entre si devido às constantes fundamentais. Essa covariância, entre dois dados  $E_i$  e  $E_j$ , é dada por

$$V(E_i, E_j) = \langle (E_i - E_i^0) \cdot (E_j - E_j^0) \rangle = \langle (\alpha_i \cdot f - \alpha_i^0 \cdot f^0) \cdot (\alpha_j \cdot f - \alpha_j^0 \cdot f^0) \rangle.$$

Efetuando as mesmas hipóteses que foram utilizadas para determinar a covariância entre cada energia e  $f$  obtemos

$$V(E_i, E_j) = \alpha_i^0 \alpha_j^0 \langle (f - f^0)^2 \rangle \equiv \frac{E_i E_j}{f^2} (\sigma_f)^2. \quad (22)$$

Esta equação foi utilizada para determinar as covariâncias entre todos os dados de energia (energias e diferenças de energias) obtidos com o uso de detectores semicondutores.

### **II.5.1 – Medidas em detectores semicondutores calibrados**

Nos dados considerados neste grupo, a relação entre a escala arbitrária do detector e a energia é calibrada em uma região extensa, usando alguns raios gama de energias conhecidas, cujos valores são (erroneamente) considerados invariáveis no experimento. As energias dos outros raios gama são, então, determinadas pela interpolação das posições dos fotópicos correspondentes. Discutiremos os problemas com essas hipóteses no Capítulo V, onde apresentamos a metodologia que desenvolvemos para a análise de dados de medidas realizadas com equipamentos de escala arbitrária.

As energias dos gamas determinadas neste tipo de experimento são covariantes com as dos gamas utilizados para calibrar o equipamento. Porém, essas covariâncias não são informadas nos trabalhos e nem são informadas como se relacionam com os “padrões” de calibração utilizados no experimento; portanto, estas covariâncias não puderam ser consideradas no ajuste. A falta dessa covariância também impede que os resultados do experimento sejam atualizados para incorporar as mudanças nos valores adotados nas energias dos gamas utilizados para calibração.

Vale ressaltar que este tipo de dados poderiam ser considerados de maneira adequada utilizando a metodologia apresentada no Capítulo V, já que é evidente que a informação primária obtida nestes experimentos é o conjunto das posições de todos os fotópicos observados. Portanto, os dados primários precisam ser disponibilizados para que seja possível considerar corretamente as covariâncias e atualizar os resultados para incorporar novas informações sobre as energias dos raios gama observados.

A Tabela II-4 apresenta os dados de medidas com detectores semicondutores calibrados que foram utilizados no ajuste. A relação entre estes dados e os valores verdadeiros das energias das gamas, a serem obtidas no ajuste, é expressa pela equação

$$E_i = E_i^0 + \varepsilon_{E_i}, \quad (23)$$

sendo  $E_i$  o valor experimental para a energia obtida na medida e  $\varepsilon_{E_i}$  o erro desconhecido, relacionado com a incerteza por  $\sigma_{E_i}^2 = \langle \varepsilon_{E_i}^2 \rangle$ . A covariância entre cada dado e a razão entre as constantes fundamentais  $f$  é dada pela equação (21), e a covariância entre dois dados devido às constantes fundamentais é dada pela equação (22).

**Tabela II-4 - Dados de medidas com detectores semicondutores calibrados.**

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama (keV)</i>	<i>E (keV)</i>	$\frac{\sigma_E}{E} (x10^6)$	<i>Origem do dado</i>	<i>Observação</i>
<i>7-Be</i>	477	477,603 8	(26)	5	[A]
	66	66,051 8	(8)	12	[B]
	96	96,733 9	(11)	11	[B]
	121	121,115 9	(16)	13	[B]
	136	136,000 0	(6)	4	[B]
	264	264,656 9	(19)	7	[B]
	279	279,542 5	(13)	5	[B]
	303	303,923 5	(17)	6	[B]
	400	400,657 7	(11)	3	[B]
	514	514,004 8	(22)	4	[A]
<i>75-Se</i>	511	511,853 4	(23)	4	[A]
	446	446,812	(4)	9	[C]
	620	620,355	(3)	5	[C]
	53	53,164	(2)	38	[D]
<i>85-Sr</i>	79	79,613	(2)	25	[D]
	80	80,999	(2)	25	[D]
	160	160,611	(5)	31	[D]
	223	223,243	(7)	31	[D]
	276	276,407	(8)	29	[D]
	302	302,856	(9)	30	[D]
	356	356,020	(11)	31	[D]
	383	383,854	(12)	31	[D]
	276	276,397 4	(27)	10	[B]
	302	302,852 4	(12)	4	[B]
<i>106-Ru</i>	356	356,010 7	(11)	3	[B]
	383	383,849 9	(23)	6	[B]
	165	165,857 5	(11)	7	[E]
	443	443,971	(3)	7	[F]
	674	674,685	(7)	10	[F]
<i>110-Ag</i>	719	719,355	(6)	8	[F]
	964	964,065	(6)	6	[F]
					dubleto
<i>133-Ba</i>					dubleto
					dubleto
					dubleto
					dubleto
<i>139-Ce</i>					dubleto
					dubleto
					dubleto
					dubleto
<i>152-Eu</i>					dubleto
					dubleto
					dubleto
					dubleto

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama (keV)</i>	<i>E (keV)</i>	$\frac{\sigma_E}{E} \times 10^6$	<i>Origem do dado)</i>	<i>Observação</i>
<i>185-Os</i>	295	295,939 7	(18)	6 [G]	
	344	344,277 5	(14)	4 [G]	
	367	367,788 9	(19)	5 [G]	
	411	411,115 4	(11)	3 [G]	
	443	443,960 7	(16)	4 [G]	<i>dubletos</i>
	488	488,679 1	(20)	4 [G]	
	563	563,983	(4)	7 [G]	<i>dubletos</i>
	566	566,443	(7)	12 [G]	
	586	586,264 1	(22)	4 [G]	
	719	719,346	(7)	10 [G]	<i>dubletos</i>
	125	125,361	(4)	32 [H]	
	234	234,163	(10)	43 [H]	
	125	125,358 1	(9)	7 [G]	
	592	592,074	(4)	7 [G]	
<i>207-Bi</i>	569	569,700	(4)	7 [A]	

[A] – ref. 60

[B] – ref. 61

[C] – ref. 41

[D] – ref. 62

[E] – ref. 63

[F] – ref. 56

[G] – ref. 64

[H] – ref. 52

## II.5.2 – Medidas de diferença de energia em detectores semicondutores

Nas medidas de diferença de energia entre dois raios gama com o uso de detectores semicondutores, a relação entre a escala arbitrária e a energia é determinada para uma pequena região (onde se supõem que esta relação seja bem descrita por um polinômio de segundo grau) em torno dos raios gama de interesse. A diferença de energia entre os raios gama é obtida a partir da curva de calibração determinada para a região e da diferença nas posições dos fotópicos correspondentes.

A relação entre os dados deste tipo de experimento e as grandezas a serem estimadas no ajuste é

$$D_{ij} = E_i^0 - E_j^0 + \varepsilon_{D_{ij}} \quad (24)$$

onde  $D_{ij}$  é a diferença de energia (determinada experimentalmente) entre os raios gama de energias verdadeiras (desconhecidas, a serem estimadas no ajuste)  $E_i^0$  e  $E_j^0$ .

A covariância entre  $D_{ij}$  e a relação entre as constantes fundamentais,  $f$ , é obtida pela equação (21) e as covariâncias entre todos os dados de energias determinados

com detectores semicondutores (energias e diferenças de energia) entre si devido a f é dado pela equação (22). Como nos casos anteriores,  $\sigma_{D_{ij}}^2 = \langle \varepsilon_{D_{ij}}^2 \rangle$ .

Os dados de medições de diferenças de energia estão apresentados na Tabela II-5.

**Tabela II-5 - Medidas de diferenças de energia em detectores semicondutores.**

Nuclídeo 1	Gama 1 (keV)	Nuclídeo 2	Gama 2 (keV)	D (keV)	$\frac{\sigma_D}{E}^{(a)}$ ( $\times 10^6$ )	Origem do dado	Observação
161-Tb	25	172-Hf	23	1,718 4	(2)	8,3	[A]
241-Am	26	172-Hf	23	2,411 8	(9)	36,7	[A]
241-Am	26	161-Tb	25	0,693 3	(2)	7,8	[A]
210-Pb	46	99-Mo	40	5,956	(1)	23,3	[B]
133-Ba	53	210-Pb	46	6,622	(2)	40,4	[B]
161-Tb	57	161-Tb	48	8,276 4	(3)	5,7	[A]
241-Am	59	161-Tb	48	10,625 6	(1)	1,9	[A]
241-Am	59	133-Ba	53	6,377	(1)	17,9	[B]
161-Tb	74	241-Am	59	15,026 0	(2)	3,0	[A]
172-Lu	78	161-Tb	74	4,175 5	(6)	7,9	[A]
133-Ba	80	44-Ti	67	13,129 1	(13)	17,7	[C]
133-Ba	80	44-Ti	78	2,672 7	(7)	8,9	[C]
172-Hf	81	161-Tb	74	7,184 1	(6)	7,7	[A]
172-Hf	81	172-Lu	78	3,008 8	(4)	5,0	[A]
182-Ta	84	44-Ti	78	6,358 4	(14)	17,3	[C]
182-Ta	84	133-Ba	79	5,067	(6)	73,6	[C]
182-Ta	84	133-Ba	80	3,684 4	(21)	25,6	[C]
172-Lu	90	161-Tb	74	16,078 6	(8)	9,8	[A]
172-Lu	90	172-Hf	81	8,890 6	(8)	9,4	[A]
182-Ta	100	75-Se	96	3,372	(2)	20,4	[D]
153-Gd	103	182-Ta	100	3,078	(2)	19,7	[E]
154-Eu	123	182-Ta	113	9,399	(1)	8,5	[F]
154-Eu	123	182-Ta	116	6,651	(2)	16,7	[F]
99-Mo	140	57-Co	136	4,037	(1)	7,2	[B]
141-Ce	145	59-Fe	142	2,792	(2)	13,9	[D]
182-Ta	152	141-Ce	145	6,984	(5)	33,7	[E]
139-Ce	165	199-Au	158	7,480	(4)	24,8	[E]
139-Ce	165	185-Os	162	3,000	(4)	24,5	[D]
125-Sb	176	139-Ce	165	10,459	(1)	5,9	[F]
182-Ta	179	125-Sb	176	3,082	(1)	5,6	[F]
182-Ta	198	59-Fe	192	6,009	(5)	25,6	[D]
95-Tc	204	75-Se	198	5,521	(6)	29,9	[D]
95-Tc	204	182-Ta	198	5,765	(4)	19,9	[D]
95-Tc	204	160-Tb	197	7,081	(6)	29,9	[D]
199-Au	208	59-Fe	192	15,852	(4)	20,0	[D]
125-Sb	208	182-Ta	198	9,730	(17)	83,7	[F]
125-Sb	208	125-Sb	204	3,939	(9)	43,7	[F]
160-Tb	215	95-Tc	204	11,529	(2)	9,5	[D]
82-Br	221	95-Tc	204	17,360	(3)	14,1	[G]
82-Br	221	160-Tb	215	5,835	(2)	9,2	[G]
182-Ta	222	125-Sb	208	14,029	(16)	74,4	[F]
154-Eu	247	182-Ta	229	18,608	(1)	4,2	[F]
182-Ta	264	154-Eu	247	16,145	(1)	3,9	[F]
152-Eu	251	152-Eu	244	6,936	(10)	40,4	[H]
182-Ta	264	95-Tc	253	11,004	(6)	23,2	[D]

Nuclídeo 1	Gama 1 (keV)	Nuclídeo 2	Gama 2 (keV)	D (keV)	$\frac{\sigma_D}{E}^{(a)}$ ( $\times 10^6$ )	Origem do dado	Observação
75-Se	264	95-Tc	253	11,588	(3)	11,6	[D]
133-Ba	276	152-Eu	244	31,699	(3)	11,5	[B]
203-Hg	279	182-Ta	264	15,114	(5)	18,4	[E]
152-Eu	295	152-Eu	244	51,222	(15)	55,7	[H]
192-Ir	295	133-Ba	276	19,559	(3)	10,5	[B]
192-Ir	295	203-Hg	279	16,758	(3)	10,5	[E]
133-Ba	302	192-Ir	295	6,896	(1)	3,4	[B]
192-Ir	308	192-Ir	295	12,493	(2)	6,6	[E]
192-Ir	308	133-Ba	302	5,605	(1)	3,3	[B]
192-Ir	316	192-Ir	308	8,055	(3)	9,6	[E]
51-Cr	320	192-Ir	316	3,579	(3)	9,4	[E]
152-Eu	344	192-Ir	316	27,775	(3)	9,1	[H]
133-Ba	356	152-Eu	344	11,736	(1)	2,9	[B]
152-Eu	367	192-Ir	316	51,289	(6)	17,6	[H]
133-Ba	383	133-Ba	356	27,835	(3)	8,1	[B]
75-Se	400	113-Sn	391	8,959	(3)	7,6	[D]
152-Eu	411	133-Ba	383	27,269	(5)	12,6	[B]
198-Au	411	75-Se	400	11,148	(3)	7,4	[D]
198-Au	411	203-Pb	401	10,478	(3)	7,4	[D]
108-Ag	433	125-Sb	427	6,063	(1)	2,3	[F]
125-Sb	443	108-Ag	433	9,618	(8)	18,3	[F]
154-Eu	444	108-Ag	433	10,557	(6)	13,7	[F]
110-Ag	446	108-Ag	433	12,875	(3)	6,8	[I]
110-Ag	446	154-Eu	444	2,324	(7)	15,7	[F]
125-Sb	463	108-Ag	433	29,428	(1)	2,2	[F]
192-Ir	468	152-Eu	411	56,946	(3)	6,8	[H]
7-Be	477	192-Ir	468	9,534	(3)	6,3	[D]
192-Ir	484	192-Ir	468	16,508	(2)	4,2	[D]
152-Eu	503	192-Ir	484	18,892	(9)	18,2	[H]
207-Bi	569	82-Br	554	15,353	(1)	1,8	[G]
192-Ir	588	152-Eu	563	24,588	(7)	12,2	[H]
192-Ir	588	152-Eu	566	22,146	(12)	20,8	[H]
192-Ir	588	207-Bi	569	18,883	(2)	3,5	[D]
192-Ir	588	95-Tc	582	6,503	(3)	5,1	[D]
192-Ir	588	228-Th	583	5,394	(2)	3,4	[D]
192-Ir	588	152-Eu	586	2,312	(9)	15,3	[H]
185-Os	592	95-Tc	582	10,005	(7)	11,9	[D]
185-Os	592	228-Th	583	8,897	(12)	20,4	[D]
185-Os	592	192-Ir	588	3,485	(5)	8,5	[D]
125-Sb	600	207-Bi	569	30,899	(1)	1,7	[F]
124-Sb	602	95-Tc	582	20,648	(1)	1,7	[G]
192-Ir	604	95-Tc	582	22,334	(3)	5,1	[D]
192-Ir	604	192-Ir	588	15,829	(1)	1,7	[D]
192-Ir	604	185-Os	592	12,338	(5)	8,4	[D]
125-Sb	606	125-Sb	600	6,117	(3)	5,0	[F]
192-Ir	612	192-Ir	588	23,879	(1)	1,7	[D]
192-Ir	612	192-Ir	604	8,050	(1)	1,6	[D]
108-Ag	614	154-Eu	591	22,519	(3)	5,0	[F]
108-Ag	614	125-Sb	600	13,681	(1)	1,6	[F]
108-Ag	614	125-Sb	606	7,564	(2)	3,3	[F]
82-Br	619	192-Ir	612	6,643	(2)	3,2	[G]
110-Ag	620	192-Ir	612	7,896	(6)	9,7	[G]
110-Ag	620	108-Ag	614	6,079	(3)	4,9	[I]
154-Eu	625	108-Ag	614	10,970	(8)	12,9	[F]
154-Eu	625	110-Ag	620	4,982	(15)	24,1	[F]
125-Sb	635	108-Ag	614	21,669	(1)	1,6	[F]
185-Os	646	82-Br	619	27,030	(2)	3,2	[G]
110-Ag	657	124-Sb	645	11,907	(2)	3,1	[G]
110-Ag	657	185-Os	646	11,638	(2)	3,1	[D]
110-Ag	657	185-Os	646	11,635	(2)	3,1	[G]

inconsistente

Nuclídeo 1	Gama 1 (keV)	Nuclídeo 2	Gama 2 (keV)	D (keV)	$\frac{\sigma_D}{E}^{(a)}$ (x10 <sup>5</sup> )	Origem do dado	Observação
137-Cs	661	154-Eu	625	36,403	(8)	12,4	[F]
137-Cs	661	125-Sb	635	25,705	(1)	1,5	[F]
137-Cs	661	124-Sb	645	15,807	(1)	1,5	[G]
137-Cs	661	185-Os	646	15,529	(2)	3,1	[D]
137-Cs	661	152-Eu	656	5,168	(4)	6,1	[H]
137-Cs	661	110-Ag	657	3,898	(2)	3,0	[D]
137-Cs	661	110-Ag	657	3,896	(2)	3,0	[G]
132-Cs	667	137-Cs	661	6,058	(1)	1,5	[G]
152-Eu	671	137-Cs	661	9,498	(17)	25,5	[H]
125-Sb	671	137-Cs	661	9,785	(3)	4,5	[F]
198-Au	675	137-Cs	661	14,229	(3)	4,5	[D]
110-Ag	677	110-Ag	620	57,276	(6)	9,3	[J]
110-Ag	677	110-Ag	657	19,861	(1)	1,5	[G]
110-Ag	677	110-Ag	657	19,870	(4)	6,0	[J]
110-Ag	677	137-Cs	661	15,958	(3)	4,5	[G]
152-Eu	678	137-Cs	661	16,963	(4)	6,0	[H]
203-Pb	680	137-Cs	661	18,855	(6)	8,9	[D]
203-Pb	680	198-Au	675	4,625	(5)	7,4	[D]
110-Ag	687	110-Ag	677	9,386	(4)	5,9	[J]
154-Eu	692	137-Cs	661	30,761	(3)	4,4	[F]
154-Eu	692	110-Ag	687	5,416	(4)	5,8	[F]
144-Ce	696	137-Cs	661	34,854	(1)	1,5	[G]
144-Ce	696	152-Eu	688	7,836	(4)	5,8	[H]
82-Br	698	110-Ag	687	11,371	(3)	4,3	[G]
94-Nb	702	132-Cs	667	34,928	(1)	1,5	[G]
94-Nb	702	110-Ag	687	15,637	(7)	10,1	[G]
94-Nb	702	154-Eu	692	10,223	(3)	4,3	[F]
94-Nb	702	144-Ce	696	6,135	(1)	1,4	[G]
94-Nb	702	82-Br	698	4,274	(2)	2,9	[G]
110-Ag	706	110-Ag	677	29,052	(5)	7,2	[J]
110-Ag	706	110-Ag	687	19,666	(2)	2,9	[G]
110-Ag	706	154-Eu	692	14,255	(3)	4,3	[F]
110-Ag	706	144-Ce	696	10,176	(3)	4,3	[G]
110-Ag	706	82-Br	698	8,316	(4)	5,7	[G]
110-Ag	706	94-Nb	702	4,035	(4)	5,7	[D]
110-Ag	706	94-Nb	702	4,034	(4)	5,7	[G]
185-Os	717	82-Br	698	19,064	(2)	2,8	[G]
185-Os	717	94-Nb	702	14,791	(3)	4,2	[D]
185-Os	717	110-Ag	706	10,749	(4)	5,6	[D]
185-Os	717	110-Ag	706	10,752	(4)	5,6	[G]
124-Sb	722	66-Ga	686	36,702	(6)	8,5	[K]
124-Sb	722	94-Nb	702	20,138	(1)	1,4	[G]
124-Sb	722	124-Sb	713	9,006	(2)	2,8	[G]
108-Ag	721	110-Ag	706	16,211	(4)	5,6	[J]
108-Ag	723	110-Ag	706	16,248	(4)	5,6	[I]
154-Eu	723	110-Ag	706	16,625	(2)	2,8	[F]
95-Zr	724	185-Os	717	6,763	(2)	2,8	[D]
56-Co	733	110-Ag	657	75,751	(7)	10,1	[J]
56-Co	733	110-Ag	677	55,882	(6)	8,5	[J]
56-Co	733	110-Ag	687	46,494	(6)	8,5	[J]
56-Co	733	110-Ag	706	26,830	(6)	8,3	[J]
110-Ag	744	110-Ag	677	66,648	(5)	7,0	[J]
110-Ag	744	124-Sb	722	21,483	(6)	8,2	[G]
110-Ag	744	108-Ag	721	21,384	(4)	5,5	[J]
110-Ag	744	108-Ag	723	21,350	(4)	5,5	[I]
110-Ag	744	154-Eu	723	20,976	(4)	5,5	[F]
110-Ag	744	56-Co	733	10,767	(5)	6,8	[J]
154-Eu	756	110-Ag	744	12,521	(4)	5,3	[F]
110-Ag	763	154-Eu	756	7,136	(3)	3,9	[F]
110-Ag	763	110-Ag	677	86,311	(6)	8,3	[J]

722 <sup>108</sup>Ag722 <sup>108</sup>Ag722 <sup>108</sup>Ag722 <sup>108</sup>Ag

<i>Nuclídeo 1</i>	<i>Gama 1</i> (keV)	<i>Nuclídeo 2</i>	<i>Gama 2</i> (keV)	<i>D</i> (keV)	$\frac{\sigma_D}{E}^{(a)}$ (x10 <sup>6</sup> )	Origem do dado	Observação
110-Ag	763	56-Co	733	30,431	(6)	8,0	[J]
82-Br	776	110-Ag	763	12,572	(2)	2,6	[G]
82-Br	776	95-Tc	765	10,710	(5)	6,5	[G]
95-Tc	786	82-Br	776	9,680	(3)	3,8	[G]
56-Co	787	110-Ag	657	129,981	(7)	9,7	[J]
56-Co	787	110-Ag	677	110,112	(8)	10,9	[J]
56-Co	787	110-Ag	687	100,725	(8)	10,9	[J]
56-Co	787	110-Ag	706	81,060	(6)	8,0	[J]
56-Co	787	110-Ag	744	43,465	(6)	7,8	[J]
56-Co	787	110-Ag	763	23,800	(4)	5,2	[J]
58-Co	810	110-Ag	657	153,001	(8)	10,9	[J]
58-Co	810	110-Ag	677	133,131	(9)	12,1	[J]
58-Co	810	110-Ag	687	123,744	(8)	10,7	[J]
58-Co	810	110-Ag	706	104,076	(7)	9,2	[J]
58-Co	810	110-Ag	744	66,481	(7)	9,0	[J]
58-Co	810	110-Ag	763	46,816	(6)	7,6	[J]
110-Ag	818	110-Ag	677	140,394	(9)	12,0	[J]
110-Ag	818	110-Ag	744	73,746	(6)	7,7	[J]
110-Ag	818	110-Ag	763	54,082	(5)	6,3	[J]
110-Ag	818	58-Co	810	7,260	(5)	6,1	[D]
110-Ag	818	58-Co	810	7,259	(5)	6,1	[G]
110-Ag	818	58-Co	810	7,265	(4)	4,9	[J]
82-Br	827	110-Ag	818	9,802	(5)	6,1	[G]
82-Br	827	95-Tc	820	7,197	(5)	6,1	[G]
66-Ga	833	110-Ag	818	15,510	(2)	2,4	[K]
54-Mn	834	152-Eu	810	24,385	(6)	7,3	[H]
54-Mn	834	82-Br	827	7,014	(2)	2,4	[G]
95-Tc	835	95-Tc	820	14,524	(2)	2,4	[D]
95-Tc	835	82-Br	827	7,327	(4)	4,8	[G]
152-Eu	841	54-Mn	834	6,735	(8)	9,6	[H]
154-Eu	845	110-Ag	818	27,392	(7)	8,4	[F]
56-Co	846	95-Tc	835	11,615	(3)	3,6	[D]
58-Co	863	54-Mn	834	29,107	(2)	2,4	[G]
152-Eu	867	56-Co	846	20,620	(5)	5,8	[H]
94-Nb	871	58-Co	863	7,171	(2)	2,3	[G]
154-Eu	873	94-Nb	871	2,066	(6)	6,9	[F]
160-Tb	879	58-Co	863	15,422	(2)	2,3	[G]
160-Tb	879	94-Nb	871	8,259	(3)	3,4	[D]
185-Os	880	94-Nb	871	9,163	(3)	3,4	[D]
185-Os	880	185-Os	874	5,455	(3)	3,4	[D]
84-Rb	881	94-Nb	871	10,491	(1)	1,1	[G]
110-Ag	884	56-Co	846	37,914	(2)	2,3	[J]
110-Ag	884	66-Ga	853	31,653	(26)	29,9	[K]
110-Ag	884	94-Nb	871	13,562	(3)	3,4	[D]
110-Ag	884	94-Nb	871	13,560	(3)	3,4	[G]
110-Ag	884	154-Eu	873	11,494	(3)	3,4	[F]
110-Ag	884	185-Os	874	9,853	(4)	4,6	[G]
110-Ag	884	185-Os	874	9,857	(5)	5,7	[D]
110-Ag	884	160-Tb	879	5,306	(3)	3,4	[G]
110-Ag	884	160-Tb	879	5,304	(3)	3,4	[D]
110-Ag	884	185-Os	880	4,397	(3)	3,4	[G]
110-Ag	884	185-Os	880	4,401	(3)	3,4	[D]
192-Ir	884	94-Nb	871	13,426	(4)	4,6	[D]
192-Ir	884	185-Os	874	9,712	(8)	9,1	[D]
192-Ir	884	160-Tb	879	5,159	(2)	2,3	[D]
192-Ir	884	185-Os	880	4,254	(7)	7,9	[D]
46-Sc	889	66-Ga	833	55,741	(2)	2,3	[K]
46-Sc	889	66-Ga	853	36,228	(13)	14,9	[K]
46-Sc	889	94-Nb	871	18,162	(3)	3,4	[D]
46-Sc	889	160-Tb	879	9,895	(4)	4,5	[D]

<i>Nuclídeo 1</i>	<i>Gama 1</i> (keV)	<i>Nuclídeo 2</i>	<i>Gama 2</i> (keV)	<i>D</i> (keV)	$\frac{\sigma_D}{E}^{(a)}$ (x10 <sup>6</sup> )	<i>Origem</i> <i>do dado</i>	<i>Observação</i>
46-Sc	889	185-Os	880	8,993	(3)	3,4	[D]
46-Sc	889	84-Rb	881	7,667	(1)	1,1	[G]
46-Sc	889	110-Ag	884	4,594	(2)	2,3	[D]
46-Sc	889	110-Ag	884	4,594	(2)	2,3	[G]
46-Sc	889	192-Ir	884	4,734	(3)	3,4	[D]
154-Eu	892	110-Ag	884	8,099	(10)	11,3	[F]
154-Eu	892	46-Sc	889	3,498	(15)	16,8	[F]
56-Co	896	110-Ag	884	11,847	(15)	16,9	[J]
88-Y	898	160-Tb	879	18,661	(4)	4,5	[D]
88-Y	898	84-Rb	881	16,434	(4)	4,5	[G]
88-Y	898	192-Ir	884	13,496	(4)	4,5	[D]
154-Eu	904	110-Ag	884	19,384	(6)	6,7	[F]
154-Eu	904	46-Sc	889	14,805	(5)	5,6	[F]
110-Ag	937	56-Co	896	40,963	(17)	18,5	[J]
110-Ag	937	154-Eu	904	33,419	(6)	6,5	[F]
110-Ag	937	152-Eu	919	18,124	(19)	20,5	[H]
124-Sb	968	110-Ag	937	30,709	(3)	3,1	[G]
56-Co	977	110-Ag	937	39,879	(5)	5,2	[J]
56-Co	996	110-Ag	937	59,473	(13)	13,5	[J]
154-Eu	996	110-Ag	937	58,774	(3)	3,1	[F]
56-Co	1037	56-Co	977	60,469	(6)	6,0	[J]
56-Co	1037	56-Co	996	40,875	(12)	11,8	[J]
95-Tc	1039	84-Rb	1016	23,108	(4)	3,9	[G]
66-Ga	1039	124-Sb	968	71,037	(4)	4,0	[K]
82-Br	1044	84-Rb	1016	27,813	(13)	12,6	[G]
82-Br	1044	56-Co	1037	6,159	(3)	2,9	[G]
82-Br	1044	95-Tc	1039	4,735	(6)	5,8	[G]
124-Sb	1045	95-Tc	1039	5,862	(4)	3,8	[G]
207-Bi	1063	56-Co	1037	25,817	(3)	2,9	[G]
207-Bi	1063	82-Br	1044	19,657	(5)	4,7	[G]
207-Bi	1063	124-Sb	1045	18,529	(4)	3,8	[G]
198-Au	1087	207-Bi	1063	24,028	(3)	2,8	[D]
59-Fe	1099	198-Au	1087	11,561	(3)	2,7	[D]
65-Zn	1115	66-Ga	1039	76,322	(3)	2,8	[K]
65-Zn	1115	198-Au	1087	27,855	(2)	1,8	[D]
46-Sc	1120	198-Au	1087	32,853	(3)	2,7	[D]
182-Ta	1121	198-Au	1087	33,606	(3)	2,7	[D]
154-Eu	1128	46-Sc	1120	8,009	(8)	7,1	[F]
154-Eu	1128	182-Ta	1121	7,265	(22)	19,6	[F]
56-Co	1140	56-Co	1037	102,522	(16)	14,7	[J]
154-Eu	1140	46-Sc	1120	20,167	(8)	7,1	[F]
66-Ga	1148	65-Zn	1115	32,339	(21)	18,6	[K]
66-Ga	1148	46-Sc	1120	27,376	(22)	19,4	[K]
56-Co	1159	56-Co	1037	122,075	(18)	16,4	[J]
60-Co	1173	152-Eu	1085	87,391	(10)	8,9	[H]
60-Co	1173	152-Eu	1089	83,471	(13)	11,5	[H]
60-Co	1173	152-Eu	1112	61,149	(9)	7,9	[H]
60-Co	1173	154-Eu	1128	44,664	(14)	12,2	[F]
60-Co	1173	154-Eu	1140	32,529	(17)	14,7	[F]
56-Co	1175	182-Ta	1121	53,800	(5)	4,4	[J]
56-Co	1175	182-Ta	1121	53,805	(3)	2,6	[G]
160-Tb	1177	60-Co	1173	4,725	(2)	1,7	[D]
182-Ta	1189	60-Co	1173	15,814	(3)	2,5	[D]
182-Ta	1189	56-Co	1175	13,949	(4)	3,4	[J]
182-Ta	1189	56-Co	1175	13,960	(3)	2,5	[G]
182-Ta	1189	160-Tb	1177	11,085	(2)	1,7	[D]
66-Ga	1190	65-Zn	1115	74,738	(22)	19,1	[K]
66-Ga	1190	46-Sc	1120	69,755	(10)	8,7	[K]
152-Eu	1212	60-Co	1173	39,732	(13)	10,9	[H]
182-Ta	1231	182-Ta	1221	9,606	(2)	1,6	[D]

Nuclídeo 1	Gama 1 (keV)	Nuclídeo 2	Gama 2 (keV)	D (keV)	$\frac{\sigma_D}{E}$ (x10 <sup>6</sup> ) <sup>(a)</sup>	Origem do dado	Observação
56-Co	1238	182-Ta	1221	16,880	(2)	1,6	[G]
56-Co	1238	182-Ta	1231	7,273	(2)	1,6	[G]
182-Ta	1257	56-Co	1238	19,138	(3)	2,4	[G]
182-Ta	1257	154-Eu	1246	11,268	(7)	5,6	[F]
59-Fe	1291	160-Tb	1271	19,716	(3)	2,3	[D]
59-Fe	1291	22-Na	1274	17,053	(3)	2,3	[D]
60-Co	1332	154-Eu	1274	58,063	(6)	4,6	[F]
60-Co	1332	152-Eu	1299	33,350	(7)	5,3	[H]
60-Co	1332	132-Cs	1317	14,574	(4)	3,0	[G]
60-Co	1332	82-Br	1317	15,019	(3)	2,3	[G]
60-Co	1332	124-Sb	1325	6,952	(13)	9,8	[G]
66-Ga	1333	124-Sb	1325	7,610	(4)	3,0	[K]
56-Co	1360	60-Co	1332	27,701	(8)	5,9	[G]
56-Co	1360	56-Co	1335	24,817	(29)	21,5	[J]
124-Sb	1368	60-Co	1332	35,697	(12)	8,9	[G]
24-Na	1368	60-Co	1332	36,127	(3)	2,2	[G]
182-Ta	1373	56-Co	1360	13,619	(7)	5,1	[G]
110-Ag	1384	154-Eu	1274	109,864	(4)	3,0	[F]
110-Ag	1384	60-Co	1332	51,796	(4)	2,9	[G]
110-Ag	1384	56-Co	1360	24,099	(4)	2,9	[G]
110-Ag	1384	124-Sb	1368	16,136	(5)	3,6	[G]
110-Ag	1384	24-Na	1368	15,663	(3)	2,2	[G]
152-Eu	1408	110-Ag	1384	23,713	(4)	2,9	[H]
66-Ga	1418	110-Ag	1384	34,464	(7)	5,0	[K]
66-Ga	1459	124-Sb	1436	22,101	(14)	9,7	[K]
110-Ag	1475	152-Eu	1457	18,168	(21)	14,3	[H]
110-Ag	1475	66-Ga	1459	17,110	(17)	11,6	[K]
144-Ce	1489	82-Br	1474	14,275	(5)	3,4	[G]
144-Ce	1489	110-Ag	1475	13,370	(4)	2,7	[G]
154-Eu	1494	110-Ag	1475	18,260	(9)	6,1	[F]
110-Ag	1505	144-Ce	1489	15,880	(3)	2,0	[G]
110-Ag	1505	154-Eu	1494	10,992	(7)	4,7	[F]
66-Ga	1508	124-Sb	1436	71,597	(18)	12,2	[K]
154-Eu	1596	110-Ag	1562	34,193	(17)	10,8	[F]
124-Sb	1690	56-Co	1640	50,576	(24)	14,4	[J]
124-Sb	1690	58-Co	1674	16,246	(6)	3,6	[G]
124-Sb	1720	124-Sb	1690	29,442	(63)	37,0	[J]
207-Bi	1770	124-Sb	1690	79,257	(8)	4,6	[G]
56-Co	1771	124-Sb	1690	80,366	(10)	5,8	[J]
56-Co	1771	66-Ga	1741	30,402	(24)	13,7	[K]
56-Co	1810	56-Co	1771	39,397	(9)	5,0	[J]
56-Co	1810	124-Sb	1690	119,773	(20)	11,4	[J]
88-Y	1836	207-Bi	1770	65,835	(6)	3,3	[G]
88-Y	1836	56-Co	1771	64,713	(8)	4,4	[G]
88-Y	1836	125-Sn	1806	29,362	(9)	4,9	[G]
88-Y	1836	56-Co	1810	25,341	(11)	6,0	[G]
125-Sn	1889	88-Y	1836	53,832	(9)	4,8	[G]
84-Rb	1897	88-Y	1836	61,715	(7)	3,8	[G]
56-Co	1963	84-Rb	1897	65,966	(11)	5,7	[G]
56-Co	1963	66-Ga	1898	64,878	(6)	3,1	[K]
56-Co	1963	66-Ga	1918	45,380	(4)	2,1	[K]
125-Sn	2002	56-Co	1963	38,441	(7)	3,5	[G]
125-Sn	2002	132-Cs	1985	16,509	(10)	5,0	[G]
56-Co	2015	84-Rb	1897	117,426	(8)	4,1	[G]
56-Co	2015	125-Sn	2002	13,025	(5)	2,5	[G]
56-Co	2034	84-Rb	1897	136,996	(8)	4,1	[G]
56-Co	2034	125-Sn	2002	32,590	(5)	2,5	[G]
66-Ga	2066	56-Co	2034	31,059	(37)	18,0	[K]
56-Co	2113	125-Sn	2002	110,950	(9)	4,4	[G]
66-Ga	2173	56-Co	2113	60,227	(14)	6,5	[K]

<i>Nuclídeo 1</i>	<i>Gama 1</i> (keV)	<i>Nuclídeo 2</i>	<i>Gama 2</i> (keV)	<i>D</i> (keV)	$\frac{\sigma_D}{\bar{E}}^{(a)}$ (x10 <sup>6</sup> )	<i>Origem</i> do dado	<i>Observação</i>
144-Ce	2185	56-Co	2034	150,888	(17)	8,1	[J]
144-Ce	2185	56-Co	2034	150,893	(7)	3,3	[G]
144-Ce	2185	56-Co	2113	72,539	(8)	3,7	[J]
144-Ce	2185	56-Co	2113	72,545	(15)	7,0	[G]
66-Ga	2189	56-Co	2113	76,528	(6)	2,8	[K]
125-Sn	2201	144-Ce	2185	15,357	(11)	5,0	[G]
56-Co	2212	144-Ce	2185	27,242	(11)	5,0	[J]
56-Co	2212	144-Ce	2185	27,260	(16)	7,3	[G]
66-Ga	2213	66-Ga	2189	23,566	(9)	4,1	[K]
125-Sn	2275	144-Ce	2185	90,104	(9)	4,0	[G]
56-Co	2598	66-Ga	2393	205,305	(11)	4,4	[K]
56-Co	2598	66-Ga	2423	175,917	(8)	3,2	[K]
228-Th	2614	56-Co	2598	16,073	(9)	3,5	[G]
66-Ga	2751	56-Co	2598	153,397	(7)	2,6	[K]
24-Na	2754	56-Co	2598	155,570	(10)	3,7	[G]
66-Ga	2780	56-Co	2598	181,640	(22)	8,2	[K]
56-Co	3009	66-Ga	2933	76,201	(8)	2,7	[K]
56-Co	3009	66-Ga	2977	32,476	(43)	14,4	[K]
56-Co	3009	66-Ga	2993	16,351	(32)	10,7	[K]
66-Ga	3047	56-Co	3009	37,129	(32)	10,6	[K]
66-Ga	3228	56-Co	3201	26,863	(3)	0,9	[K]
56-Co	3451	66-Ga	3380	70,268	(5)	1,5	[K]
56-Co	3451	66-Ga	3422	29,079	(7)	2,0	[K]
56-Co	3451	66-Ga	3432	18,812	(7)	2,0	[K]

(a) Razão entre a incerteza da diferença de energia e a correspondente energia média das gamas.

[A] – ref. 49

[B] – ref. 50

[C] – ref. 51

[D] – ref. 52

[E] – ref. 53

[F] – ref. 54

[G] – ref. 55

[H] – ref. 56

[I] – ref. 57

[J] – ref. 58

[K] – ref. 59

Os dados indicados com a observação “*dubletos*” correspondem a gamas emitidos no decaimento do <sup>152</sup>Eu que são dubletos conhecidos e, portanto, não foram consideradas no ajuste. O dado indicado com a observação “*inconsistente*” não foi utilizado pela ref. 1 por ser inconsistente com os demais dados.

A indicação “*outro Eu*” refere-se a dois gamas que a ref. 1 apresentou como sendo do <sup>152</sup>Eu enquanto, no artigo original<sup>[54]</sup>, percebe-se que estes dados se referem, na verdade, a gamas do <sup>154</sup>Eu (quando usamos a nomenclatura adotada neste trabalho, pois na verdade são raios gama emitidos pelo <sup>154</sup>Gd que segue o decaimento por Captura Eletrônica do <sup>154</sup>Eu).

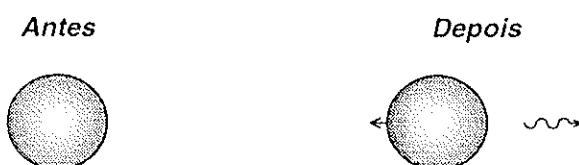
Há uma inconsistência entre os resultados das ref. 58 e 57 sobre a energia do gama de 722 keV da <sup>108</sup>Ag, pois apresentam diferenças de cerca de 20 eV enquanto as

incertezas são da ordem de 4 eV. Os dados correspondentes a estes resultados estão indicados com a observação “722  $^{108}\text{Ag}$ ”. Para lidar com esta questão, consideramos em nosso ajuste 2 parâmetros diferentes para representar este gama, o “721 keV da  $^{108}\text{Ag}$ ”, correspondendo aos dados da ref. 58 e o “723 keV da  $^{108}\text{Ag}$ ” para os dados da ref. 57.

Novos resultados experimentais podem resolver esta pendência, indicando qual dos dois resultados está incorreto, ou revelar que o 722 keV é um doubleto (o que explicaria a inconsistência entre os resultados obtidos pelos dois grupos de experimentadores experientes em determinações precisas de energias de raios gama).

## ***II.6 – Relações baseadas nos esquemas de decaimento***

Os esquemas de decaimento permitem estabelecer relações entre energias de raios gama emitidos por um mesmo nuclídeo devido à relação existente entre as energias destes raios gama e dos níveis nucleares. Nestas relações é considerada a energia cinética adquirida pelo núcleo quando emite o fóton. Para isso, é utilizada a conservação de energia e de momento do sistema núcleo-fóton, como esquematizado na Figura II.3.



**Figura II.3 - Representação do sistema núcleo-fóton antes e depois de uma transição gama.**

Consideremos o sistema inicialmente em repouso no estado de energia  $N_i$ . Chamando de  $\vec{p}_N$  o momento linear que o núcleo adquire devido à emissão do fóton de momento  $\vec{p}$  e energia  $E$ . A energia cinética de recuo adquirida pelo núcleo é dada por

$$E_N = \frac{|\vec{p}_N|^2}{2M}$$

onde  $M$  é a massa de repouso do núcleo. Esta energia pode ser determinada em termos da energia do fóton impondo a conservação de momento, que implica que  $|\vec{p}_N| = |\vec{p}|$ , e lembrando que a relação entre a energia e momento de um fóton é expressa por  $E = |\vec{p}|c$ .

Com isso, a relação entre a energia,  $E$ , de um fóton emitido por uma transição entre os níveis nucleares de energias  $N_I$  e  $N_F$  pode ser obtida usando a conservação da energia total do sistema, resultando em:

$$N_I - N_F = E + \frac{(E)^2}{2M.c^2}. \quad (25)$$

O último termo da equação (25) corresponde à energia de recuo do núcleo:

$$K = \frac{(E)^2}{2M.c^2}. \quad (26)$$

Os esquemas de decaimento nucleares definem como as transições gama se relacionam com os níveis nucleares. Geralmente estas relações são utilizadas como equações de vínculo, pois as incertezas devidas à massa de repouso do núcleo e ao fato de que uma parte dos núcleos pode não recuar por estarem presos a uma rede cristalina são consideradas desprezíveis frente às incertezas finais nas energias ajustadas. Entretanto, em nosso ajuste, as relações baseadas nos esquemas de decaimento foram incorporadas como dados experimentais, sendo considerada uma incerteza proporcional ao recuo ( $\sigma_{K_H} \approx H.K$ ). Com isso, alterando o valor do termo de proporcionalidade  $H$  é possível avaliar quão precisas têm que ser estas relações para que sua incerteza não produza alterações no resultado final. A outra incerteza considerada é devida à relação entre as constantes fundamentais expressas por  $f$ ,

$$\sigma_{K_f} = 2.K \cdot \frac{\sigma_f}{f}.$$

Considerando estas fontes de incerteza, a incerteza final nas equações cascata-crossover passa a ser

$$\sigma_K = \sqrt{(H.K)^2 + \left( 2.K \cdot \frac{\sigma_f}{f} \right)^2}. \quad (27)$$

A inclusão das informações baseadas no esquema de decaimento pode ser efetuada determinando a energia dos níveis nucleares envolvidos. Neste caso, a relação entre a energia de recuo  $K_i$  e as energias a serem estimadas no ajuste (energia do gama  $E_i^0$  e dos níveis nucleares ocupados antes e depois da transição  $N_{I_i}^0$  e  $N_{F_i}^0$ ) é dada por

$$K_i = N_{I_i}^0 - N_{F_i}^0 - E_i^0 + \varepsilon_{K_i} \quad (28)$$

onde  $\varepsilon_{K_i}$  é o erro, desconhecido, de  $K_i$  e se relaciona com a incerteza de  $K_i$  determinada pela equação (27) por  $(\sigma_{K_i})^2 = \langle \varepsilon_{K_i}^2 \rangle$ .

Observando a equação (28) percebe-se que ela só permite determinar a diferença entre as energias de níveis nucleares. Para que as energias dos níveis nucleares sejam determinadas é necessário atribuir um valor para a energia de um dos níveis. Geralmente isso é efetuado definindo-se o estado fundamental como tendo energia igual a zero.

### II.6.1 – Os esquemas de decaimento utilizados no ajuste

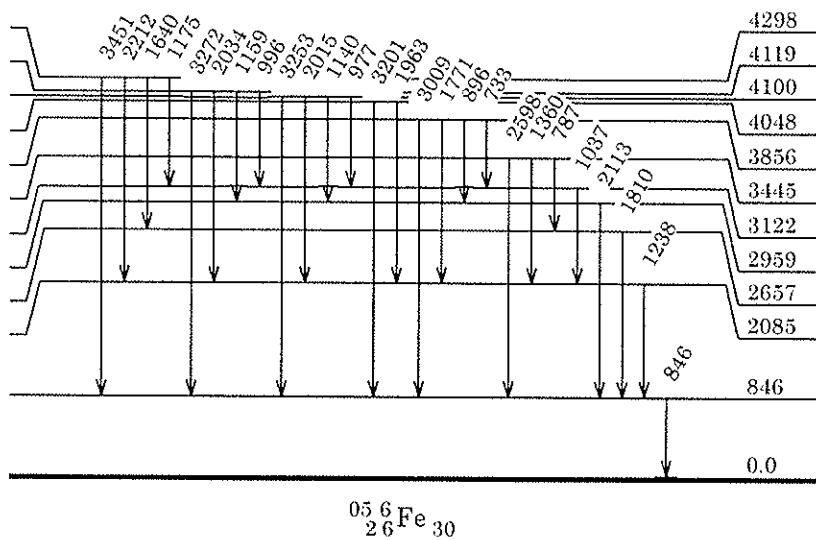
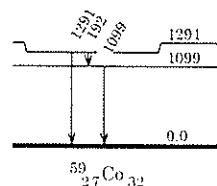
Os esquemas de decaimento considerados nesta seção foram obtidos da ref. 111. Foram utilizadas 248 transições gama relacionadas a 127 níveis nucleares excitados de 26 nuclídeos. Destes 248 raios gama, 15 aparecem apenas nas relações baseadas nos esquemas de decaimento. Portanto, a elevação do número de graus de liberdade do ajuste por causa destas relações foi de 106 unidades (248 dados para determinar  $127+15 = 142$  novos parâmetros).

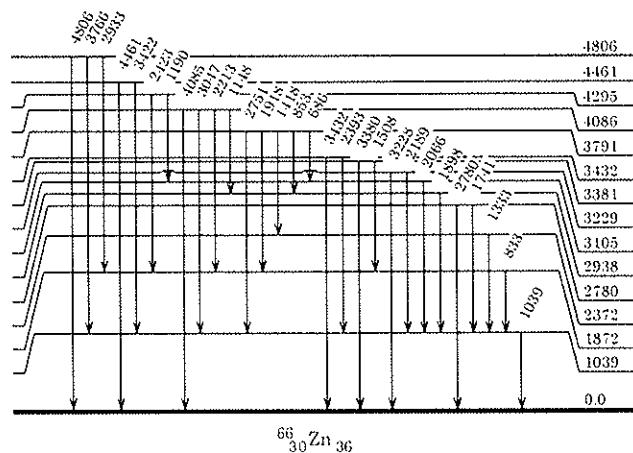
Convém chamar atenção para o fato de que cerca de 70% dos 330 raios gama do conjunto de padrões de calibração que determinamos tem suas energias envolvidas em relações baseadas nos esquemas de decaimento, o que contribui para elevar a auto-consistência deste conjunto de padrões. A Tabela II-6 apresenta uma visão resumida das informações sobre os nuclídeos considerados, indicando as figuras onde os esquemas de níveis nucleares são detalhados. A primeira coluna informa o tipo de decaimento e os núcleos envolvidos, sendo CE o símbolo para captura eletrônica.

**Tabela II-6 - Nuclídeos para os quais foram consideradas relações baseadas nos esquemas de decaimento**

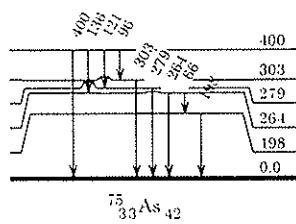
<i>Decaimento</i>	<i>Número de Gamas</i>	<i>Níveis excitados</i>	<i>Local</i>	<i>Observações</i>
CE do $^{56}\text{Co}$ para o $^{56}\text{Fe}$	26	11	<i>Figura II.4</i>	Importante para energias superiores a 2 MeV
$\beta^-$ do $^{59}\text{Fe}$ para o $^{59}\text{Co}$	3	2	<i>Figura II.5</i>	
CE do $^{66}\text{Ga}$ para o $^{66}\text{Zn}$	29	14	<i>Figura II.6</i>	Importante para energias superiores a 2 MeV
CE do $^{75}\text{Se}$ para o $^{75}\text{As}$	9	5	<i>Figura II.7</i>	
$\beta^-$ do $^{82}\text{Br}$ para o $^{82}\text{Kr}$	10	6	<i>Figura II.8</i>	
CE do $^{84}\text{Rb}$ para o $^{84}\text{Kr}$	3	2	<i>Figura II.9</i>	
CE do $^{95}\text{Tc}$ para o $^{95}\text{Mo}$	6	3	<i>Figura II.10</i>	
$\beta^-$ da $^{110}\text{Ag}$ para o $^{110}\text{Cd}$	15	7	<i>Figura II.11</i>	Muito utilizada em medidas de diferença de energia
$\beta^-$ do $^{124}\text{Sb}$ para o $^{124}\text{Te}$	12	6	<i>Figura II.12</i>	
$\beta^-$ do $^{125}\text{Sb}$ para o $^{125}\text{Te}$	5	3	<i>Figura II.13</i>	
CE do $^{132}\text{Cs}$ para o $^{132}\text{Xe}$	3	2	<i>Figura II.14</i>	
CE do $^{133}\text{Ba}$ para o $^{133}\text{Cs}$	9	4	<i>Figura II.15</i>	
$\beta^-$ do $^{144}\text{Ce}$ para o $^{144}\text{Pr}$ que decai por $\beta^-$ para o $^{144}\text{Nd}$	3	2	<i>Figura II.16</i>	
$\beta^-$ do $^{152}\text{Eu}$ para o $^{152}\text{Gd}$	8	5	<i>Figura II.17</i>	Importante para calibração de eficiência de detectores
CE do $^{152}\text{Eu}$ para o $^{152}\text{Sm}$	14	8	<i>Figura II.18</i>	Importante para calibração de eficiência de detectores <sup>[108]</sup>
CE do $^{153}\text{Gd}$ para o $^{153}\text{Eu}$	7	4	<i>Figura II.19</i>	
$\beta^-$ do $^{154}\text{Eu}$ para o $^{154}\text{Gd}$	16	8	<i>Figura II.20</i>	
$\beta^-$ do $^{160}\text{Tb}$ para o $^{160}\text{Dy}$	9	5	<i>Figura II.21</i>	
$\beta^-$ do $^{161}\text{Tb}$ para o $^{161}\text{Dy}$	3	2	<i>Figura II.22</i>	

Decaimento	Número de Gamas	Níveis excitados	Local	Observações
CE do $^{169}\text{Yb}$ para o $^{169}\text{Tm}$	8	5	Figura II.23	
$\beta^-$ do $^{182}\text{Ta}$ para o $^{182}\text{W}$	24	8	Figura II.24	Energias inferiores a 1MeV medidas por difração
CE do $^{185}\text{Os}$ para o $^{185}\text{Re}$	7	4	Figura II.25	
$\beta^-$ do $^{192}\text{Ir}$ para o $^{192}\text{Pt}$	10	5	Figura II.26	
$\beta^-$ do $^{198}\text{Au}$ para o $^{198}\text{Hg}$	3	2	Figura II.27	O 411 keV foi muito utilizado em medidas baseadas em difração
$\beta^-$ do $^{199}\text{Au}$ para o $^{199}\text{Hg}$	3	2	Figura II.28	
$\beta^-$ do $^{203}\text{Hg}$ e CE do $^{203}\text{Pb}$ para o $^{203}\text{Tl}$	3	2	Figura II.29	

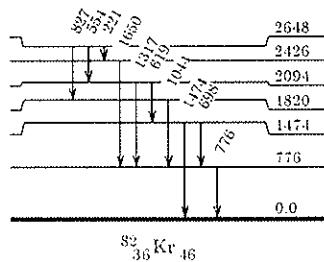
Figura II.4 - Níveis nucleares do  $^{56}\text{Fe}$  considerados no ajuste.Figura II.5 - Níveis nucleares do  $^{59}\text{Co}$  considerados no ajuste.



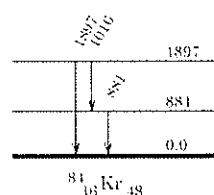
**Figura II.6 - Níveis nucleares do  $^{66}\text{Zn}$  considerados no ajuste.**



**Figura II.7 - Níveis nucleares do  $^{75}\text{As}$  considerados no ajuste.**



**Figura II.8 - Níveis nucleares do  $^{82}\text{Kr}$  considerados no ajuste.**



**Figura II.9 - Níveis nucleares do  $^{84}\text{Kr}$  considerados no ajuste.**

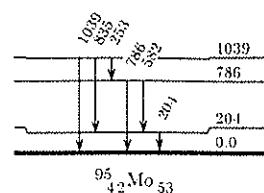


Figura II.10 - Níveis nucleares do  $^{95}\text{Mo}$  considerados no ajuste.

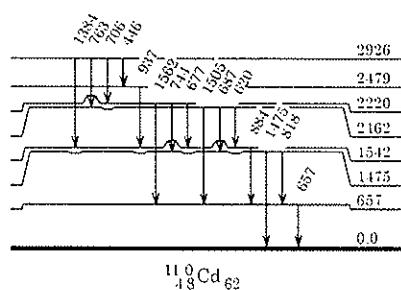


Figura II.11 - Níveis nucleares do  $^{110}\text{Cd}$  considerados no ajuste.

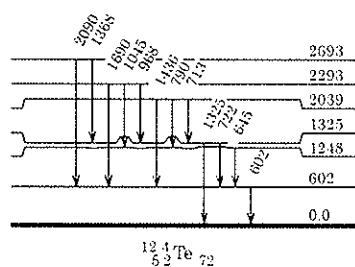


Figura II.12 - Níveis nucleares do  $^{124}\text{Te}$  considerados no ajuste.

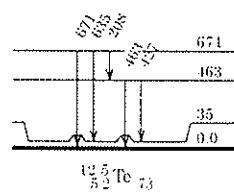


Figura II.13 - Níveis nucleares do  $^{125}\text{Te}$  considerados no ajuste.

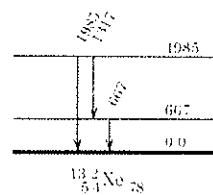


Figura II.14 - Níveis nucleares do  $^{132}\text{Xe}$  considerados no ajuste.

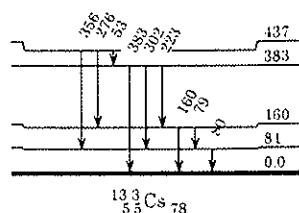


Figura II.15 - Níveis nucleares do  $^{133}\text{Cs}$  considerados no ajuste.

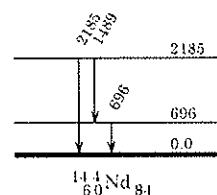


Figura II.16 - Níveis nucleares do  $^{144}\text{Nd}$  considerados no ajuste.

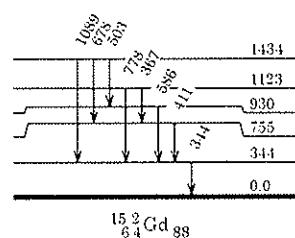


Figura II.17 - Níveis nucleares do  $^{152}\text{Gd}$  considerados no ajuste.

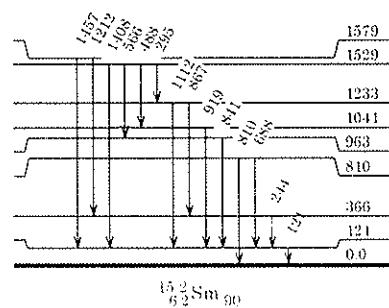


Figura II.18 - Níveis nucleares do  $^{152}\text{Sm}$  considerados no ajuste.

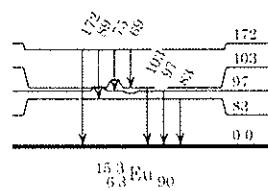


Figura II.19 - Níveis nucleares do  $^{153}\text{Eu}$  considerados no ajuste.

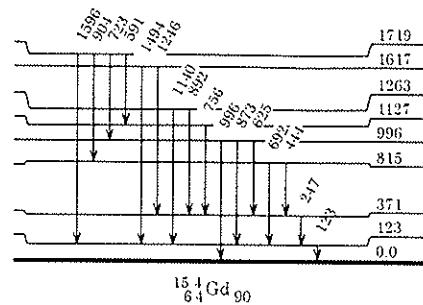


Figura II.20 - Níveis nucleares do  $^{154}\text{Gd}$  considerados no ajuste.

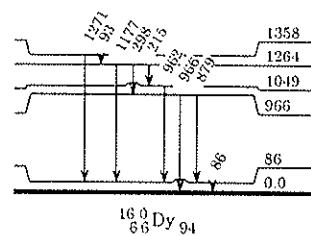


Figura II.21 - Níveis nucleares do  $^{160}\text{Dy}$  considerados no ajuste.

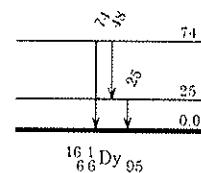


Figura II.22 - Níveis nucleares do  $^{161}\text{Dy}$  considerados no ajuste.

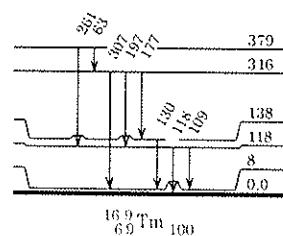


Figura II.23 - Níveis nucleares do  $^{169}\text{Tm}$  considerados no ajuste.

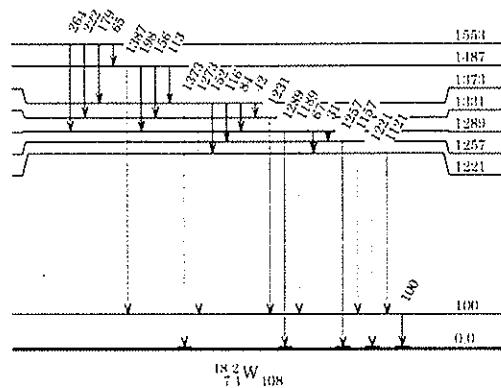


Figura II.24 - Níveis nucleares do  $^{182}\text{W}$  considerados no ajuste.

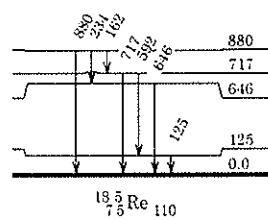


Figura II.25 - Níveis nucleares do  $^{185}\text{Re}$  considerados no ajuste.

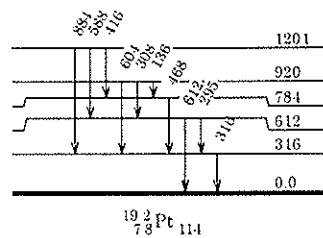


Figura II.26 - Níveis nucleares do  $^{192}\text{Pt}$  considerados no ajuste.

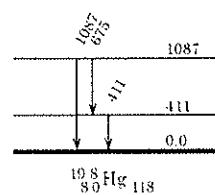


Figura II.27 - Níveis nucleares do  $^{198}\text{Hg}$  considerados no ajuste.

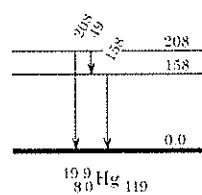


Figura II.28 - Níveis nucleares do  $^{199}\text{Hg}$  considerados no ajuste.

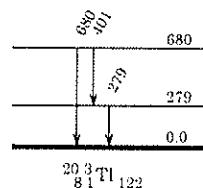


Figura II.29 - Níveis nucleares do  $^{203}\text{Tl}$  considerados no ajuste.

## II.7 – Valores adotados para as constantes fundamentais relacionadas às energias dos raios gama

As energias dos raios gama dependem dos valores adotados para a relação entre as constantes fundamentais expressa pela equação (14), aqui reproduzida,

$$f = \frac{h.c}{e.a_{Si}^{\#}}$$

onde  $a_{Si}^{\#}$  é o parâmetro de rede do cristal de silício PERFX-XROI utilizado no NBS, nas condições das medidas relativas de parâmetros de rede efetuadas no NBS: temperatura de 22,5 °C na escala de temperatura definida pelo IPTS-68<sup>[76]</sup> e pressão de 0,987 atm.

### II.7.1 O fator de conversão de comprimento de onda em energia

Nesta primeira análise, assim como na ref. 1, os valores adotados para as constantes fundamentais são os fornecidos pelo CODATA 86<sup>[5]</sup>, que substituiu a compilação de 1973<sup>[4]</sup> e utilizou dados experimentais obtidos até o dia 1 de Janeiro de 1986. Os valores recomendados para o fator de conversão de comprimento de onda para energia  $E_{\lambda} = \frac{h.c}{e}$  referente às compilações de 1973 e de 1986 são apresentados na Tabela II-7.

**Tabela II-7 Valores recomendados para o fator de conversão de comprimento de onda em energia nas compilações das constantes fundamentais de 1973 e de 1986.**

<i>Origem</i>	$E_\lambda (10^6 \text{ eV.m})$	<i>Incerteza relativa</i>
<i>CODATA73<sup>[4]</sup></i>	1,239 852 0 (32)	$2,6 \cdot 10^{-6}$
<i>CODATA86<sup>[5]</sup></i>	1,239 842 44 (37)	$0,30 \cdot 10^{-6}$

## II.7.2 O parâmetro de rede do Silício

Quanto ao parâmetro de rede do Si, embora o mesmo não seja uma constante fundamental no sentido usual do termo, este parâmetro quando referido a cristais de Si de composição isotópica definida, livre de impurezas e em condições de temperatura e pressão bem estabelecidas, pode ser considerado como uma grandeza de valor bem definido. De fato, o parâmetro de rede do Si (definido para um cristal perfeito, livre de impurezas, com composição isotópica de Si natural, a 22,5 °C no vácuo) é uma das constantes fundamentais apresentadas no CODATA 86.

### II.7.2 (i) Correção de impurezas no cristal de Si do NBS

O cristal de Si utilizado como padrão para as medidas de energia gama não é, obviamente, um cristal ideal totalmente livre de impurezas. Com informações de intercomparações entre cristais de Si e do efeito das principais impurezas (Carbono, Oxigênio e Nitrogênio) no parâmetro de rede de um cristal de Si é possível estabelecer a relação entre o parâmetro de rede de um cristal ideal de Si,  $a_{Si}$ , e do cristal de Si do NBS,  $a_{NBS}$ , dos quais as energias gama dependem (PERFX-XROI).

- A relação entre o parâmetro de rede do cristal do NBS e do cristal WASO 17 ( $a_{W17}$ ) foi medido no NIST por Kessler e colaboradores<sup>[88, 87]</sup> onde posteriormente foram detectados problemas com relação ao preparo da amostra e determinação da temperatura<sup>[89]</sup>. Após a correção destes problemas obteve-se<sup>[90]</sup>

$$\Psi_{W17,NBS} = \frac{a_{W17} - a_{NBS}}{a_{W17}} = 7(17).10^{-9}, \quad (29)$$

que é o valor utilizado no CODATA 1998 (pág. 431 da ref. 6);

- O parâmetro de rede do cristal WASO 17 foi medido em relação ao do cristal WASO 04 ( $a_{W04}$ ) na PTB<sup>[91, 6 (p.267)]</sup>. A incerteza fornecida na ref. 91 foi combinada com a incerteza instrumental do intercomparador de parâmetros de rede da PTB<sup>[93, 92]</sup> ( $5.10^{-9}$ ) e com a incerteza de variação entre as amostras cortadas a partir de um mesmo cristal<sup>[6 (p.267)]</sup> ( $\sqrt{2}.10^{-8}$  tanto para o WASO 17 quanto para o WASO 04), resultando em

$$\Psi_{W04,W17} = \frac{a_{W04} - a_{W17}}{a_{W04}} = -22(22).10^{-9}, \quad (30)$$

que é o valor utilizado no CODATA 1998 (pág. 410 da ref. 6);

- O cristal WASO 04 teve suas características bastante estudadas<sup>[94, 92]</sup>, tendo sido considerado por Martin e colaboradores como adequado para estabelecer a relação entre o parâmetro de rede do cristal idealizado de Si e um cristal real através de correções de impurezas<sup>[91]</sup>. A correção dos efeitos de impurezas no cristal WASO 04 efetuadas na ref. 92 e utilizada no CODATA 1998 (pág 411 da ref. 6) consideravam apenas a variação do parâmetro de rede provocadas pelo Carbono e pelo Oxigênio. A correção dos efeitos do Nitrogênio, no entanto, também é importante para este cristal, e o valor que utilizamos para correção de impurezas do cristal WASO 04 é baseado no valor adotado na ref. 95:

$$\Psi_{W04,Si} = \frac{a_{W04} - a_{Si}}{a_{W04}} = -10(11).10^{-9} \quad (31)$$

Considerando os resultados das equações (29), (30) e (31) obtemos o fator que permite estabelecer a relação entre o parâmetro de rede do cristal do NBS e do cristal ideal de Si:

$$\Psi_{NBS,Si} = -\Psi_{W17,NBS} - \Psi_{W04,W17} + \Psi_{W04,Si} = 5(30).10^{-9} \quad (32)$$

onde consideramos válidas as relações  $\Psi_{A,B} = -\Psi_{B,A}$  e  $\Psi_{A,B}.a_A = \Psi_{A,B}.a_{Si}$ . Estas aproximações estão baseadas no fato de que as diferenças entre os parâmetros de rede dos cristais de Si considerados são certamente bem inferiores a  $10^{-7}$  e, portanto, o erro introduzido por estas considerações são várias ordens de grandeza inferiores às incertezas de cada  $\Psi_{A,B}$ .

O parâmetro de rede do cristal do NBS nas condições do cristal idealizado de Si é obtido por

$$a_{NBS} = a_{Si} \cdot (1 + \Psi_{NBS, Si}) \quad (33)$$

### **II.7.2 (ii) Correção para a pressão atmosférica**

A dependência do parâmetro de rede do Si com a pressão é expressa por<sup>[96]</sup>

$$K = \frac{\frac{\Delta a_{Si}}{a_{Si}}}{\Delta P} = \frac{-1}{c_{11} + 2.c_{12}} \quad (34)$$

com  $c_{11} = 1,657 \cdot 10^{11} Pa$  e  $c_{12} = 6,39 \cdot 10^{10} Pa$  para o Si<sup>[97]</sup> na temperatura de 22,5 °C. A diferença relativa no parâmetro de rede do Si, provocado pela compressibilidade do Si, para a pressão de 0,987 atm,  $\Delta P = 100 kPa$ , é  $\frac{\Delta a_{Si}}{a_{Si}} = -0,341 \cdot 10^{-6}$ , onde o sinal

negativo indica que a variação foi no sentido de reduzir o parâmetro de rede (pois o cristal está sendo comprimido pela atmosfera).

### **II.7.2 (iii) O parâmetro de rede do cristal de Si do NBS**

Aplicando as correções expressas pelas relações (33) e (34), podemos obter o valor para o parâmetro de rede do Si nas condições do NBS a partir do parâmetro de rede do Si apresentado na compilação de 1986<sup>[5]</sup>,  $a_{Si} = 0,543\,101\,96(11) \cdot 10^{-9} m$  (incerteza relativa de  $0,20 \cdot 10^{-6}$ ) resultando em

$$a_{Si}^{\#} = 0,543\,101\,78(11)\cdot 10^{-9}\,m.$$

### II.7.3 O parâmetro relacionado às constantes fundamentais, $f$

Com isso, o valor adotado para a relação entre as constantes fundamentais das quais as energias dos gamas dependem, expressa por  $f$ , foi

$$f = \frac{h.c}{e.a_{Si}^{\#}} = 2,282\,891\,5(8)\,keV, \quad (35)$$

cuja incerteza relativa é de  $0,36\cdot 10^{-6}$ .

Este é um dado experimental como qualquer outro e é covariante com todas as energias medidas em detectores semicondutores, conforme relação expressa em (21) e com os dados de relações baseadas nos esquemas de decaimento.

A inclusão deste dado no ajuste se fez mediante a relação

$$f = f^0 + \varepsilon_f \quad (36)$$

onde  $f^0$  representa o valor verdadeiro da razão entre as constantes fundamentais expressa pela equação (14) e o erro se relaciona com a incerteza de  $f$  por  $\sigma_f^{-2} = \langle \varepsilon_f^{-2} \rangle$ .

## II.8 – Relação entre os dados e os parâmetros do ajuste

As equações (16), (18), (23), (24), (28) e (36) apresentam as relações entre os dados experimentais e os valores verdadeiros das grandezas a serem determinadas no ajuste: a razão entre as constantes fundamentais expressa por  $f$ ; as energias das transições gama padrões para calibração; e as energias dos níveis nucleares dos esquemas de decaimento considerados.

Devido às equações (16), (18) e (28) a relação entre os dados e as grandezas não são lineares. Assim, para a realização do ajuste é necessário linearizar as

equações (expandindo-as até a primeira ordem) e utilizar o método iterativo de Gauss<sup>[29]</sup>. Com isso, os parâmetros do ajuste passam a ser as diferenças ( $\Delta\phi^0$ ) entre os valores das grandezas ( $\phi^0$ ) e os valores estimados para elas ( $\phi^c$ ), ou seja,

$$\Delta\phi^0 = \phi^0 - \phi^c. \quad (37)$$

Reescrevendo as equações (16), (18), (23), (24), (28) e (36) na forma adequada ao uso do método de Gauss, obtemos:

$$R_i - \frac{E_i^c}{f^c} = \frac{-E_i^c}{(f^c)^2} \Delta f^0 + \frac{1}{f^c} \Delta E_i^0 + \varepsilon_{R_i} \quad (38)$$

$$F_{jk} - \frac{E_j^c}{E_k^c} = \frac{1}{E_k^c} \Delta E_j^0 + \frac{-E_j^c}{(E_k^c)^2} \Delta E_k^0 + \varepsilon_{F_{jk}} \quad (39)$$

$$E_l - E_l^c = \Delta E_l^0 + \varepsilon_{E_l} \quad (40)$$

$$D_{mn} - (E_m^c - E_n^c) = \Delta E_m^0 - \Delta E_n^0 + \varepsilon_{D_{mn}} \quad (41)$$

$$K_o - (N_{I_o}^c - N_{F_o}^c - E_o^c) = \Delta N_{I_o}^0 - \Delta N_{F_o}^0 - \Delta E_o^0 + \varepsilon_{K_o} \quad (42)$$

$$f - f^c = \Delta f^0 + \varepsilon_f. \quad (43)$$

Escrevendo as equações do ajuste no formalismo matricial para as equações (38) a (43) obtemos o vetor de dados:

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \begin{pmatrix} R_i - \frac{E_i^c}{f^c} \\ \vdots \\ F_{jk} - \frac{E_j^c}{E_k^c} \\ \vdots \\ E_l - E_l^c \\ \vdots \\ D_{mm} - (E_m^c - E_n^c) \\ \vdots \\ K_o - (N_{I_o}^c - N_{F_o}^c - E_o^c) \\ \vdots \\ f - f^c \end{pmatrix}, \quad (44)$$

a matriz de planejamento:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \frac{-E_t^c}{(f^c)^2} & \frac{1}{f^c} & 0 & \ddots & 0 & 0 & \ddots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \\ 0 & \frac{1}{E_k^c} & \frac{-E_j^c}{(E_k^c)^2} & \ddots & 0 & 0 & \ddots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \\ 0 & 1 & 0 & \ddots & 0 & 0 & \ddots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \\ 0 & 1 & -1 & \ddots & 0 & 0 & \ddots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \\ 0 & -1 & 0 & \ddots & 1 & -1 & \ddots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots \end{pmatrix}, \quad (45),$$

o vetor de parâmetros

$$\vec{A}^0 = \begin{pmatrix} \Delta f^0 \\ \Delta E_1^0 \\ \Delta E_2^0 \\ \vdots \\ \Delta N_1^0 \\ \Delta N_2^0 \\ \vdots \end{pmatrix}, \quad (46)$$

e o vetor de erros

$$\vec{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{R_i} \\ \vdots \\ \varepsilon_{F_{jk}} \\ \vdots \\ \varepsilon_{E_l} \\ \vdots \\ \varepsilon_{D_{mn}} \\ \vdots \\ \varepsilon_{K_o} \\ \vdots \\ \varepsilon_f \end{pmatrix}. \quad (47)$$

A equação do modelo linear do ajuste é expressa por

$$\vec{Y} = \mathbf{X} \cdot \vec{A}^0 + \vec{\varepsilon} \quad (48)$$

e a relação entre os erros e a matriz de covariância dos dados  $\mathbf{V}_Y$  é dada por

$$V_{Y_{ik}} = \langle \varepsilon_i \cdot \varepsilon_k \rangle. \quad (49)$$

Por analogia com a equação (7), obtemos a expressão para o vetor com os valores estimados dos parâmetros do ajuste pelo Método dos Mínimos Quadrados no formalismo matricial:

$$\tilde{\mathbf{A}} = [\mathbf{X}^T \cdot (\mathbf{V}_Y)^{-1} \cdot \mathbf{X}]^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot (\mathbf{V}_Y)^{-1} \cdot \mathbf{Y}, \quad (50)$$

sendo a matriz de covariância dos parâmetros ajustados dada por

$$\mathbf{V}_{\tilde{\mathbf{A}}} = [\mathbf{X}^T \cdot (\mathbf{V}_Y)^{-1} \cdot \mathbf{X}]^{-1}. \quad (51)$$

Supondo que as funções densidade de probabilidade dos erros dos dados sejam gaussianas\*, a variável

$$\chi^2 = (\mathbf{Y} - \mathbf{X} \cdot \tilde{\mathbf{A}})^T \cdot (\mathbf{V}_Y)^{-1} \cdot (\mathbf{Y} - \mathbf{X} \cdot \tilde{\mathbf{A}}) \quad (52)$$

segue uma função densidade de probabilidade (f.d.p.) de qui-quadrado com número de graus de liberdade ( $\nu$ ) igual à diferença entre o número de dados ( $N$ ) e o número de parâmetros ( $m$ ),  $\nu = N - m$ , e pode ser utilizada para avaliar a qualidade do ajuste.

O ajuste é efetuado de modo iterativo, atualizando o valor das estimativas dos parâmetros a cada iteração. Lembrando que o vetor de parâmetros ajustados  $\tilde{\mathbf{A}}$  é a estimativa para a diferença  $\Delta\phi^0$  entre os valores verdadeiros das grandezas e seus valores estimados, conforme a equação (37), essa atualização das estimativas é efetuada por

$$\phi^{c'} = \phi^c + \tilde{\mathbf{A}}$$

onde  $\phi^{c'}$  e  $\phi^c$  são os vetores das estimativas das grandezas após e antes do ajuste, respectivamente.

Após isso, uma nova iteração do ajuste é realizada usando as estimativas dos valores das grandezas dadas por  $\phi^{c'}$ . Esse é um processo convergente que é repetido até que as alterações nos valores das grandezas não sejam mais estatisticamente

---

\* Esta hipótese pode ser considerada adequada, pois cada um dos dados corresponde à média de muitas medições, cada uma delas sujeitas a diversas fontes de erro.

significantes, ou seja, que as alterações sejam todas bem inferiores às incertezas dos parâmetros correspondentes\*.

A matriz de covariância das estimativas das grandezas é igual a matriz de covariância dos parâmetros ajustados. No próximo capítulo discutiremos os resultados obtidos no ajuste e, em especial, analisaremos as covariâncias obtidas discutindo suas origens.

---

\* Geralmente exige-se que a maior das variações relativas (variação dividida pela incerteza) seja inferior a 0,01 (1%). No nosso ajuste, exigimos que a soma dos quadrados de todas as variações relativas fosse inferior a 0,0001, o que se obtém já na segunda iteração.

# Capítulo III. Resultados do ajuste de energias dos padrões gama

O ajuste foi efetuado segundo o procedimento e os dados apresentados no capítulo anterior (utilizando para as constantes fundamentais os valores baseados na recomendação do CODATA 86) fornecendo o conjunto de valores a serem adotados, com a respectiva matriz de covariância, para as energias dos 330 raios gama considerados por Helmer e van der Leun<sup>[1]</sup> como padrões adequados para a calibração de detectores semicondutores.

Além das energias destes gamas também foram determinadas no ajuste as energias de 127 níveis nucleares de 26 diferentes nuclídeos e a relação entre as constantes fundamentais das quais as energias gama dependem.

As listagens dos diversos resultados do ajuste (valores a serem adotados para as energias, principais correlações e diferenças com relação à análise da ref. 1) são muito extensas. Portanto, optamos por mostrar no texto apenas uma pequena parte das tabelas de resultados deixando para apresentar as versões completas das tabelas no Apêndice A, além de incluí-las no CD-ROM anexado a esta tese. Nas discussões e análises apresentadas a seguir reproduziremos os trechos correspondentes das tabelas de resultados a que se referem, com o objetivo de facilitar a leitura.

## ***III.1 – Testes de qualidade do ajuste***

É importante ressaltar que o procedimento que utilizamos incorpora todos os dados experimentais considerados em um *único ajuste*. Com isso é possível testar, por meio de ferramentas estatísticas consagradas, o teste de qui-quadrado e da análise de resíduos, a adequação das incertezas consideradas, e principalmente, verificar a

consistência geral das informações experimentais provenientes não apenas de fontes diferentes, mas de experiências com metodologias bastante diversas, conforme detalhado no Capítulo II.

### III.1.1 Teste de Qui-quadrado

O qui-quadrado obtido no ajuste foi 488 para 396 graus de liberdade (855 dados e 459 parâmetros, conforme a Tabela III-1), portanto, com probabilidade de ser excedido\* de 0,10%. Este resultado indica provavelmente que, ou as incertezas dos dados experimentais estão subestimadas, ou há problemas de modelo (identificações equivocadas de transições gama, esquemas de decaimento errados, etc), ou que ambos os problemas estão presentes.

Tabela III-1 - Distribuição dos dados e dos parâmetros do ajuste das energias gama.

<i>Dados</i>			<i>Parâmetros</i>		
	<i>Origem</i>	<i>Quantidade</i>		<i>Tipo</i>	<i>Quantidade</i>
<i>[F]</i>	<i>Relação com as constantes fundamentais</i>	1		<i>Relação com as constantes fundamentais</i>	1
	<i>Medidas "absolutas"</i>	79			
	<i>Medidas relativas</i>	121		<i>Energias gama</i>	331
<i>Difração [D]</i>	<i>Calibrados</i>	39			
	<i>Diferença de energia</i>	367			
	<i>Relações baseadas nos esquemas de decaimento</i>	248		<i>Níveis nucleares excitados</i>	127
<i>Número de dados</i>		855		<i>Número de parâmetros</i>	459
<i>[S]</i>					
<i>[R]</i>					

\* A probabilidade de qui-quadrado ser excedido é a probabilidade que se obter em um ajuste com igual número de graus de liberdade um qui-quadrado maior (ou igual) ao obtido por mera flutuação estatística (quando os dados, as incertezas consideradas e o modelo empregado são adequados). Isto é obtido fazendo a integral da função densidade de probabilidade de qui-quadrado correspondente desde o qui-quadrado obtido até infinito.

A existência de equívoco na interpretação da origem dos raios gama é muito pouco provável, pois os raios gama padrões para calibração são tipicamente bastante intensos e os esquemas de decaimento para as transições intensas destes nuclídeos largamente estudados e bem estabelecidos\*. As incertezas experimentais, por sua vez, também foram determinadas por pesquisadores com vivência em medidas de padrões de calibração e, portanto, é pouco provável que tenham sido demasiadamente subestimadas.

Entretanto, é necessário lembrar que as incertezas das próprias incertezas não são usualmente fornecidas nos artigos e que uma componente não desprezível da incerteza final provém usualmente de estimativas da incerteza de efeitos sistemáticos determinadas por avaliações não estatísticas (tipo B<sup>[30]</sup>) ou por avaliações estatísticas (tipo A<sup>[30]</sup>) com poucos graus de liberdade.

Supondo que as incertezas tenham sido, em média, subestimadas por um pequeno fator multiplicativo é possível determinar um fator de correção a partir do qui-quadrado do ajuste, usando a informação de que o valor médio esperado para a distribuição de qui-quadrado é igual ao número de graus de liberdade ( $\nu$ ) em conjunto com o fato do valor do qui-quadrado ser inversamente proporcional ao quadrado das incertezas consideradas. Assim, o fator multiplicativo  $\eta$  de correção das incertezas pode ser determinado por

$$\eta = \sqrt{\frac{\chi^2}{\nu}} = \sqrt{\chi_R^2}, \quad (53)$$

sendo  $\chi_R^2 = \frac{\chi^2}{\nu}$ , chamado de qui-quadrado reduzido. A partir desta relação o fator multiplicativo necessário para corrigir as incertezas consideradas seria de

\* Mesmo no caso de nuclídeos com esquemas de decaimento complexos e ainda não totalmente estabelecidos, como o  $^{152}\text{Eu}$  (ref. 106), as posições das transições utilizadas como padrões de calibração no esquema de decaimento estão bem estabelecidas.

$\eta = 1,111(32)^*$ . Ou seja, supondo que o elevado qui-quadrado tenha sido provocado apenas porque as incertezas fornecidas pelos experimentadores foram sistematicamente subestimadas por um fator multiplicativo, esta subestimação foi de cerca de 11%.

### III.1.2 Análise de resíduos

A correção pelo fator multiplicativo determinado acima depende da hipótese de que o valor relativamente alto do qui-quadrado é devido ao conjunto de dados como um todo, e não a alguns poucos valores experimentais. Assim, a análise de resíduos nos fornece elementos para questionar problemas localizados (Pontuais) de modelo e incerteza, uma vez que os dados com identificação errada ou incertezas subestimadas costumam apresentar valores absolutos de resíduo muito maiores que os demais dados.

A análise dos resíduos é feita tradicionalmente partindo das diferenças ( $\vec{d}$ ) entre os dados experimentais ( $\mathbf{Y}$ ) e os valores interpolados ( $\mathbf{Y}_{aj} = \mathbf{X} \cdot \tilde{\mathbf{A}}$ ),

$$\vec{d} = \mathbf{Y} - \mathbf{Y}_{aj} = \mathbf{Y} - \mathbf{X} \cdot \tilde{\mathbf{A}}, \quad (54)$$

determinam-se os resíduos ( $r$ ), que correspondem a estas diferenças em unidades de desvios padrões dos dados ( $\sigma_{Y_i} = \sqrt{V_{Y_{i,i}}}$ ), por:

$$r_i = \frac{d_i}{\sigma_{Y_i}}. \quad (55)$$

Entretanto, os resíduos calculados mediante a equação (55) não apresentam uma distribuição de média zero e desvio padrão 1 (como é uma distribuição de erros

\* A incerteza no fator multiplicativo foi obtida a partir do desvio padrão da f.d.p. de qui-quadrado para muitos graus de liberdade ( $\nu > 30$ ) (que corresponde à incerteza em cada valor de qui-quadrado) dada por  $\sigma_{\chi^2} \approx \sqrt{2\nu}$ .

normalizados pelas correspondentes incertezas). Isto ocorre porque a função interpolada foi determinada a partir dos próprios dados experimentais. Assim, a incerteza da função interpolada e a covariância desta com os dados experimentais precisam ser consideradas na normalização dos resíduos.

Para corrigir este efeito, a incerteza de cada uma das diferenças pode ser obtida propagando-se as covariâncias dos dados experimentais para as funções ajustadas. A matriz de covariância das diferenças,

$$\mathbf{V}_d = \left\langle (\vec{d} - \vec{d}^0) \cdot (\vec{d} - \vec{d}^0)^T \right\rangle,$$

pode ser escrita em função do vetor de dados experimentais, pois o vetor de parâmetros ajustados é uma função linear dos dados experimentais,  $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{Y}$  onde, segundo a equação (50),  $\mathbf{M} = (\mathbf{X}^T \cdot (\mathbf{V}_Y)^{-1} \cdot \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \cdot (\mathbf{V}_Y)^{-1}$ . Esta substituição leva a

$$\mathbf{V}_d = \left\langle [(\mathbf{Y} - \mathbf{X} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{Y}) - (\mathbf{Y}^0 - \mathbf{X} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{Y}^0)] \cdot [(\mathbf{Y} - \mathbf{X} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{Y}) - (\mathbf{Y}^0 - \mathbf{X} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{Y}^0)]^T \right\rangle$$

que, após algumas manipulações, resulta em

$$\mathbf{V}_d = \mathbf{V}_Y - \mathbf{X} \cdot (\mathbf{X}^T \cdot (\mathbf{V}_Y)^{-1} \cdot \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}^T. \quad (56)$$

O segundo termo é igual a matriz de covariância dos valores interpolados obtida por propagação de variâncias\* ( $\mathbf{V}_{Y_{aj}} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{V}_{\tilde{\mathbf{A}}} \cdot \mathbf{X}^T$ ), com  $(\mathbf{V}_{\tilde{\mathbf{A}}})$  dada pela equação (51).

Com isso, a incerteza das diferenças é:

$$\sigma_{d_i} = \sqrt{(\sigma_{Y_i})^2 - (\sigma_{Y_{aj_i}})^2} \quad (57)$$

\* Se um conjunto de grandezas  $\mathbf{G}$  é calculado a partir de relações lineares sobre outras grandezas  $\mathbf{H}$ , ou seja,

$\tilde{\mathbf{G}} = \mathbf{W} \cdot \tilde{\mathbf{H}}$ , com  $\mathbf{W}$  exato ( $W_{ij} = \frac{\partial G_i}{\partial H_j}$ ), a matriz de covariância de  $\mathbf{G}$ , por propagação de covariâncias, é dada por<sup>129</sup>

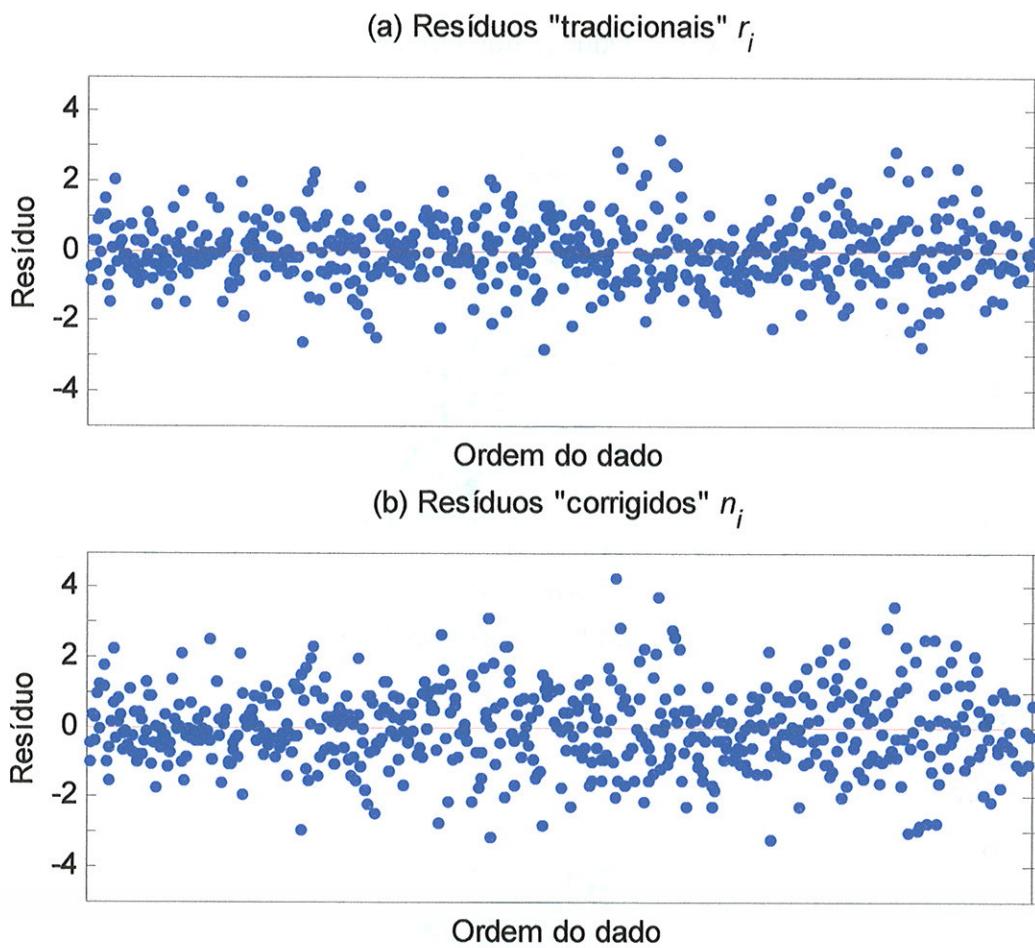
$\mathbf{V}_G = \mathbf{W} \cdot \mathbf{V}_{\tilde{\mathbf{H}}} \cdot \mathbf{W}^T$

onde  $\sigma_{Y_{aj_i}} = \sqrt{V_{Y_{aj_i,i}}}$ . Com este resultado é possível propor uma outra definição de resíduos que considera corretamente a incerteza das diferenças, que identificaremos por resíduos “corrigidos”:

$$n_i = \frac{d_i}{\sigma_{d_i}}. \quad (58)$$

A função densidade de probabilidade (f.d.p.) esperada para os resíduos calculados desta forma tem média zero e desvio padrão 1. Se as f.d.p. dos dados forem gaussianas a f.d.p. dos resíduos calculados pela equação (58) será uma gaussiana normalizada, isto é, com valor esperado zero para a média e 1 para o desvio padrão.

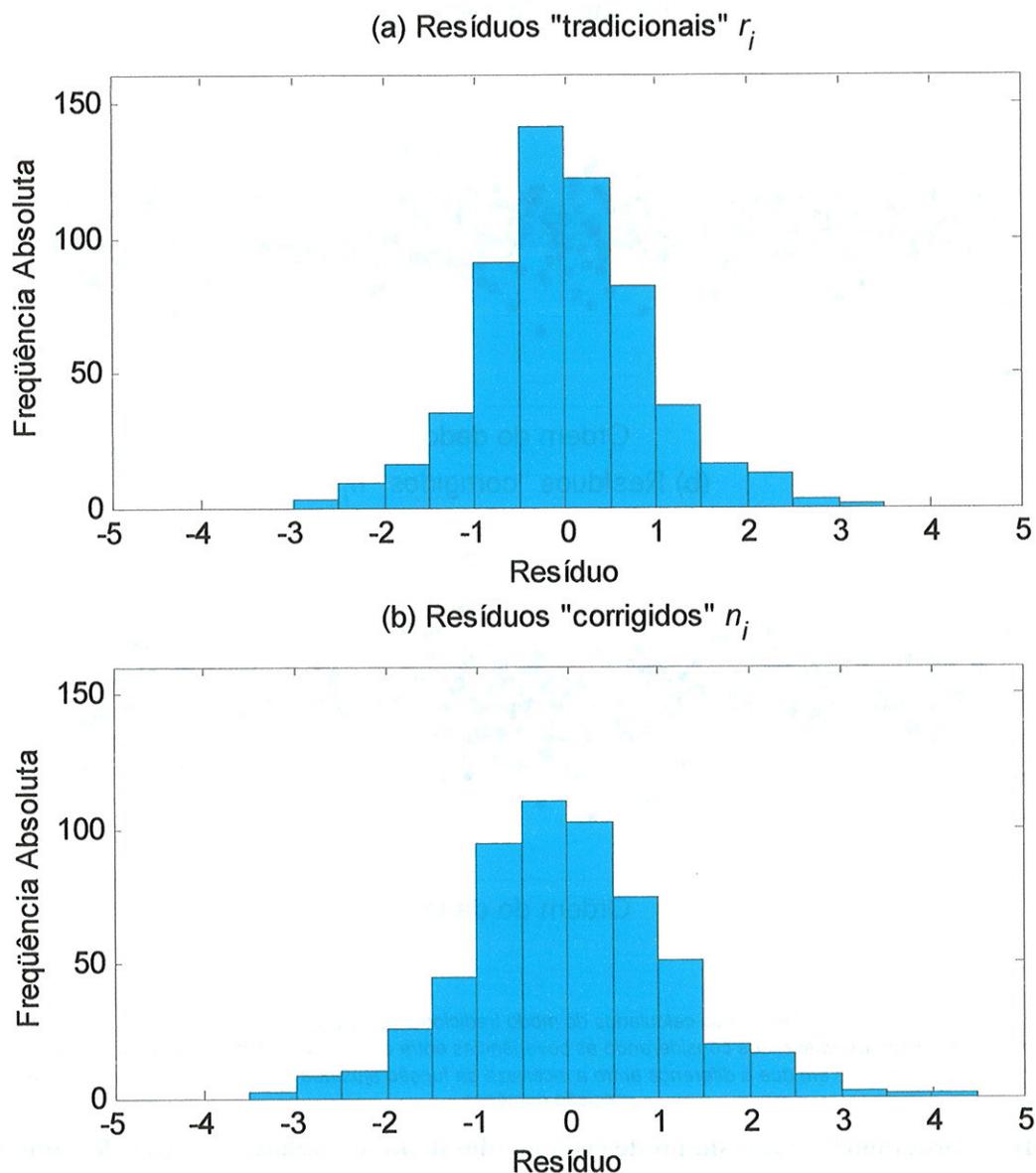
A Figura III.1 apresenta os dois tipos de resíduos obtidos para cada um dos dados, separados em função do tipo de dado. Na Figura III.2 são fornecidos os histogramas destes resíduos.



(a) Resíduos calculados do modo tradicional (equação 55).  
 (b) Resíduos "corrigidos" (normalizados considerando as covariâncias entre os dados e a função ajustada, equação 58).  
 Não foram considerados os dados em que a diferença entre a incerteza da função ajustada e do dado experimental é afetada pela precisão numérica.

**Figura III.1 - Distribuição dos resíduos de cada um dos dados em relação ao seu valor ajustado.**

Não é possível identificar por estas figuras nenhum dado com resíduo destoante em relação ao conjunto. A conclusão que esta análise nos fornece é de que não há evidências de que o elevado qui-quadrado obtido do ajuste tenha sido provocado por um conjunto de poucos dados com incertezas subestimadas ou interpretações equivocadas.



(a) Resíduos calculados do modo tradicional (equação 55).

(b) Resíduos "corrigidos" (equação 58).

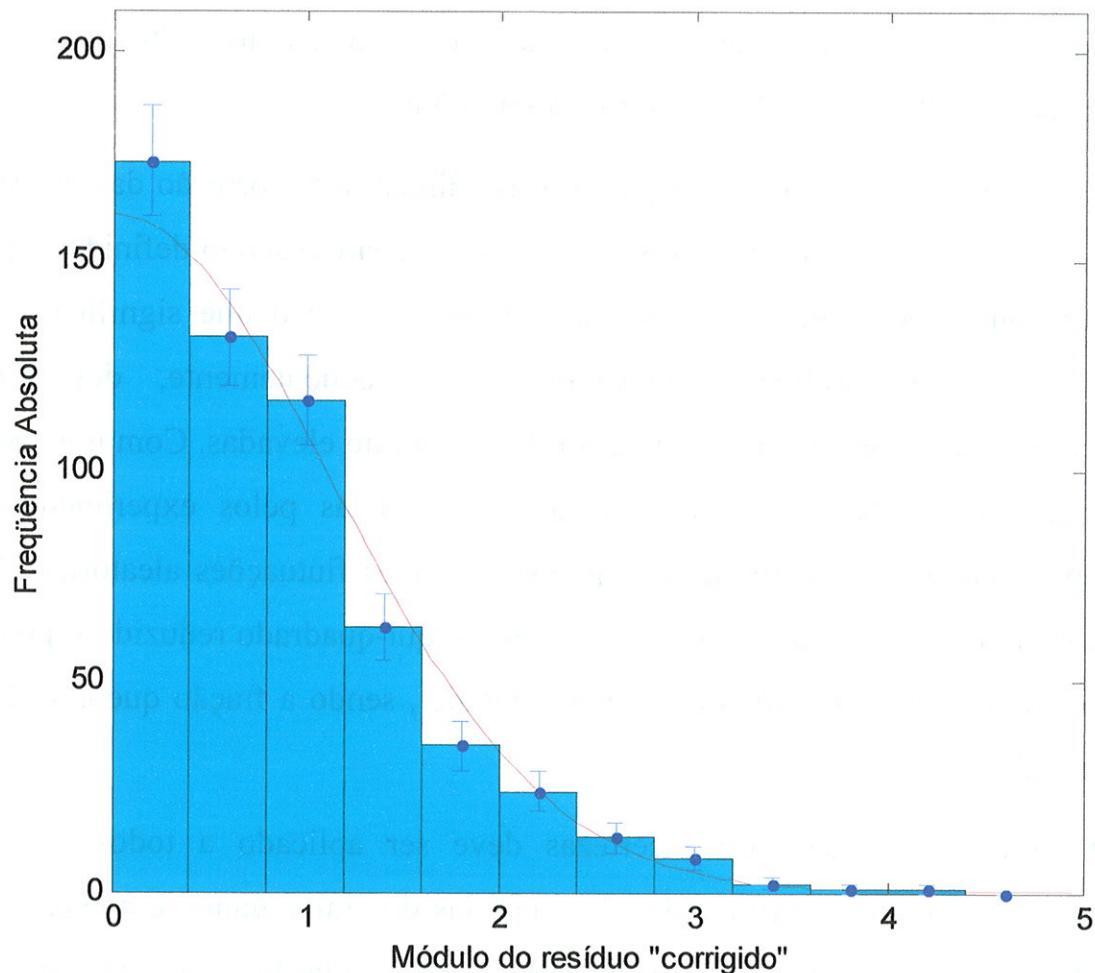
Não foram considerados os dados em que a diferença entre a incerteza da função ajustada e do dado experimental é afetada pela precisão numérica.

**Figura III.2 - Histograma dos resíduos obtidos no ajuste.**

Os histogramas de distribuição dos resíduos, em particular correspondentes aos resíduos corrigidos para a covariância entre os dados e a função ajustada, confirmam a conclusão de que não parece haver informações experimentais discrepantes entre os 855 dados considerados. Entretanto a extensão da suave distribuição de resíduos evidencia que a flutuação natural dos dados é ligeiramente maior que a prevista pelas

incertezas atribuídas pelos experimentadores indicando, portanto, que as incertezas foram (levemente) subestimadas em média.

De fato, o desvio padrão amostral dos resíduos “corrigidos” (calculados pela equação 58) foi obtido como  $s_n = 1,128(33)$ , que é incompatível com o valor 1,000, esperado para o caso de as incertezas terem sido corretamente atribuídas. A Figura III.3 apresenta o histograma do módulo dos resíduos “corrigidos”, calculado pela equação (58), bem como a gaussiana de média 0 e desvio padrão  $s_n$  evidenciando o bom acordo com esta representação.



Os sinais dos resíduos não possuem significado físico, pois dependem da ordem como os dados foram considerados nas equações do ajuste. Assim, foram considerados os valores absolutos dos resíduos calculados pela equação (58). A gaussiana utilizada para representar os dados tem média 0 e desvio padrão igual a dispersão dos resíduos “corrigidos”,  $s_n$ .

**Figura III.3 - Histograma dos módulos dos resíduos “corrigidos” representados por uma gaussiana.**

### III.1.3 Correção das incertezas dos dados

Tanto a análise de resíduos quanto a análise de qui-quadrado apontam para a existência de uma subestimação média das incertezas em cerca de 11%, o que é bastante razoável frente à dificuldade em avaliar as incertezas nos experimentos considerados.

Neste contexto é interessante notar que na compilação da ref. 1 a incerteza final de cada energia gama obtida em ajuste de níveis ou média ponderada era multiplicada por  $\sqrt{\chi^2_R}$  quando o qui-quadrado reduzido do ajuste era maior que 1,0. Este procedimento apresenta o inconveniente de trabalhar com soluções localizadas de subestimação de incertezas e que, ao contrário daquilo que foi feito no presente trabalho, não permite uma avaliação global do problema.

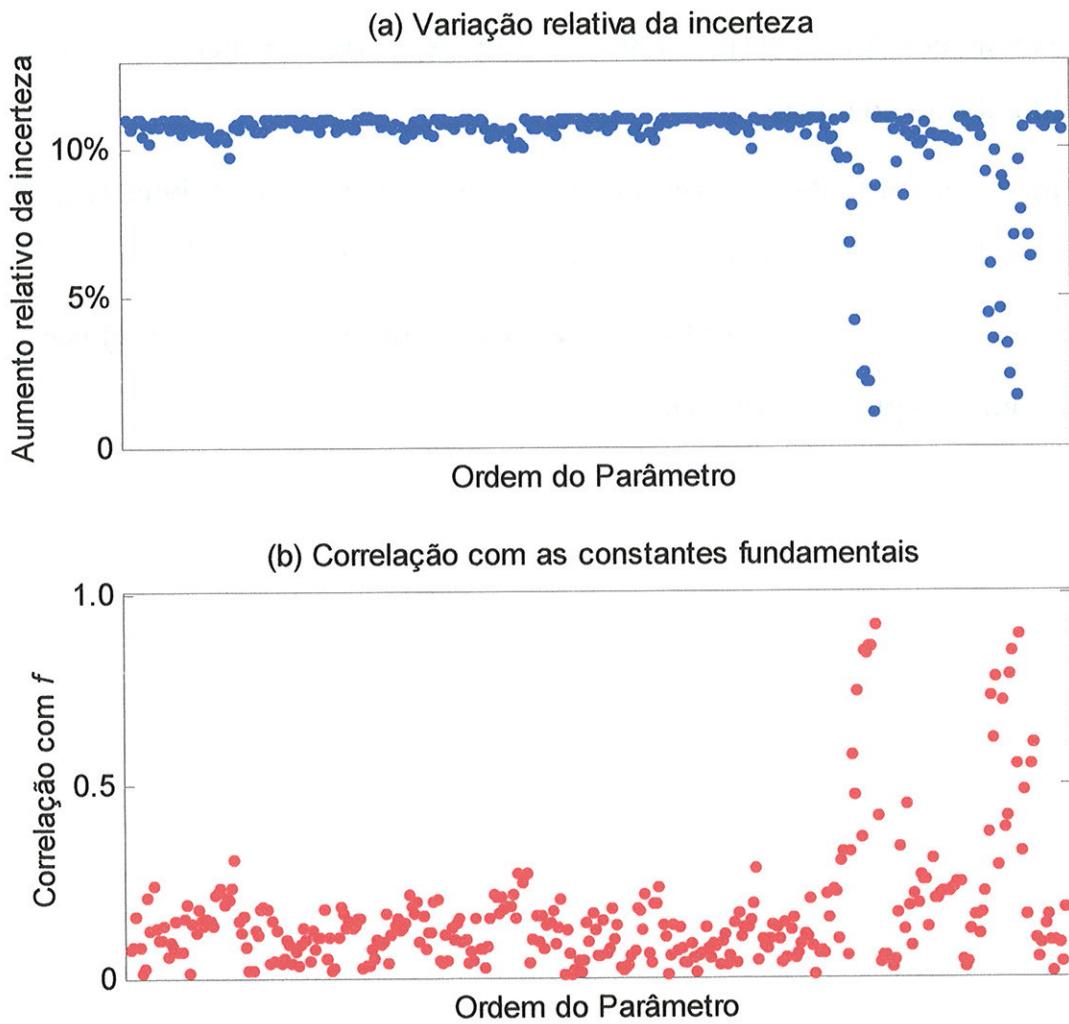
Outra desvantagem a destacar para o procedimento de correção das incertezas adotado na ref. 1 é o fato de os fatores de correção acabarem sendo definidos a partir de ajustes com poucos graus de liberdade (entre 2 e 15) o que significa que as flutuações dos qui-quadrados reduzidos e, consequentemente, dos fatores multiplicativos de correção, têm incertezas relativas muito elevadas. Com isso, acaba-se “corrigindo” incertezas cuidadosamente determinadas pelos experimentadores utilizando fatores mal determinados, sujeitos a grandes flutuações aleatórias. Além disso, é esperado que em quase metade dos casos o qui-quadrado reduzido seja maior que 1,0 quando tudo estiver dentro da normalidade\*, sendo a fração que excede 1,0 dependente do  $\nu$ .

O fator de correção das incertezas deve ser aplicado a todos os dados experimentais relacionados a medidas das energias dos raios gama, e apenas nestes dados. A incerteza do valor a ser adotado para a relação entre as constantes fundamentais  $f$  não deve ser corrigida por este fator, pois sua origem é externa aos

\* A probabilidade do qui-quadrado ser maior que o número de graus de liberdade é inferior a 50% porque a função densidade de probabilidade do qui-quadrado não é simétrica, apresentando moda sempre inferior a media.

dados de energia dos gamas. Além disso, como todas as energias gama são proporcionais às constantes fundamentais\*, a alteração de sua incerteza não afeta o qui-quadrado obtido no ajuste.

As incertezas dos dados experimentais apresentados nas Tabela II-2, Tabela II-3, Tabela II-4 e Tabela II-5 foram então corrigidas pelo mesmo fator multiplicativo,  $\eta = \sqrt{\chi^2_R} \approx 1,11$ , obtido da análise de qui-quadrado, e o ajuste refeito resultou em um qui-quadrado reduzido igual a 1,00.



(a) Aumento relativo da incerteza de cada um dos parâmetros, originado pela correção das incertezas dos dados.  
 (b) Correlação de cada um dos parâmetros com as constantes fundamentais (após a correção das incertezas dos dados).

**Figura III.4 - Variação relativa da incerteza e correlações dos parâmetros com  $f$ .**

A Figura III.4 ilustra de forma clara que haveria uma incorreção apreciável se fosse adotada a correção usual, multiplicação direta por  $\sim 1,11$  para todas as incertezas dos parâmetros, especialmente em todos os casos para os quais a correlação do parâmetro com  $f$  é alta.

Também quanto às correlações, o procedimento de correção de incertezas que empregamos é diferente da simples multiplicação da matriz de covariância dos parâmetros ajustados ( $f$  e as energias gama) por  $\sqrt{\chi^2_R}$ , principalmente nas energias que têm correlações importantes com as constantes fundamentais e nos pares de

energias cujas correlações entre si são basicamente devidas às constantes fundamentais.

### ***III.2 Valores recomendados para as energias dos padrões gama adotando as constantes fundamentais do CODATA 86***

Os resultados do ajuste efetuado com as incertezas corrigidas são o conjunto de valores e a respectiva matriz de covariância para as energias de raios gama padrões para calibração, para alguns níveis nucleares relacionados com estes raios gama e para a relação entre as constantes fundamentais expressa por  $f$ .

A Tabela Tabela III-2 apresenta trechos da tabela completa de energias de raios gama padrões de calibração. Nela podemos perceber que a maior parte das incertezas relativas das energias variam entre  $0,5 \cdot 10^{-6}$  e  $10 \cdot 10^{-6}$ , havendo inclusive energias com incertezas relativas próximas à de  $f$  ( $0,36 \cdot 10^{-6}$ ), indicando que estas energias terão reduções importantes em suas incertezas com o uso dos valores das constantes fundamentais mais precisas (compilações de 1998 e 2002).

Na Tabela III-2 também são apresentadas as informações sobre as origens dos dados experimentais classificadas entre: medidas baseadas em difração em cristais [D]; medidas em detectores semicondutores [S]; e relações baseadas nos esquemas de decaimento [R].

**Tabela III-2 - Listagem parcial dos valores das energias dos raios gama padrões para calibração obtidas utilizando o procedimento desenvolvido neste trabalho quando considerando as constantes fundamentais do CODATA 86.**

Nuclídeo	Gama (keV)	Energia MMQ 86 <sup>(a)</sup> (keV)	$\frac{\sigma_E}{E} \times 10^6$	[D] <sup>(b)</sup>	[S] <sup>(c)</sup>	[R] <sup>(d)</sup>
7-Be	477	477,6034 (22)	4,6	2		
22-Na	1274	1274,536 (5)	4,2	1		
56-Co	733	733,5094 (26)	3,6	6	X	
	787	787,7399 (28)	3,5	6	X	
	846	846,7637 (22)	2,6	3	X	
	896	896,498 (5)	6	2	X	
	977	977,365 (4)	3,8	2	X	
	996	996,938 (4)	4,4	2	X	
	1037	1037,8352 (24)	2,4	6	X	
	1140	1140,353 (6)	5	1	X	
	1159	1159,926 (6)	5	1	X	
	1175	1175,0862 (27)	2,3	4	X	
	1238	1238,2740 (23)	1,9	3	X	
	1335	1335,381 (32)	24	1		
	1360	1360,198 (3)	2,5	4	X	
	1640	1640,449 (5)	3,0	1	X	
	1771	1771,3300 (36)	2,0	4	X	
	1810	1810,727 (4)	2,4	3	X	
	1963	1963,717 (5)	2,6	4	X	
	2015	2015,181 (5)	2,3	2	X	
	2034	2034,754 (5)	2,4	5	X	
	2113	2113,100 (5)	2,6	5	X	
	2212	2212,8980 (37)	1,7	2	X	
	2598	2598,440 (4)	1,6	6	X	
	3009	3009,562 (5)	1,5	4	X	
	3201	3201,944 (6)	1,9	1	X	
	3253	3253,407 (6)	1,7		X	
	3272	3272,979 (6)	1,7		X	
	3451	3451,119 (5)	1,5	3	X	
57-Co	122	122,06063 (14)	1,2	1		
	136	136,47352 (33)	2,4	1	1	
60-Co	1173	1173,2254 (23)	2,0	1	8	
	1332	1332,4941 (26)	1,9	1	9	
108-Ag	433	433,939 (3)	8	5		
	614	614,2813 (14)	2,3	6		
	721	722,890 (3)	4,6	2		
	723	722,926 (3)	4,6	2		
109-Cd	88	88,0336 (11)	13	1		
133-Ba	53	53,1621 (7)	13	3	X	
	79	79,6144 (14)	17	2	X	
	80	80,9967 (10)	12	4	X	
	160	160,6110 (17)	10	1	X	
	223	223,2369 (14)	6	1	X	
	276	276,3989 (14)	5,0	4	X	
	302	302,8512 (6)	2,0	4	X	
	356	356,0131 (7)	2,0	4	X	
	383	383,8476 (11)	2,9	4	X	
137-Cs	661	661,6570 (11)	1,6	1	16	

Nuclídeo	Gama (keV)	Energia MMQ 86 <sup>(a)</sup> (keV)	$\frac{\sigma_E}{E}$ ( $\times 10^6$ )	[D] <sup>(b)</sup>	[S] <sup>(c)</sup>	[R] <sup>(d)</sup>
169-Yb	63	63.12043 (4)	0,6	2		X
	93	93.61445 (7)	0,8	3		
	109	109.77923 (5)	0,49	3		X
	118	118.18940 (12)	1,0	3		X
	130	130.52293 (6)	0,43	3		X
	177	177.21303 (8)	0,43	4		X
	197	197.95672 (8)	0,42	8		X
	261	261.07708 (11)	0,42	3		X
	307	307.73581 (12)	0,39	5		X
182-Ta	31	31.7373 (5)	14	1		X
	42	42.7147 (3)	8	1		X
	65	65.72219 (14)	2,1	2		X
	67	67.74975 (7)	1,1	5		X
	84	84.68018 (25)	2,9	1	3	X
	100	100.10593 (8)	0,8	1	2	X
	113	113.67163 (22)	1,9	2	1	X
	116	116.4175 (5)	4,4	1	1	X
	152	152.42990 (25)	1,6	2	1	X
	156	156.38627 (30)	1,9	2		X
	179	179.39378 (24)	1,4	2	1	X
	198	198.35176 (28)	1,4	2	3	X
	222	222.10840 (31)	1,4	2	1	X
	229	229.3205 (6)	2,7	2	1	
	264	264.07388 (30)	1,2	2	3	X
	1121	1121.2882 (20)	1,8		4	X
	1157	1157.3005 (20)	1,7			X
	1189	1189.0375 (20)	1,7		4	X
	1221	1221.3935 (20)	1,6		2	X
	1231	1231.0028 (20)	1,6		2	X
	1257	1257.4057 (20)	1,6		2	X
	1273	1273.7171 (20)	1,6			X
	1289	1289.1428 (20)	1,5			X
	1373	1373.8223 (20)	1,5		1	X
	1387	1387.3879 (20)	1,4			X
192-Ir	136	136.34281 (22)	1,6	2		X
	205	205.79432 (20)	1,0	4		
	295	295.95655 (15)	0,49	6	4	X
	308	308.45516 (18)	0,6	6	3	X
	316	316.50609 (15)	0,46	7	4	X
	416	416.4696 (5)	1,2	2		X
	468	468.06875 (23)	0,50	8	3	X
	484	484.5752 (4)	0,9	3	2	
	588	588.5817 (5)	0,9	5	8	X
	604	604.41120 (28)	0,46	6	4	X
	612	612.46212 (26)	0,43	6	4	X
	884	884.5372 (6)	0,6	1	6	X
198-Au	411	411.80198 (17)	0,40	137	2	X
	675	675.8836 (7)	1,1	2	2	X
	1087	1087.6841 (8)	0,7		5	X
241-Am	26	26.34463 (22)	8		2	
	59	59.54080 (12)	2,0		3	

(a) Resultados usando o procedimento desenvolvido neste trabalho

(b) Número de informações experimentais de medidas baseadas em difração.

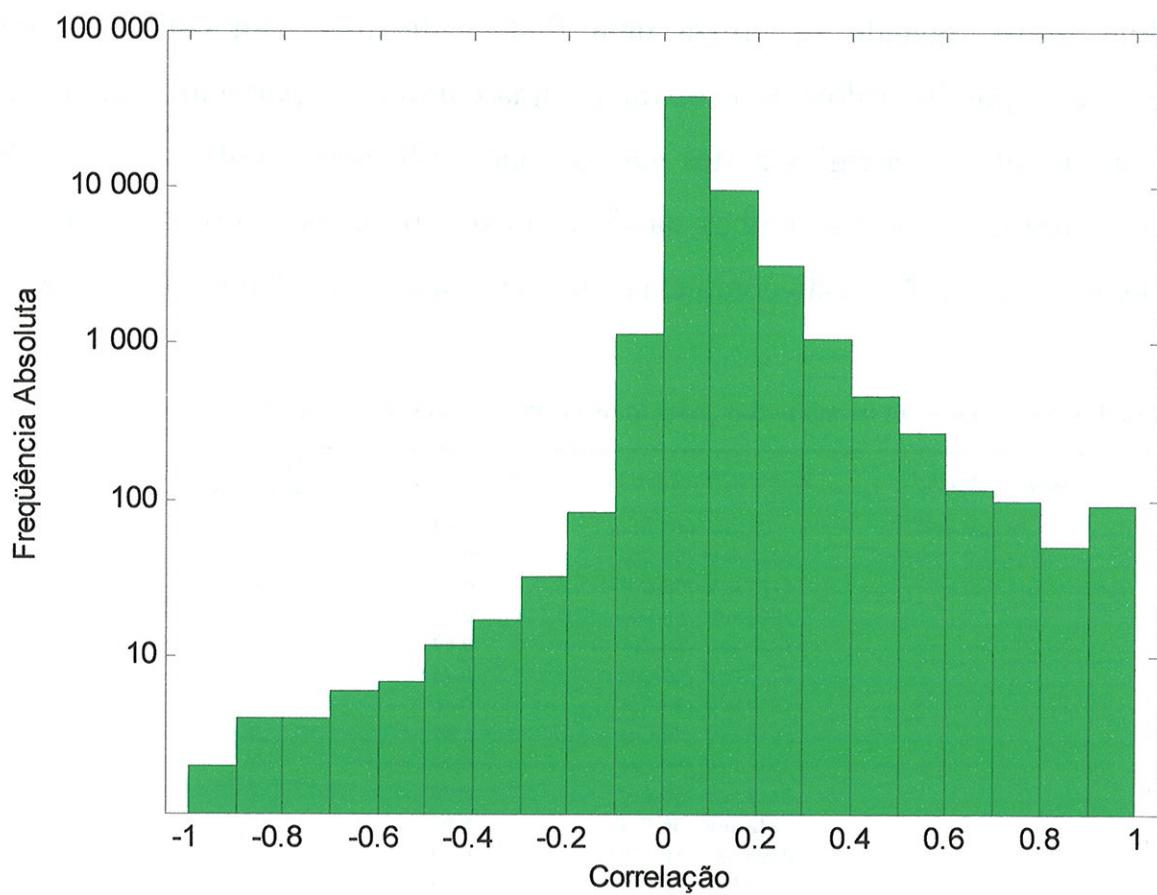
(c) Número de informações experimentais de medidas em detectores semicondutores

(d) Indica se o gama esta envolvido em relações baseadas nos esquemas de decaimento.

### ***III.3 Correlações importantes***

No procedimento de análise que empregamos as correlações entre as energias dos raios gama são diretamente obtidas a partir da matriz de covariância dos parâmetros ajustados. Ao todo são mais de 50.000 correlações entre os pares de raios gama (correspondentes as 330 energias dos raios gama ajustados). Essa matriz é muito extensa para ser apresentada em papel (mesmo em um apêndice) e contém muitas correlações de pequena importância prática. Assim, optamos por apresentar na versão impressa apenas as correlações mais importantes deixando para fornecer a versão completa da matriz de correlação (e covariância) no CD-ROM anexado à tese.

A Figura III.5 apresenta o histograma das correlações entre pares de energias de raios gama, sendo necessário alertar para a escala logarítmica empregada para a freqüência. No histograma é possível observar uma grande predominância de correlações positivas em relação às negativas (97,5% x 2,5%) e que, embora cerca de 90% das correlações tenham módulo inferior a 0,2, há muitas correlações de módulo próximos a 1 (por exemplo, há 151 correlações com módulo superior a 0,8).



Histograma das correlações entre pares de energias gama. Para possibilitar a visualização de freqüências tão diferentes, as distâncias da escala vertical do histograma são proporcionais ao logaritmo da freqüência absoluta. A média das correlações é +0,08.

**Figura III.5 - Histograma das correlações entre energias gama.**

A determinação de quais são as correlações importantes depende de algumas considerações sobre o uso destas informações. Na verdade todas as correlações são potencialmente importantes, porém o efeito das correlações aumenta com o aumento das correlações (em módulo) e também com o crescimento do tamanho do conjunto de dados\*.

Nosso critério de quais as correlações apresentar explicitamente no Apêndice foi o seguinte: apresentamos todas as correlações superiores a 0,7 em módulo e aquelas superiores a 0,3 em módulo quando associadas a raios gama que seguem o

\* Supondo um conjunto de 10 dados com igual incerteza, uma correlação de 0,1 entre todos os pares de dados provoca uma alteração de ~40% na incerteza da média, ao passo em que para apenas 2 dados essa alteração é de somente ~5%.

decaimento de um mesmo nuclídeo. O motivo desse duplo critério pode ser explicado da seguinte forma: quando se utiliza uma fonte radioativa para calibração de detectores são disponibilizados todos os raios gama emitidos e, portanto, é grande a possibilidade de que as energias destes gamas sejam utilizadas simultaneamente. A Tabela III-3 apresenta alguns trechos da listagem das principais correlações entre energias de raios gama. A versão completa da tabela está disponível no Apêndice A.

**Tabela III-3 - Trechos da listagem das principais correlações entre energias de raios gama**

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(a)}$	Mesmo nuclídeo
78 keV (44-Ti)	67 keV (44-Ti)	0,43	X
3451 keV (56-Co)	1037 keV (56-Co)	0,55	X
	1175 keV (56-Co)	0,78	X
	1238 keV (56-Co)	0,78	X
	1640 keV (56-Co)	0,64	X
	1771 keV (56-Co)	0,45	X
	1810 keV (56-Co)	0,48	X
	2015 keV (56-Co)	0,41	X
	2034 keV (56-Co)	0,33	X
	2113 keV (56-Co)	0,38	X
	2212 keV (56-Co)	0,92	X
	2598 keV (56-Co)	0,59	X
	3009 keV (56-Co)	0,75	X
	3201 keV (56-Co)	0,54	X
	3253 keV (56-Co)	0,67	X
	3272 keV (56-Co)	0,60	X
1291 keV (59-Fe)	1274 keV (22-Na)	0,78	
	192 keV (59-Fe)	0,65	X
	1099 keV (59-Fe)	0,65	X
3228 keV (66-Ga)	1963 keV (56-Co)	0,80	
	3201 keV (56-Co)	0,87	
	1418 keV (66-Ga)	0,38	X
	1898 keV (66-Ga)	0,54	X
	1918 keV (66-Ga)	0,61	X
	2066 keV (66-Ga)	0,36	X
	2189 keV (66-Ga)	0,88	X
	2213 keV (66-Ga)	0,49	X
	2751 keV (66-Ga)	0,62	X
	3047 keV (66-Ga)	0,50	X
4806 keV (66-Ga)	1039 keV (66-Ga)	0,36	X
	2933 keV (66-Ga)	0,94	X
	3766 keV (66-Ga)	0,96	X
	4461 keV (66-Ga)	0,32	X
198 keV (75-Se)	66 keV (75-Se)	-0,66	X
	136 keV (75-Se)	-0,38	X
264 keV (75-Se)	121 keV (75-Se)	0,31	X
	136 keV (75-Se)	-0,51	X
	198 keV (75-Se)	0,73	X
279 keV (75-Se)	121 keV (75-Se)	-0,75	X
303 keV (75-Se)	96 keV (75-Se)	-0,68	X
	198 keV (75-Se)	0,32	X
	264 keV (75-Se)	0,43	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(a)}$	Mesmo nuclídeo
1650 keV (82-Br)	221 keV (82-Br)	-0,60	X
	554 keV (82-Br)	0,50	X
	619 keV (82-Br)	0,39	X
	698 keV (82-Br)	0,43	X
	827 keV (82-Br)	0,43	X
	1044 keV (82-Br)	0,49	X
	1317 keV (82-Br)	0,60	X
	1474 keV (82-Br)	0,31	X
208 keV (125-Sb)	433 keV (108-Ag)	-0,89	
	204 keV (125-Sb)	0,34	X
427 keV (125-Sb)	433 keV (108-Ag)	0,95	
	204 keV (125-Sb)	-0,31	X
	208 keV (125-Sb)	-0,93	X
443 keV (125-Sb)	208 keV (125-Sb)	-0,31	X
	427 keV (125-Sb)	0,33	X
463 keV (125-Sb)	433 keV (108-Ag)	0,95	
	208 keV (125-Sb)	-0,86	X
	427 keV (125-Sb)	0,91	X
	443 keV (125-Sb)	0,34	X
80 keV (133-Ba)	78 keV (44-Ti)	0,76	
160 keV (133-Ba)	79 keV (133-Ba)	0,80	X
	80 keV (133-Ba)	0,56	X
223 keV (133-Ba)	53 keV (133-Ba)	-0,33	X
	79 keV (133-Ba)	-0,91	X
	160 keV (133-Ba)	-0,76	X
276 keV (133-Ba)	79 keV (133-Ba)	-0,86	X
	160 keV (133-Ba)	-0,69	X
	223 keV (133-Ba)	0,87	X
302 keV (133-Ba)	53 keV (133-Ba)	-0,41	X
356 keV (133-Ba)	53 keV (133-Ba)	0,64	X
	302 keV (133-Ba)	0,43	X
383 keV (133-Ba)	80 keV (133-Ba)	0,84	X
	160 keV (133-Ba)	0,53	X
	302 keV (133-Ba)	0,43	X
661 keV (137-Cs)	667 keV (132-Cs)	0,71	
696 keV (144-Ce)	702 keV (94-Nb)	0,74	
	661 keV (137-Cs)	0,71	
1121 keV (182-Ta)	1175 keV (56-Co)	0,70	
	1238 keV (56-Co)	0,80	
	3451 keV (56-Co)	0,76	
1221 keV (182-Ta)	1175 keV (56-Co)	0,70	
	1238 keV (56-Co)	0,80	
	3451 keV (56-Co)	0,76	
	1121 keV (182-Ta)	1,00	X
	1157 keV (182-Ta)	0,97	X
	1189 keV (182-Ta)	1,00	X
1387 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0,80	
	3451 keV (56-Co)	0,76	
	1121 keV (182-Ta)	0,99	X
	1157 keV (182-Ta)	0,97	X
	1189 keV (182-Ta)	0,99	X
	1221 keV (182-Ta)	0,99	X
	1231 keV (182-Ta)	0,99	X
	1257 keV (182-Ta)	0,97	X
	1273 keV (182-Ta)	0,99	X
	1289 keV (182-Ta)	0,99	X
	1373 keV (182-Ta)	0,99	X
468 keV (192-Ir)	136 keV (192-Ir)	-0,26	X
	295 keV (192-Ir)	0,58	X
	308 keV (192-Ir)	0,52	X
	316 keV (192-Ir)	0,59	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(a)}$	Mesmo nuclídeo
604 keV (192-Ir)	130 keV (169-Yb)	0,70	
	197 keV (169-Yb)	0,71	
	261 keV (169-Yb)	0,72	
	307 keV (169-Yb)	0,76	
	136 keV (192-Ir)	0,57	X
	205 keV (192-Ir)	0,31	X
	295 keV (192-Ir)	0,82	X
	308 keV (192-Ir)	0,88	X
	316 keV (192-Ir)	0,65	X
	416 keV (192-Ir)	0,32	X
	468 keV (192-Ir)	0,65	X
	484 keV (192-Ir)	0,32	X
	588 keV (192-Ir)	0,39	X
411 keV (198-Au)	109 keV (169-Yb)	0,75	
	130 keV (169-Yb)	0,82	
	177 keV (169-Yb)	0,85	
	197 keV (169-Yb)	0,85	
	261 keV (169-Yb)	0,87	
	307 keV (169-Yb)	0,91	
	316 keV (192-Ir)	0,74	
	604 keV (192-Ir)	0,74	
	612 keV (192-Ir)	0,80	
675 keV (198-Au)	411 keV (198-Au)	0,31	X
1087 keV (198-Au)	411 keV (198-Au)	0,49	X
	675 keV (198-Au)	0,98	X

(a) Correlação entre Gama 1 e Gama 2 quando considerando as constantes fundamentais do CODATA 86

### III.4 Interpretação das origens das correlações

Uma discussão interessante que pode ser levantada sobre os resultados da Tabela III-3 é buscar compreender as origens destas correlações. Assim, selecionamos alguns exemplos que ilustram a origem das principais correlações com base nos dados experimentais.

#### III.4.1 Correlações originadas pelas constantes fundamentais

Alguns gamas são fortemente correlacionados com a relação entre as constantes fundamentais expressa por  $f$ . Isto ocorre quando a razão entre a energia do raio gama e  $f$  foi determinada com incerteza relativa comparável ou menor do que a incerteza relativa com que  $f$  era conhecida na compilação das constantes fundamentais de 1986 ( $\sim 0,36 \cdot 10^{-6}$ ).

Usamos o fato de que as energias gama são proporcionais a  $f$ ,  $E_i = \alpha_i \cdot f$ , (por causa da origem dos dados sobre energias de raios gama) sendo  $\alpha_i$  estatisticamente independente de  $f$  (por terem origens experimentais distintas). A covariância entre  $E_i$  e  $E_k$  devida somente a  $f$  pode ser obtida pela equação (22) (Seção II.5). Com isso, obtemos a correlação entre as energias dos gamas  $i$  e  $k$  devida apenas a  $f$  por

$$\rho_{E_i, E_k} \Big|_f = \frac{\text{cov}(E_i, E_k)_f}{\sigma_{E_i} \cdot \sigma_{E_k}} = \frac{\frac{E_i}{f} \frac{E_k}{f} (\sigma_f)^2}{\sigma_{E_i} \cdot \sigma_{E_k}} = \frac{E_i}{\sigma_{E_i}} \frac{E_k}{\sigma_{E_k}} \left( \frac{\sigma_f}{f} \right)^2. \quad (59)$$

Comparando os resultados obtidos com o uso da equação (59) com as correlações entre as energias determinadas no ajuste é possível identificar quais das correlações importantes entre energias de raios gama são originadas pelas constantes fundamentais  $f$ .

A Tabela III-4 apresenta estes dados, sendo que percebemos que estas transições geralmente correspondem àquelas relacionadas a medidas baseadas em difração em cristais (diretamente medidas por difração ou obtidas em relações baseadas nos esquemas de decaimento com outras transições medidas por difração). Isto ocorre porque as incertezas relativas nas informações experimentais de medidas baseadas em difração chegam a ser tão pequenas quanto  $0,3 \cdot 10^{-6}$ , enquanto as medidas em detectores semicondutores resultam em incertezas relativas tipicamente maiores que  $1,5 \cdot 10^{-6}$ .

**Tabela III-4 - Correlações importantes entre energias de raios gama originadas pelas relações com as constantes fundamentais.**

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho_{1,2}^{(a)}$	$\rho_{1,2} \Big _f^{(b)}$
93 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0,33	0,28
109 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0,49	0,43
	93 keV (169-Yb)	0,39	0,36
130 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0,53	0,49
	93 keV (169-Yb)	0,44	0,41
	109 keV (169-Yb)	0,73	0,63
	118 keV (169-Yb)	0,33	0,31
177 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0,54	0,49
	93 keV (169-Yb)	0,45	0,41
	118 keV (169-Yb)	0,33	0,31
	130 keV (169-Yb)	0,68	0,72
197 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0,54	0,50
	93 keV (169-Yb)	0,45	0,41
	109 keV (169-Yb)	0,55	0,65
	118 keV (169-Yb)	0,33	0,32
	130 keV (169-Yb)	0,83	0,74
261 keV (169-Yb)	93 keV (169-Yb)	0,46	0,41
	109 keV (169-Yb)	0,60	0,65
	118 keV (169-Yb)	0,33	0,32
	130 keV (169-Yb)	0,82	0,74
307 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0,59	0,54
	93 keV (169-Yb)	0,48	0,44
	118 keV (169-Yb)	0,36	0,34
295 keV (192-Ir)	307 keV (169-Yb)	0,71	0,68
308 keV (192-Ir)	295 keV (192-Ir)	0,44	0,46
316 keV (192-Ir)	197 keV (169-Yb)	0,71	0,68
	261 keV (169-Yb)	0,71	0,68
	307 keV (169-Yb)	0,76	0,73
	205 keV (192-Ir)	0,31	0,30
	295 keV (192-Ir)	0,59	0,58
	308 keV (192-Ir)	0,52	0,49
468 keV (192-Ir)	295 keV (192-Ir)	0,58	0,53
	308 keV (192-Ir)	0,52	0,45
	316 keV (192-Ir)	0,59	0,57
484 keV (192-Ir)	316 keV (192-Ir)	0,32	0,31
	468 keV (192-Ir)	0,30	0,28
588 keV (192-Ir)	295 keV (192-Ir)	0,35	0,31
	308 keV (192-Ir)	0,31	0,26
	316 keV (192-Ir)	0,36	0,33
	468 keV (192-Ir)	0,33	0,31
604 keV (192-Ir)	130 keV (169-Yb)	0,70	0,68
	197 keV (169-Yb)	0,71	0,69
	261 keV (169-Yb)	0,72	0,69
	307 keV (169-Yb)	0,76	0,73
	205 keV (192-Ir)	0,31	0,30
	316 keV (192-Ir)	0,65	0,62
	416 keV (192-Ir)	0,32	0,23
	468 keV (192-Ir)	0,65	0,57
	484 keV (192-Ir)	0,32	0,31
	588 keV (192-Ir)	0,39	0,33

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho_{1,2}^{(a)}$	$\rho_{1,2} _f^{(b)}$
612 keV (192-Ir)	130 keV (169-Yb)	0,76	0,72
	177 keV (169-Yb)	0,75	0,72
	197 keV (169-Yb)	0,77	0,74
	261 keV (169-Yb)	0,77	0,74
	307 keV (169-Yb)	0,82	0,79
	205 keV (192-Ir)	0,33	0,32
	308 keV (192-Ir)	0,54	0,53
	416 keV (192-Ir)	0,35	0,25
	468 keV (192-Ir)	0,66	0,62
	484 keV (192-Ir)	0,35	0,33
	588 keV (192-Ir)	0,40	0,36
884 keV (192-Ir)	308 keV (192-Ir)	0,38	0,35
	316 keV (192-Ir)	0,47	0,44
	468 keV (192-Ir)	0,44	0,40
411 keV (198-Au)	109 keV (169-Yb)	0,75	0,67
	130 keV (169-Yb)	0,82	0,76
	177 keV (169-Yb)	0,85	0,76
	197 keV (169-Yb)	0,85	0,77
	261 keV (169-Yb)	0,87	0,77
	307 keV (169-Yb)	0,91	0,83
	316 keV (192-Ir)	0,74	0,70
	604 keV (192-Ir)	0,74	0,71
	612 keV (192-Ir)	0,80	0,76
675 keV (198-Au)	411 keV (198-Au)	0,31	0,30
1087 keV (198-Au)	411 keV (198-Au)	0,49	0,44

(a) Correlação entre Gama 1 e Gama 2.

(b) Correlação entre Gama 1 e Gama 2 apenas devido a  $f$ .

A consequência das correlações importantes entre energias gama provocadas pelas constantes fundamentais é que a redução da incerteza de  $f$  produzirá uma redução importante nestas correlações, bem como nas incertezas destas energias. No Capítulo IV apresentamos os resultados para o conjunto das energias dos raios gama padrões de calibração atualizados para os valores recomendados para as constantes fundamentais das compilações mais recentes (CODATAS 1998 e 2002).

### III.4.2 Correlações originadas por medidas de diferença de energia em detectores semicondutores

Nas medidas de diferenças de energia utilizando detectores semicondutores, as incertezas obtidas chegam a ser inferiores a 1,0 eV e há raios gama cujas energias foram determinadas apenas pela diferença de energia em relação a outro gama cuja energia é conhecida com incerteza maior que a incerteza da diferença de energia. Isso dá origem a uma correlação positiva entre as energias destes gamas.

Sendo  $\sigma_{E_i}$  a incerteza na energia do gama de referência  $i$ , e  $\sigma_{D_{ik}}$  a incerteza no valor experimental da diferença de energia entre os gamas  $i$  e  $k$ , a incerteza da energia do gama  $k$ , quando determinada somente pela diferença de energia em relação ao gama  $i$ , é dada por

$$\sigma_{E_k} = \sqrt{(\sigma_{E_i})^2 + (\sigma_{D_{ik}})^2},$$

e a correlação entre as energias destes gamas, para este caso, será

$$\rho_{ik} \approx \frac{(\sigma_{E_i})^2}{\sigma_{E_i} \cdot \sigma_{E_k}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{\sigma_{D_{ik}}}{\sigma_{E_i}} \right)^2}}.$$

Exemplos deste efeito podem ser observados entre os raios gama de 1291 keV do  $^{59}\text{Fe}$  e 1274 keV do  $^{22}\text{Na}$ , que têm energias com incertezas de 4,2 eV e 5,4 eV, respectivamente; porém, a diferença entre suas energias foi determinada com incerteza de 3,3 eV, o que faz com que as energias destes gamas sejam correlacionadas, com  $\rho=0,78$ .

O mesmo efeito ocorre entre o raio gama de 433 keV da  $^{108}\text{Ag}$  (incerteza de 3,4 eV) e os gamas de 427 keV e 463 keV do  $^{125}\text{Sb}$  (ambos com incerteza de 3,5 eV). As diferenças entre as energias do 433 keV e cada um destes dois gamas do  $^{125}\text{Sb}$  são conhecidas com precisões de 1,1 eV, resultando em correlações de 0,95.

Um aspecto interessante desta fonte de correlações é que as medidas de diferença de energia em detectores semicondutores envolvem raios gama de energias próximas, como é, também, o caso dos raios gama de 3201 keV do  $^{56}\text{Co}$  e do 3228 keV do  $^{66}\text{Ga}$  que apresentam correlação de 0,87 (pois a diferença de energia foi determinada com incerteza de 3,3 eV, embora a incerteza da energia de cada um destes gamas seja, respectivamente, 6,0 eV e 6,3 eV). Se considerarmos que, para energias superiores a 2 MeV, as principais fontes de calibração são o  $^{56}\text{Co}$  e o  $^{66}\text{Ga}$

percebemos que a correlação entre as energias destes raios gama não pode ser negligenciada.

### **III.4.3 Correlações originadas por medidas relativas de comprimento de onda**

Praticamente todas as medidas relativas de comprimento de onda foram realizadas considerando o raio gama de 411 keV do  $^{198}\text{Au}$  como padrão para calibração dos espectrômetros. Este raio gama foi determinado com precisão suficientemente grande nas medidas “absolutas” de comprimento de onda realizadas por Deslattes e colaboradores no NBS<sup>[31]</sup> de modo que a incerteza no 411 keV do  $^{198}\text{Au}$  não representa uma contribuição muito importante para a energia dos gamas determinados nos experimentos deste tipo.

Porém, em alguns experimentos, os ângulos de Bragg-Laue dos raios gama de interesse foram determinados com precisões comparáveis com a deste ângulo para o gama de 411 keV do  $^{198}\text{Au}$ , que foi utilizado para calibração do espectrômetro e que é, portanto, comum a todos os dados obtidos no experimento.

Por este motivo, as energias destes raios gama, determinados basicamente em medidas relativas de comprimento de onda (difração em cristais curvos), são correlacionadas entre si por causa da calibração do espectrômetro, embora não sejam correlacionadas com a energia do gama utilizado na calibração.

A importância do conhecimento das correlações geradas pelo motivo acima apontado consiste no fato da razão entre as energias de cada um destes pares de raios gama ser conhecida com incerteza relativa inferior à com que a energia de cada um deles, individualmente, é conhecida. Como em qualquer caso de correlações grandes, a melhora no conhecimento da energia de um dos gamas acarretará em uma redução importante na incerteza da energia do outro gama.

### III.4.4 Correlações originadas pelas relações baseadas nos esquemas de decaimento

A inclusão das relações baseadas nos esquemas de decaimento é fundamental para a definição da energia dos raios gama que tenham energias superiores a 1 MeV, uma vez que as medidas baseadas em difração somente determinaram com precisão raios gamas de energia de até 1,5 MeV\*. Devemos lembrar que as medidas em detectores semicondutores necessitam de padrões de calibração com energias semelhantes à dos gamas cujas energias se quer determinar, uma vez que a relação entre a escala arbitrária e a energia destes espectrômetros não é linear, o que faz com que sejam necessárias, na prática, energias gama padrões acima de 1,5 MeV.

Como nos espectrômetros gama a incerteza cresce rapidamente com o aumento da energia, as relações baseadas nos esquemas de decaimento também são muito importantes para a redução da incerteza, pois possibilitam a determinação da energia dos gamas de energia mais alta a partir de outros de baixa energia determinados com elevada precisão.

As relações baseadas nos esquemas de decaimento são a principal origem das correlações importantes listadas na Tabela A.2, pois as incertezas nestas relações são muitas ordens de grandeza inferiores às das energias dos raios gama e, com isso, na prática, acabam sendo equivalentes a relações de vínculo entre as energias gama. Nos casos em que as incertezas nos dados das energias dos raios gama envolvidos são muito diferentes entre si estas relações acabam provocando correlações muito elevadas ( $|\rho| \approx 1$ ).

Para ambos os casos que trataremos a seguir, correlações positivas e negativas, vamos nos basear em uma representação genérica de uma parte de um esquema de

---

\* O raios gama de energia mais elevada determinado nas medidas absolutas de comprimento de onda foi o 675 keV do  $^{198}\text{Au}$ , e nas medidas relativas de comprimento de onda foi o 1505 keV da  $^{110}\text{Ag}$ .

níveis envolvendo transições entre os níveis  $N_A$ ,  $N_B$  e  $N_C$  e os raios gama  $i$ ,  $j$  e  $k$  apresentada na Figura III.6.

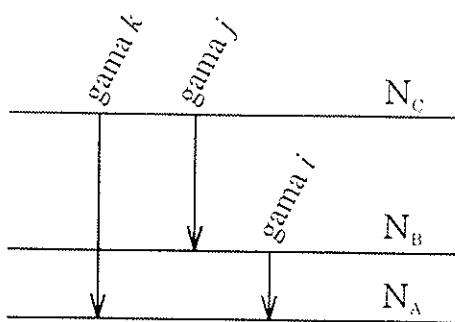


Figura III.6 - Representação parcial de uma esquema de níveis nucleares.

### III.4.4 (i) Correlações positivas

Quando as informações externas ao esquema de decaimento sobre um dos raios gama da cascata (p.ex. o gama  $i$ ) forem muito mais precisas do que as informações sobre os outros dois gamas ( $j$  e  $k$ ), as relações baseadas no esquema de decaimento irão fazer com que as energias destes dois gamas sejam fortemente correlacionadas, pois a diferença entre a energia de  $j$  e  $k$  será dada por

$$E_k - E_j = E_i + (K_i + K_j - K_k)$$

onde os termos do lado direito da equação têm incertezas muito menores que as incertezas sobre os dados experimentais dos gamas  $j$  e  $k$ , resultando em uma relação aproximadamente sem incerteza (vínculo) entre  $E_k$  e  $E_j$ .

Esta é a origem das elevadas correlações entre os raios gama de energia superiores a 1 MeV do  $^{182}\text{Ta}$ . Enquanto os raios gama de baixa energia desta fonte foram determinados por difração em cristais, portanto com incertezas da ordem de 0.1 eV, o raio gama de 1121 keV foi determinado com incerteza na energia de  $\sim 2$  eV e os outros gamas, de energias superiores a 1 MeV do  $^{182}\text{Ta}$ , foram determinados apenas a partir de relações baseadas nos esquemas de decaimento usando o gama de 1121 keV. Com isso, as correlações entre os gamas do  $^{182}\text{Ta}$  de energia superiores a 1 MeV são próximas de +1, tanto entre si, quanto com o gama de 1121 keV. As consequências de se ignorar tais correlações na calibração de um detector são muito

relevantes, levando a subestimar a incerteza da energia de um raio gama obtida pela interpolação da posição do fotópico correspondente e a superestimar a incerteza na diferença de energia entre gamas obtida pela interpolação da diferença entre as posições dos fotópicos.

### ***III.4.4 (ii) Correlações negativas***

Quando o raio gama do cross-over ( $k$ ) possuir informações experimentais muito mais precisas do que as das gamas da cascata ( $i$  e  $j$ ), a correlação entre as energias  $E_i$  e  $E_j$  será negativa, pois a soma destas energias, dada por

$$E_i + E_j = E_k + (K_k - K_i - K_j)$$

tem incerteza muito pequena quando comparada com as respectivas energias.

Esta é uma origem mais rara para correlações, porque implica em que um raio gama de energia mais elevada tenha sido determinado com precisão muito superior à de outros, de energias menores, emitidos pela mesma fonte. De fato, como a incerteza tende a crescer com o aumento da energia dos raios gama, esta fonte de correlações só ocorrerá quando particularidades do esquema de decaimento, ou das fontes de informações experimentais, compensarem esta tendência. Há duas situações deste tipo que podem ser destacadas; ela ocorre:

- nos casos em que houver diferenças significativas nas intensidades das transições (situação exemplificada pelo  $^{133}\text{Ba}$ , Figura II.15, em que o raio gama intenso e bem determinado de 302 keV estabelece, com elevada precisão, a soma das energias das gamas de 79 keV e 223 keV, levando a  $\rho_{79,223} = -0,91$ );
- quando o raio gama do cross-over for determinado no próprio esquema de decaimento pela combinação de outros gamas de menor energia determinados com elevada precisão (que é, por exemplo, a causa das importantes correlações negativas no  $^{75}\text{Se}$ , Figura II.7, tanto entre o 121 keV e o 279 keV,  $\rho_{121,279} = -0,75$ , quanto entre o 96 keV e o 303 keV,  $\rho_{96,303} = -0,68$ ).

### ***III.5 O “gold standard”***

Na compilação de Helmer e van der Leun (ref. 1), o gama de 411 keV do  $^{198}\text{Au}$  foi tomado como um padrão para as energias gama e considerado imutável na análise, pois este gama foi muito bem determinado por medidas “absolutas” de comprimento de onda (baseadas na difração em cristais planos) e praticamente todas as medidas relativas de comprimento de onda (baseadas na difração em cristais curvos) foram efetuadas em relação a este raio gama.

Na metodologia de análise que empregamos, todos os gamas são considerados equivalentes no ajuste e, portanto, sujeitos a alterações no valor de suas energias em função de suas relações com os demais raios gama. Com isso, a energia do gama de 411 keV, obtida por esta análise, não necessariamente será igual à determinada apenas pelas medidas “absolutas” de comprimento de onda, pois também foram consideradas as informações sobre este gama obtidas de sua relação com os outros raios gama (por exemplo, nas medidas relativas de comprimento de onda e nas medidas em detectores semicondutores).

Para melhor avaliar o efeito das diferentes fontes de informação sobre o 411 keV do  $^{198}\text{Au}$  fizemos um teste separando as informações experimentais sobre a energia deste raio gama em dois parâmetros distintos, relacionados às fontes de informação consideradas em sua determinação:

- um parâmetro que provém apenas das medidas “absolutas” de comprimento de onda, identificado por  $\text{Au}_A$ ; estas foram as informações consideradas na ref. 1 e referem-se exclusivamente às medições por difração em cristais planos;
- outro parâmetro relacionado a todas as outras informações do conjunto de relações envolvendo este gama, identificado por  $\text{Au}_C$ ; estas foram, portanto, obtidas a partir de todos os demais métodos de medida.

Os resultados, apresentados na Tabela III-5, mostram que as informações sobre a energia do raio gama de 411 keV do  $^{198}\text{Au}$  determinadas pelas medidas “absolutas”

são equivalentes às determinadas pelo conjunto das outras relações, que foram desprezadas no procedimento da ref. 1.

**Tabela III-5 - Energia do 411 keV do  $^{198}\text{Au}$  obtidas por diferentes análises.**

<i>Origem</i>	<i>Identificação</i>	<i>Energia (keV)</i>
<i>Análise ref. 1</i>	$\text{Au}_{\text{Helmer}}$	411,802 05 (17)
<i>Apenas medidas "absolutas" de comprimento de onda</i>	$\text{Au}_A$	411,802 06 (18)
<i>Apenas relações com os outros gamas</i>	$\text{Au}_C$	411,801 91 (18)
<i>Análise deste trabalho</i>	$\text{Au}_{\text{MMA}}$	411,801 98 (17)

De fato, um teste de equivalência dos resultados provenientes das diferentes fontes de dados pode ser efetuado, verificando a compatibilidade entre os valores de energia dos parâmetros  $\text{Au}_A$  e  $\text{Au}_C$ . Neste teste é fundamental considerar a correlação entre estes parâmetros (basicamente devida às constantes fundamentais)  $\rho(\text{Au}_A, \text{Au}_C) = 0,71$ . Uma forma de fazer este teste é ajustar um único valor de energia para estes dois parâmetros e avaliar o qui-quadrado deste ajuste. O resultado,  $\chi^2 = 1,3$  com 1 grau de liberdade, tem probabilidade de ser excedido de  $\sim 25\%$ , não revelando portanto inconsistências entre os diferentes tipos de dados.

Um outro aspecto importante a que os resultados apresentados na Tabela III-5 permitem chegar diz respeito à informação perdida sobre o gama de 411 keV no procedimento de análise da ref. 1. Embora aparentemente não haja nenhuma consequência importante, pois as incertezas finais na energia do gama de 411 keV das duas análises são as mesmas (0,17 eV), é preciso lembrar que a principal origem desta incerteza é devida às constantes fundamentais, portanto, com as covariâncias corretamente consideradas, o efeito desta pequena diferença nas incertezas se mostra importante.

Além disso, quando da atualização para as constantes fundamentais mais novas, com incertezas bastante reduzidas, as incertezas do 411 keV obtidas pelas

duas análises se revelam mais diferentes (0,09 eV contra 0,11 eV pelo procedimento da ref. 1) e esta perda de informação adquire importância maior.

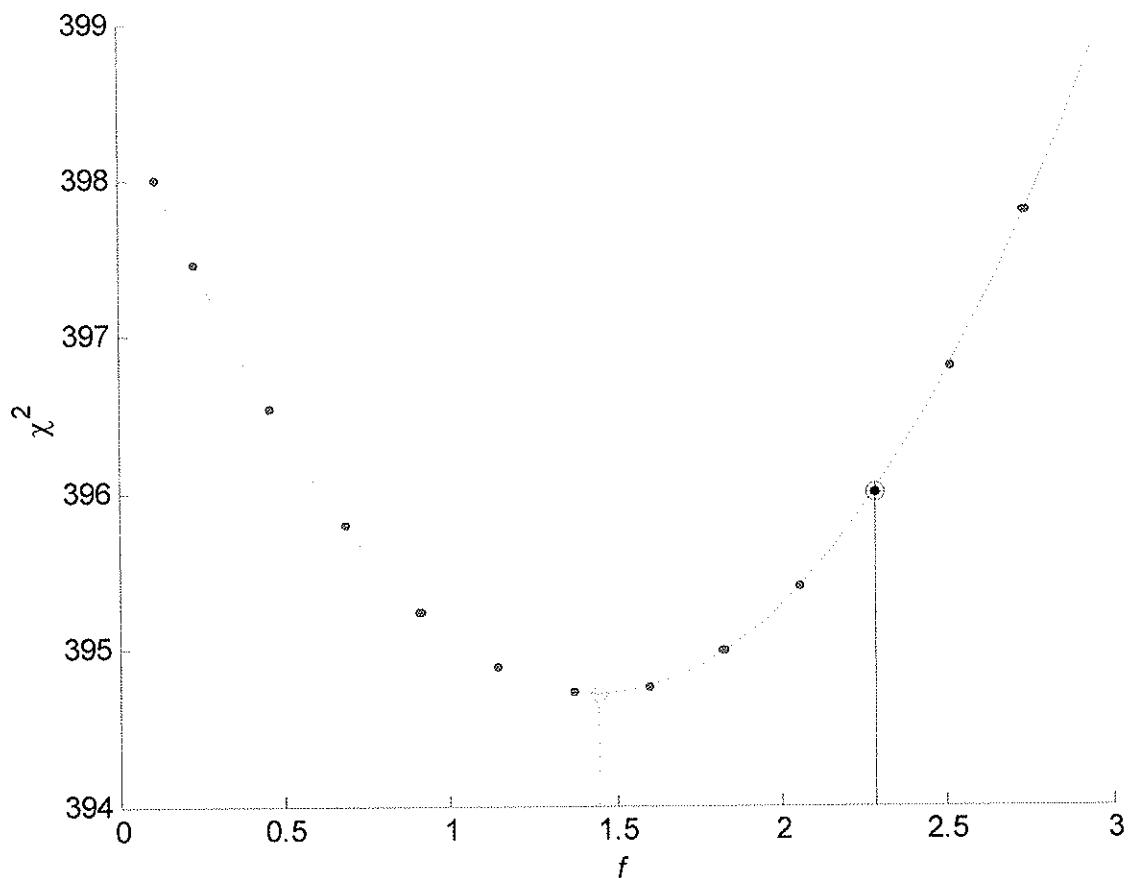
### **III.6 Informações sobre as Constantes Fundamentais**

As energias dos raios gama são proporcionais à relação entre as constantes fundamentais  $f$  definida na equação (20) e, portanto, as constantes fundamentais são apenas um fator de escala que não poderia ser determinado pela compilação das energias gama. Porém, nas relações baseadas nos esquemas de decaimento, os recuos são proporcionais ao quadrado das energias gama e, portanto, ao quadrado de  $f$ . Além disso, as massas de repouso dos nuclídeos são medidas em múltiplos de eV.

Assim, o ajuste das energias gama fornece informações sobre o valor da relação entre as constantes fundamentais,  $f$ , a partir das relações baseadas nos esquemas de decaimento. Estas informações alteram o valor efetivamente adotado no ajuste para  $f$  e sua incerteza, mesmo que não estejamos interessados em conhecer esta alteração.

Embora a alteração obtida no valor de  $f$  não tenha significado estatístico (variação em  $f$  de  $\sim 1,1 \cdot 10^{-12}$ , correspondendo a  $1,3 \cdot 10^{-6}$  da incerteza de  $f$ ), é interessante determinar e interpretar a origem das informações sobre as constantes fundamentais que podem ser obtidas no ajuste das energias gama. Para isso, estudamos a variação do qui-quadrado do ajuste com relação a  $f$ , obtendo os resultados apresentados na Figura III.7.

O valor de  $f$  determinado apenas pelas energias gama,  $f^*$ , é aquele que minimiza o qui-quadrado e sua incerteza é obtida através da variação de  $f$  necessária para que o qui-quadrado aumente de 1 unidade em relação ao mínimo ( $\chi^2(f^* \pm \sigma_{f^*}) = \chi^2(f^*) + 1$ ), resultando em  $f^* = 1,45(74)$  keV, que é compatível com o valor recomendado pela compilação das constantes fundamentais de 1986,  $f_{86} = 2,282\,891\,5(8)$  keV.



Relação entre o qui-quadrado obtido no ajuste dos padrões de energias gama e o valor considerado para a relação entre as constantes fundamentais ( $f$ ). O valor de  $f$  que seria determinado apenas usando as informações das energias gama ( $f^*$ ) está indicado por uma linha vertical tracejada. O valor de  $f$  obtido a partir dos valores recomendados para as constantes fundamentais do CODATA 86 ( $f_{86}$ ) corresponde ao ponto destacado no gráfico e indicado por uma linha vertical.

**Figura III.7 - Dependência entre o qui-quadrado do ajuste e o valor da relação  $f$  das constantes fundamentais**

Com esta análise é possível perceber que a incerteza na determinação da relação  $f$  entre as constantes fundamentais apenas a partir do ajuste de energias gama ( $f^*$ ) é  $10^6$  vezes maior que a incerteza com que  $f$  era conhecida na compilação das constantes fundamentais de 1986. Portanto, a alteração de  $f$  por causa das energias gama não é estatisticamente significativa. Este resultado valida a consideração de que as energias gama sejam proporcionais a  $f$ , que foi utilizada neste trabalho para a dedução de algumas das covariâncias.

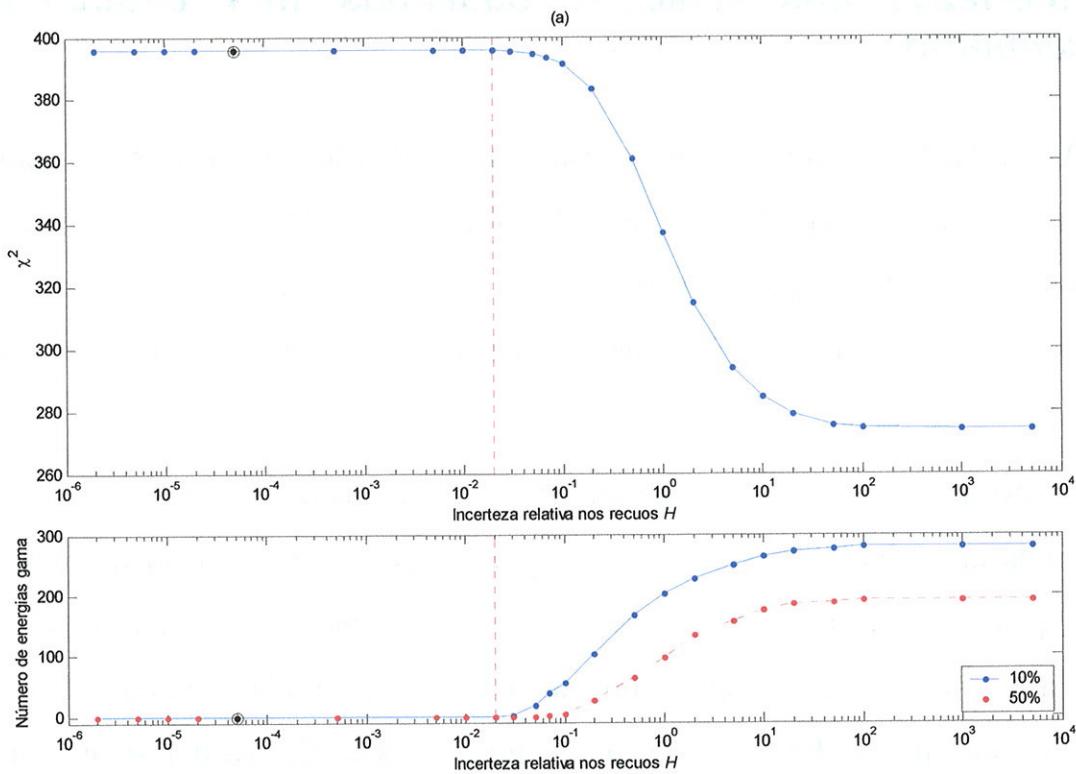
Usando o conceito de conteúdo de informação de Fisher como o inverso da variância<sup>[78]</sup>, em resumo, podemos dizer que o CODATA 86 fornece  $10^{12}$  vezes mais informação sobre  $f$  do que todo o conjunto de padrões de energia de raios gama.

### ***III.7 Incertezas das relações baseadas nos esquemas de decaimento***

As relações baseadas nos esquemas de decaimento são geralmente incorporadas como equações de vínculo. Em nosso ajuste estas relações foram incluídas como dados experimentais, com os objetivos de avaliar a dependência das energias de recuo em relação às constantes fundamentais e de determinar a precisão exigida nestas relações.

Conforme discutido na Seção II.6, a incerteza relativa no recuo ( $H$ ) considerada nas relações baseadas nos esquemas de decaimento foi de  $5 \cdot 10^{-5}$  o que garante, para fins práticos, que estes sejam equivalentes a equações de vínculo no ajuste (a menos da correlação com as constantes fundamentais). Nesta seção discutimos os efeitos desta incerteza no ajuste, a fim de avaliar o quanto precisos devem ser as energias de recuo para que não ocorram variações estatisticamente importantes no ajuste.

A Figura III.8 apresenta a relação entre os valores de qui-quadrado obtidos no ajuste dos padrões gama juntamente com o número de gamas que apresentam alterações nas energias ajustadas superiores a 10% e a 50% de suas incertezas originais, em função do valor considerado para as incertezas relativas  $H$  dos recuos.



(a) – Relação entre o qui-quadrado obtido no ajuste em função da incerteza relativa considerada nas equações de recuo ( $H$ ).  
 (b) – Número de energias gama que apresentaram variações relativas de valor superiores a 10% e a 50% em relação à incerteza original dos parâmetros (obtida considerando  $H=5.10^{-5}$ ).

O valor considerado para  $H$  no ajuste corresponde aos pontos destacados em ambos os gráficos. As retas verticais tracejadas indicam os valores limites de  $H$  que definem a região em que as relações baseadas nos esquemas de decaimento têm no ajuste de energias gama efeito prático equivalente ao de um dado experimental. À esquerda desta região o efeito das relações baseadas nos esquemas de decaimento é o mesmo que o de equações de vínculo, enquanto que à direita desta região essas relações não tem nenhum efeito prático no ajuste.

**Figura III.8 - Efeitos da incerteza nos recuos sobre o qui-quadrado e no valor dos parâmetros obtidos no ajuste.**

Pela Figura III.8 é possível perceber que para  $H$  menor que  $2.10^{-2}$  as equações baseadas nos esquemas de decaimento no ajuste têm o mesmo efeito prático que teriam equações de vínculo. Por outro lado, para valores de  $H$  superiores a  $1.10^2$  estas equações não têm nenhum efeito prático no ajuste, ou seja, equivalem a não utilizar estes dados. Entretanto, na região intermediária entre estas duas situações limites as relações baseadas nos esquemas de decaimento têm efeito prático equivalente ao de um dado experimental sobre o ajuste. Os limites desta região intermediária podem ser determinados tanto observando as variações dos qui-quadrados do ajuste quanto o número de transições gama que apresentam variações de valor superiores a 10%.



Resumindo, os resultados evidenciam que a consideração, usual, das relações baseadas nos esquemas de decaimento como equações de vínculo não tem nenhuma consequência estatisticamente apreciável, desde que estas relações sejam corretas dentro de 2% de precisão relativa.

A Tabela III-6 explicita quais os gamas que apresentaram variações superiores a 25% de suas incertezas originais quando a incerteza relativa H dos recuos se situou no intervalo entre 1 e 10%. Com isso é possível saber quais são os gamas que apresentam maior sensibilidade frente à precisão dos recuos considerados. Pela Tabela III-6 percebemos que a consideração adequada dos recuos é importante para o correto estabelecimento das energias dos raios gama do  $^{66}\text{Ga}$ , e do  $^{56}\text{Co}$ , os quais têm energias muito elevadas, sendo emitidos por um núcleo de massa pequena, que também é o caso do  $^{82}\text{Br}$ . Além disso, revelou-se importante também para os raios gama de energias elevadas ( $>1\text{ MeV}$ ) do  $^{182}\text{Ta}$ , que teve muitos de seus gamas determinados com elevada precisão em medidas com espectrômetros baseados em difração.

**Tabela III-6 – Raios gama mais sensíveis às precisões das relações baseadas nos esquemas de decaimento.**

<i>Incerteza relativa dos recuos (H)<sup>a)</sup></i>	<i>Nuclídeos<sup>(a)</sup></i>	<i>Raios gama<sup>(a)</sup> (keV)</i>
<b>até 3%</b>		
<i>entre 3% e 5%</i>	$^{66}\text{Ga}$	2189
<i>entre 5% e 7%</i>	$^{56}\text{Co}$	996, 2113, 2598, 3201
	$^{66}\text{Ga}$	2393, 3228, 4985
<i>entre 7% e 10%</i>	$^{56}\text{Co}$	1159, 1238, 1810, 3272, 3451
	$^{66}\text{Ga}$	1148, 2213, 3047
	$^{82}\text{Br}$	1317
	$^{182}\text{Ta}$	1121, 1231, 1289, 1373

(a) Indicam os raios gama que sofreriam alterações de valor superiores a 25% de suas incertezas se as incertezas de recuo variarem no intervalo indicado na primeira coluna.

A seguir iremos discutir alguns efeitos que podem levar a alterações nos valores a serem considerados para as energias de recuo e que, portanto, poderiam

comprometer a precisão exigida de 2% para que nenhum raio gama apresente variação de incerteza superior a 10% (Figura III.8).

Um dos efeitos que podem levar a correções nas equações de recuo é o acoplamento entre o átomo e a rede cristalina, quando o recuo é “compartilhado” por toda a rede cristalina e, portanto, a massa a ser considerada é muito maior do que a de um único núcleo, tornando a energia de recuo muito menor que a de um átomo isolado. Porém, para que ocorra este efeito a energia de recuo de um átomo isolado deve ser muito inferior à energia de excitação do primeiro estado excitado de vibração da rede,  $K \ll \hbar\omega$ , onde  $\omega$  é a freqüência vibracional característica da rede. Portanto, nos casos em que a incerteza da energia de recuo pode vir a ser importante, esse efeito passa a ser muito pouco provável, não afetando de maneira apreciável a validade das relações baseadas nos esquemas de decaimento.

Um outro efeito que pode afetar as correções de recuo nos detectores semicondutores é o efeito Doppler “térmico”, pois o núcleo não está em repouso no momento da emissão do gama. Portanto, os gamas emitidos no mesmo sentido do movimento do núcleo terão energia maior que os emitidos no sentido contrário. Este efeito não altera o valor médio da energia dos gamas emitidos, pois não há correlação entre o movimento do núcleo e a direção de emissão do gama e a variação de energia do gama é, em primeira ordem em  $\sqrt{c}$ , linear com relação à velocidade do núcleo.

O efeito Doppler também poderia afetar as equações de recuo quando analisamos uma cascata, pois o segundo gama pode ser emitido enquanto o núcleo ainda está recuando pela emissão do primeiro gama. Da mesma forma que a agitação térmica, este efeito também se cancela uma vez que a correlação angular entre os gamas emitidos em uma cascata apresenta simetria de reflexão, resultando em um efeito médio nulo.

Em medidas com detectores semicondutores, quando os dois gamas da cascata são emitidos na mesma direção e ambos são detectados (efeito soma) este evento será computado no fotópico do gama do *cross-over*, porém com energia menor, uma vez

que o segundo gama foi emitido com o núcleo recuando na direção oposta à do detector. Mas, como as eficiências intrínsecas dos detectores semicondutores são pequenas, e diminuem com o aumento da energia (onde a importância do recuo aumenta), este efeito também não produz nenhuma variação apreciável.

A presente análise explicitou a precisão exigida nas energias médias de recuo consideradas no ajuste e discutiu a influência de alguns efeitos físicos que poderiam comprometer a validade das relações de recuo consideradas, não encontrando nenhuma evidência de que estas precisões não sejam verificadas na prática.

A grande redução nas incertezas obtida com o uso das relações baseadas nos esquemas de decaimento também foi avaliada, mostrando quais as consequências se as precisões nas energias de recuo forem menores do que as consideradas.

### ***III.8 Diferenças com relação à compilação de Helmer e van der Leun***

Conforme apresentado na seção II.1, a principal diferença entre a presente compilação e a do trabalho de Helmer e van der Leun<sup>[1]</sup> está no procedimento utilizado, pois as informações experimentais consideradas são as mesmas; seria, portanto, esperado que os valores e incertezas das energias determinadas pelas duas compilações fossem semelhantes, residindo a principal diferença apenas no fato de que a determinação das covariâncias entre as energias gama é diretamente obtida no procedimento que empregamos.

Porém, como consequência da forma de consideração de todas as informações disponíveis, inclusive das covariâncias, na realidade os resultados que obtivemos para alguns dos raios gama apresentam diferenças significativas com relação aos resultados de Helmer e van der Leun, tanto no valor a ser adotado quanto nas incertezas para alguns raios gama.

Foram selecionados os raios gama para os quais as diferenças no valor dos resultados entre as duas compilações superam a menor das incertezas e aqueles em

que as diferenças nas incertezas atribuídas superem em 25% a menor das incertezas. A Tabela III-7 apresenta parte da listagem destes gamas, sendo a listagem completa apresentada na Tabela A.1 do Apêndice A.

**Tabela III-7 - Principais diferenças entre os valores e incertezas para as energias de raios gama obtidos neste trabalho e na compilação de Helmer e van der Leun<sup>[1]</sup>.**

Nuclídeo	Gama (keV)	Energia MMQ 86 <sup>(a)</sup> (keV)	Energia ref. 1 (keV)	Valor <sup>(b)</sup>	Incerteza <sup>(c)</sup>	[D] <sup>(d)</sup>	[S] <sup>(e)</sup>	[R] <sup>(f)</sup>
22-Na	1274	1274,536 (5)	1274,537 (7)		>		1	
24-Na	1368	1368,6263 (31)	1368,6260 (50)		>		2	
44-Ti	78	78,3235 (11)	78,3236 (17)		>		2	
46-Sc	889	889,2732 (15)	889,2710 (20)	<	>		11	
54-Mn	834	834,8397 (23)	834,8380 (50)		>!		4	
56-Co	896	896,498 (5)	896,503 (7)		>		2	X
	1159	1159,926 (6)	1159,933 (8)	>	>		1	X
	1771	1771,3300 (36)	1771,3270 (30)	<			4	X
	1963	1963,717 (5)	1963,703 (11)	<	>!		4	X
	2015	2015,181 (5)	2015,176 (5)	<			2	X
	2113	2113,100 (5)	2113,092 (6)	<			5	X
	3201	3201,944 (6)	3201,930 (11)	<	>		1	X
	3451	3451,119 (5)	3451,119 (4)		<		3	X
58-Co	863	863,9481 (19)	863,9510 (60)	>	>!		3	
59-Fe	142	142,6517 (26)	142,6510 (20)		<		1	
	192	192,348 (3)	192,349 (5)		>		2	X
	1291	1291,589 (4)	1291,590 (6)		>		2	X
60-Co	1173	1173,2254 (23)	1173,2280 (30)	>	>	1	8	
	1332	1332,4941 (26)	1332,4920 (40)		>	1	9	
66-Ga	1898	1898,836 (7)	1898,823 (8)	<			1	X
	1918	1918,335 (5)	1918,329 (5)	<			1	X
	2189	2189,624 (6)	2189,616 (6)	<			2	X
	2213	2213,191 (10)	2213,181 (9)	<			1	X
	2751	2751,843 (5)	2751,835 (5)	<			1	X
	3047	3046,694 (10)	3046,684 (9)	<			1	X
	3228	3228,808 (6)	3228,800 (6)	<			1	X
	4085	4085,863 (11)	4085,853 (9)	<				X
82-Br	554	554,3477 (18)	554,3460 (30)		>		1	X
	619	619,1027 (16)	619,1040 (30)		>		2	X
	698	698,3719 (16)	698,3680 (30)	<	>		4	X
	776	776,5140 (22)	776,5130 (40)		>		3	X
	827	827,8244 (22)	827,8200 (50)	<	>!		4	X
	1044	1043,9939 (26)	1043,9930 (50)		>		4	X
	1317	1317,4689 (22)	1317,4660 (40)	<	>		1	X
	1474	1474,8788 (28)	1474,8740 (50)	<	>		1	X
	1650	1650,332 (3)	1650,328 (5)	<	>			X
84-Rb	881	881,6066 (16)	881,6041 (16)	<			3	X
	1016	1016,160 (4)	1016,158 (11)		>!		2	X
	1897	1897,756 (4)	1897,751 (11)	<	>!		4	X
88-Y	898	898,0365 (27)	898,0360 (40)		>		3	
	1836	1836,049 (5)	1836,052 (13)		>!		6	
94-Nb	702	702,6446 (13)	702,6390 (40)	<	>!		9	
	871	871,1161 (15)	871,1140 (30)	<	>		9	
95-Tc	253	253,0715 (22)	253,0700 (30)		>		2	X
	786	786,1947 (22)	786,1922 (27)	<			1	X
	820	820,6249 (29)	820,6220 (70)	<	>!		2	
	835	835,1485 (21)	835,1460 (60)	<	>!		3	X
	1039	1039,2640 (24)	1039,2600 (60)	<	>!		3	X

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama</i> (keV)	<i>Energia MMQ 86<sup>(a)</sup></i> (keV)	<i>Energia ref. 1</i> (keV)	<i>Valor<sup>(b)</sup></i>	<i>Incerteza<sup>(c)</sup></i>	<i>[D]<sup>(d)</sup></i>	<i>[S]<sup>(e)</sup></i>	<i>[R]<sup>(f)</sup></i>
108-Ag	614	614,2813 (14)	614,2760 (40)	<	>!		6	
	721	722,890 (3)	722,907 (10)	>	>!		2	
	723	722,926 (3)	722,907 (10)	<	>!		2	
110-Ag	446	446,8149 (20)	446,8120 (30)	<	>	2	3	X
	687	687,0106 (15)	687,0091 (18)	<		1	8	X
	706	706,6780 (12)	706,6760 (15)	<		2	15	X
	937	937,4837 (21)	937,4850 (30)		>	2	7	X
124-Sb	645	645,8504 (14)	645,8520 (19)	>	>		2	X
	713	713,7776 (27)	713,7760 (40)		>		1	X
	722	722,7834 (16)	722,7820 (30)		>		4	X
	790	790,710 (4)	790,706 (7)	<	>			X
	968	968,1904 (26)	968,1950 (40)	>	>		2	X
	1045	1045,1231 (27)	1045,1250 (40)		>		2	X
	1325	1325,5066 (27)	1325,5040 (40)		>		2	X
	1368	1368,163 (5)	1368,157 (5)	<			2	X
	1436	1436,556 (4)	1436,554 (7)		>		2	X
	1690	1690,9677 (30)	1690,9710 (40)	>	>		6	X
125-Sb	2090	2090,938 (6)	2090,930 (7)	<				X
	176	176,3132 (10)	176,3140 (20)		>!		2	
	208	208,076 (4)	208,077 (5)		>		3	X
	600	600,5999 (15)	600,5970 (20)	<	>		3	
	606	606,7172 (23)	606,7130 (30)	<	>		2	
	635	635,9512 (13)	635,9500 (30)		>!		2	X
125-Sn	671	671,4421 (19)	671,4410 (60)		>!		1	X
	1806	1806,687 (11)	1806,690 (16)		>		1	
	1889	1889,881 (11)	1889,884 (16)		>		1	
132-Cs	2002	2002,157 (5)	2002,134 (12)	<	>!		5	
	667	667,7159 (13)	667,7140 (20)	<	>		2	X
	1317	1317,923 (5)	1317,918 (6)		>		1	X
133-Ba	1985	1985,631 (5)	1985,625 (6)	<			1	X
	80	80,9967 (10)	80,9979 (11)	>			4	X
	661	661,6570 (11)	661,6570 (30)		>!	1	16	
139-Ce	165	165,8556 (9)	165,8575 (11)	>		1	4	
	696	696,5097 (13)	696,5050 (40)	<	>!		4	X
144-Ce	2185	2185,651 (3)	2185,645 (5)	<	>		8	X
	344	344,2778 (9)	344,2785 (12)		>	1	3	X
	688	688,674 (4)	688,670 (5)		>		1	X
152-Eu	810	810,455 (4)	810,451 (5)		>		1	X
	591	591,7606 (27)	591,7550 (30)	<			1	X
	625	625,2589 (22)	625,2556 (24)	<			2	X
154-Eu	873	873,1864 (22)	873,1834 (23)	<			2	X
	904	904,0682 (26)	904,0640 (30)	<			3	X
	996	996,2560 (23)	996,2590 (42)	>	>		1	X
	1246	1246,122 (5)	1246,121 (4)		<		1	X
	1596	1596,4853 (28)	1596,4804 (28)	<			1	X
	93	93,922 (5)	93,919 (6)		>	1		X
160-Tb	879	879,3746 (15)	879,3780 (20)	>	>		7	X
	962	962,3075 (22)	962,3110 (30)	>	>			X
	966	966,1618 (15)	966,1660 (20)	>	>			X
	1177	1177,9514 (19)	1177,9540 (30)	>	>		2	X
161-Tb	48	48,91528 (5)	48,91533 (5)	>		4	2	X
	74	74,56659 (8)	74,56669 (6)	>	<	1	4	X
169-Yb	109	109,77923 (5)	109,77924 (4)		<	3		X
170-Tm	84	84,25463 (7)	84,25474 (8)	>		4		
172-Lu	90	90,6436 (7)	90,6434 (19)		>!		2	

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama (keV)</i>	<i>Energia MMQ 86<sup>(a)</sup> (keV)</i>	<i>Energia ref. 1 (keV)</i>	<i>Valor<sup>(b)</sup></i>	<i>Incerteza<sup>(c)</sup></i>	<i>[D]<sup>(d)</sup></i>	<i>[S]<sup>(e)</sup></i>	<i>[R]<sup>(f)</sup></i>
<i>182-Ta</i>	31	31,7373 (5)	31,7377 (6)		>	1		X
	67	67,74975 (7)	67,74970 (10)		>	5		X
	1121	1121,2882 (20)	1121,2900 (30)		>		4	X
	1157	1157,3005 (20)	1157,3020 (30)		>			X
	1189	1189,0375 (20)	1189,0400 (30)	>	>		4	X
	1221	1221,3935 (20)	1221,3950 (30)		>		2	X
	1231	1231,0028 (20)	1231,0040 (30)		>		2	X
	1257	1257,4057 (20)	1257,4070 (30)		>		2	X
	1273	1273,7171 (20)	1273,7190 (30)		>			X
	1289	1289,1428 (20)	1289,1450 (30)	>	>			X
	1373	1373,8223 (20)	1373,8240 (30)		>		1	X
	1387	1387,3879 (20)	1387,3900 (30)	>	>			X
	185-Os	162	162,8487 (22)	162,8520 (30)	>	>	1	X
<i>192-Ir</i>	234	234,1547 (22)	234,1560 (40)		>		1	X
	592	592,0747 (17)	592,0722 (22)	<	>		5	X
	646	646,1268 (14)	646,1270 (40)		>!		4	X
	717	717,4326 (16)	717,4298 (24)	<	>		5	X
	874	874,8248 (27)	874,8260 (40)		>		4	
	880	880,2806 (19)	880,2816 (27)		>		6	X
	136	136,34281 (22)	136,34257 (26)	<		2		X
<i>207-Bi</i>	205	205,79432 (20)	205,79430 (9)		<!	4		
	416	416,4696 (5)	416,4688 (7)	<	>	2		X
	588	588,5817 (5)	588,5810 (7)	<	>	5	8	X
	884	884,5372 (6)	884,5365 (7)	<		1	6	X
	569	569,7005 (15)	569,6980 (20)	<	>		4	
	1063	1063,6534 (24)	1063,6560 (30)	>	>		4	
	1770	1770,218 (7)	1770,228 (9)	>	>		2	

(a) Resultados usando o procedimento desenvolvido neste trabalho considerando os valores das constantes fundamentais do CODATA 86.

(b) Indicador de que as diferenças nos valores recomendados é superior à menor das incertezas.

(c) Indicador de que as incertezas atribuídas diferem de mais de 25% da menor delas.

(d) Número de informações experimentais de medidas baseadas em difração.

(e) Número de informações experimentais de medidas em detectores semicondutores

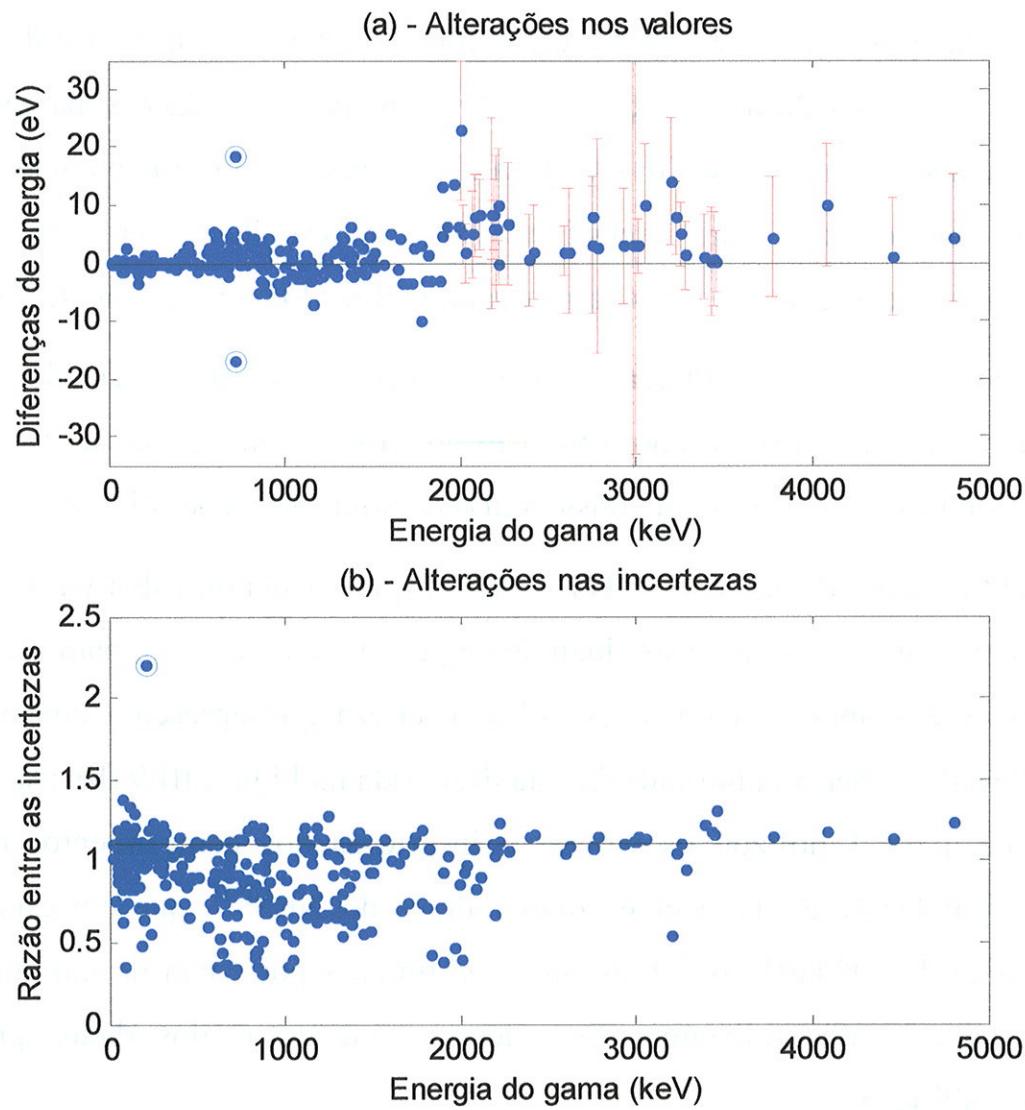
(f) Indica se o raio gama está envolvido em relações baseadas nos esquemas de decaimento.

### III.8.1 Interpretação das origens das diferenças

A seguir apresentamos alguns exemplos dos motivos que deram origem às diferenças entre os resultados das duas compilações efetuadas com os mesmos dados. É importante lembrar que, embora a maior parte das diferenças apresentadas na Tabela III-7 tenha origem em uma combinação dos efeitos apresentados a seguir, há alguns casos que podem ser identificados como predominantemente de um tipo. Além disso, uma grande diferença, tanto no valor quanto na incerteza, provocada por um destes efeitos em um raio gama pode ter como consequência a alteração de diversos outros gamas.

A Figura III.9 apresenta a diferença entre os valores adotados para as energias dos raios gama do conjunto de padrões, juntamente com a razão entre as incertezas

atribuídas para estas energias, com os resultados da presente compilação e na ref. 1, em função da energia do gama.



- (a) – Diferenças entre os valores das energias dos gamas obtidos nesta compilação e na ref. 1. Para as energias superiores a 2 MeV estão também representadas as barras de incerteza da maior entre as incertezas atribuídas nas duas compilações.  
 (b) – Razão entre as incertezas das energias gama obtidas nesta compilação e na ref. 1. A linha contínua indica a razão entre as incertezas apenas devida ao fator comum de correção das incertezas utilizado neste trabalho,  $\eta = \sqrt{\chi^2_R} \approx 1,11$ . As diferenças marcantes destacadas são discutidas no texto.

**Figura III.9 - Diferenças entre os resultados desta compilação e o da ref. 1**

Tanto a Tabela III-7 quanto, de modo mais completo, a Figura III.9 evidenciam que, embora uma fração considerável das informações não tenha sofrido alteração estatisticamente significativa, há casos em que as diferenças nos valores chegaram a duas dezenas de eV.

As diferenças nos valores revelam um efeito característico de correlações: as energias dos raios gama acima de  $\sim 2$  MeV obtidos em nossa análise são sistematicamente maiores do que as da ref. 1, pois estas energias são todas correlacionadas positivamente, em parte devido às medidas de diferença de energia em detectores semicondutores (seção III.4.2) e em parte à relações baseadas nos esquemas de decaimento (seção III.4.4). Esta diferença também reflete um aspecto da dificuldade introduzida pela necessidade de se escolher caminhos para a determinação das energias dos raios gama quando utilizado o procedimento da ref. 1.

Os dois valores com diferenças marcantes próximos à energia de 700 keV, destacados na Figura III.9 (a), correspondem ao caso do raio gama de 722 keV da  $^{108}\text{Ag}$  que, em nossa análise foram consideradas como informações distintas.

Quanto às incertezas, é possível observar que na maioria dos casos ocorreu redução com, algumas incertezas reduzindo-se por fatores elevados, para até mesmo 50% da incerteza obtida na ref. 1. A única incerteza que apresenta uma variação positiva elevada, superior a um fator 2, está destacada na Figura III.9 (b) e se deve ao fato de que a ref. 1 utilizou os valores e incertezas dos comprimentos de onda fornecidos por Deslattes, Kessler e colaboradores do NBS<sup>[31]</sup>, que em especial no caso do gama de 205 keV do  $^{192}\text{Ir}$  foram subestimadas por conta de um engano de análise\*, enquanto nós utilizamos os valores e incertezas dos dados primários (ângulos de difração).

### **III.8.1 (i) Aproveitamento parcial das informações experimentais**

As diferenças de procedimento entre as duas compilações em alguns casos podem resultar em diferenças nas incertezas (e consequentemente de valores) de alguns gamas provocados pela consideração completa das informações experimentais disponíveis, pois nesta compilação as informações experimentais sobre todas as energias gama são consideradas simultaneamente, enquanto no procedimento da

\* Para a média de dois dados com incertezas relativas de  $1,0 \cdot 10^{-6}$  e  $1,3 \cdot 10^{-6}$  foi atribuída a incerteza relativa de  $0,14 \cdot 10^{-6}$ .

ref. 1 havia a necessidade de se estabelecer um “caminho” para a consideração destas informações, como no exemplo discutido na seção II.2.

Isto resulta em importantes diferenças nos gamas que possuem muitos dados de medidas de diferença de energia em detectores semicondutores e nos determinados a partir destes. Este é o caso do gama de 661 keV do  $^{137}\text{Cs}$ , determinado com incerteza de 3 eV na ref. 1 e com incerteza de 1,1 eV nesta compilação. Como consequência, diversos outros gamas determinados em medidas de diferença de energia em detectores semicondutores tiveram suas incertezas também reduzidas como, por exemplo, o 696 keV do  $^{144}\text{Ce}$  (de 4 eV para 1,6 eV) e o 614 keV da  $^{108}\text{Ag}$  (de 4 eV para 1,4 eV).

### ***III.8.1 (ii) Correções locais das incertezas***

Outros gamas que tiveram alterações de incertezas devidas ao procedimento são aqueles em que as incertezas finais foram alteradas para compensar localmente um  $\chi^2_R$  superior a 1, conforme discutido na seção III.1.3. É o caso do gama de 78 keV do  $^{44}\text{Ti}$  onde o  $\chi^2_R$  do ajuste de média ponderada resultou em 3,2 para 1 grau de liberdade e como consequência sua incerteza foi multiplicada por 1,7. O mesmo ocorreu com o gama de 1016 keV do  $^{84}\text{Rb}$ .

A correção local de incertezas também é a causa das diferenças ocorridas entre os gamas do  $^{82}\text{Br}$ , pois o ajuste de níveis da ref. 1 resultou em um  $\chi^2_R$  de 2,3 para cerca de 10 graus de liberdade e como consequência as incertezas foram multiplicadas por 1,5.

### ***III.8.1 (iii) Correlações com as constantes fundamentais***

As energias gama são todas covariantes com as constantes fundamentais. Nos gamas determinados em espectrômetros baseados em difração, as incertezas nas constantes fundamentais são uma parcela importante da incerteza na energia dos gamas. Por este motivo, na ref. 1 as incertezas devidas ao fator de conversão entre

comprimento de onda e energia ( $E_\lambda = \frac{hc}{\epsilon}$ , com incerteza relativa de  $0,29 \cdot 10^{-6}$  em 1986<sup>[5]</sup>) foi considerado separadamente nos ajustes de níveis relacionados a estes raios gama. Porém, as energias gama são correlacionadas também com o parâmetro de rede do Si nas condições de medição do espectrômetro do NBS ( $a_{Si}^\#$ ), cuja incerteza relativa era de  $0,20 \cdot 10^{-6}$  em 1986<sup>[5]</sup>, portanto comparável com a do fator de conversão de comprimento de onda em energia.

Este é o motivo pelo qual no trabalho da ref. 1 foram atribuídas incertezas relativas inferiores à da relação entre as constantes fundamentais  $f$  para vários raios gama do  $^{169}\text{Yb}$ , pois estes gamas foram medidos com alta precisão em experimentos baseados na técnica de difração em cristais e, com a falta da consideração das covariâncias com o parâmetro de rede do Si no ajuste de níveis, esta parte comum das incertezas de todos eles foi considerada estatisticamente independente, levando a uma subestimação de suas incertezas.

# Capítulo IV. Atualização das energias gama para as constantes fundamentais de 2002

Todas as energias gama são covariantes com algumas das constantes fundamentais. Os valores adotados para as constantes fundamentais que consideramos na compilação das energias gama apresentada no capítulo anterior foram os da compilação do CODATA 86, para que aqueles resultados pudessem ser diretamente comparáveis com os da compilação de Helmer e van de Leun<sup>[1]</sup>. Porém, tanto em 1998 quanto em 2002 foram efetuadas novas compilações das constantes fundamentais, resultando em diferenças nos valores adotados e nas incertezas das constantes fundamentais das quais as energias dos raios gama dependem, conforme expresso pela equação (14).

Neste capítulo discutimos as alterações nas constantes fundamentais, efetuar a atualização das energias gama para incorporar as informações mais recentes sobre as constantes fundamentais, de 2002, e discutir algumas das consequências desta atualização.

## *IV.1 Valores adotados para as constantes fundamentais*

As constantes fundamentais são a base para a determinação de diversas grandezas físicas. Os valores adotados para as constantes fundamentais precisam ser auto-consistentes e, portanto, as alterações no valor adotado para qualquer uma delas deve ser acompanhado das correspondentes alterações em todas as outras por causa das covariâncias<sup>[3]</sup>.

Estas atualizações eram efetuadas em intervalos de ~13 anos (1973, 1986, 1998). Porém, com a percepção de que a divulgação de valores mais precisos para o conjunto de constantes fundamentais propiciava melhora significativa da qualidade dos resultados experimentais obtidos<sup>[6,3]</sup>, o intervalo entre as atualizações sucessivas dos valores recomendados para as constantes fundamentais foi reduzido, resultando na atualização de 2002<sup>[7]</sup>. A facilidade de disponibilizar os resultados das novas atualizações para a comunidade com o uso da internet<sup>[6,7]</sup> auxilia essa atualização mais freqüente.

#### **IV.1.1 O fator de conversão de comprimento de onda em energia**

A Tabela IV-1 apresenta os valores recomendados para o fator de conversão de comprimento de onda em energia,  $E_\lambda$ , na seqüência de atualizações, 1973, 1986, 1998 e 2002.

**Tabela IV-1 Valores adotados para o fator de conversão de comprimento de onda em energia pelo CODATA (1973-2002).**

<i>Origem</i>	$E_\lambda (10^6 \text{ eV.m})$	<i>Incerteza relativa</i>
<b>CODATA 1973<sup>[4]</sup></b>	<b>1,239 852 0 (32)</b>	<b><math>2,6 . 10^{-6}</math></b>
<b>CODATA 1986<sup>[5]</sup></b>	<b>1,239 842 44 (37)</b>	<b><math>0,30 . 10^{-6}</math></b>
<b>CODATA 1998<sup>[6]</sup></b>	<b>1,239 841 852 (47)</b>	<b><math>0,038.10^{-6}</math></b>
<b>CODATA 2002<sup>[7]</sup></b>	<b>1,239 841 91 (11)</b>	<b><math>0,089 . 10^{-6}</math></b>

Observando a Tabela IV-1 percebemos que enquanto nas atualizações de 1986 e 1998 houve uma redução de praticamente uma ordem de grandeza na incerteza, entre as atualizações de 1998 e 2002, ao contrário do esperado, a incerteza no fator de conversão aumentou significativamente (mais que um fator 2), indicando que as incertezas estimadas em 1998 foram subestimadas.

## IV.1.2 O parâmetro de rede do Silício

O parâmetro de rede do Silício vem sendo determinado com precisões crescentes desde 1965, chegando a ser a realização de comprimento mais acurada atualmente disponível<sup>[74]</sup>, pois uma das possibilidades para substituição do artefato que define o padrão de massa, o Quilograma padrão, depende do conhecimento preciso do parâmetro de rede do Si<sup>[95, 98, 99]</sup>.

Os valores adotados para o parâmetro de rede do Si apresentados nas compilações do CODATA, são mostrados na Tabela IV-2, e se referem a um cristal puro de Si de composição isotópica natural, no vácuo e a temperatura de 22,5°C na escala de temperatura em uso na época da atualização.

**Tabela IV-2 - Valores recomendados para o parâmetro de rede do silício por CODATA (1986-2002).**

Origem	$a_{Si}$ ( $10^9 m$ )	incerteza relativa	Condições
CODATA 1986 <sup>[5]</sup>	0,543 101 96 (11)	$0,20 \cdot 10^{-6}$	$p=0 \text{ atm}, t_{68}=22,5^\circ\text{C}$
CODATA 1998 <sup>[6]</sup>	0,543 102 088 (16)	$0,029 \cdot 10^{-6}$	$p=0 \text{ atm}, t_{90}=22,5^\circ\text{C}$
CODATA 2002 <sup>[7]</sup>	0,543 102 122 (20)	$0,037 \cdot 10^{-6}$	$p=0 \text{ atm}, t_{90}=22,5^\circ\text{C}$

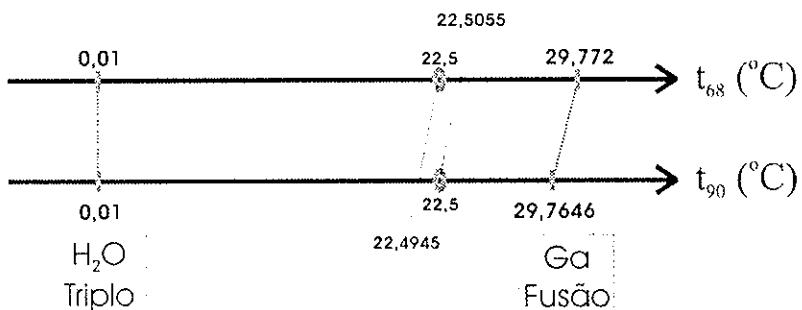
Conforme discutido nas seções II.4.1 e II.7.2, as energias dos raios gama foram determinadas em relação a um particular cristal de Si (PERFX-XROI) nas condições do espectrômetro do NBS ( $p=0,987 \text{ atm}$  e  $t_{68}=22,5^\circ\text{C}$ ). A correção para pressão e impurezas no cristal são as mesmas discutidas na seção II.7.2. Porém para os dados de 1998 e 2002 também é preciso efetuar a correção devida à alteração da escala de temperatura (de IPTS-68<sup>[76]</sup> para ITS-90<sup>[77]</sup>).

### IV.1.2 (i) A escala de temperatura definida pelo ITS-90

Embora a definição da unidade de medida de temperatura do SI (sistema internacional de unidades), o Kelvin, não tenha sido alterada desde 1954<sup>[86]</sup>, a sua realização, isto é, os valores de referência adicionais necessários para calibrar os

equipamentos de medida de temperatura, sofreram várias correções neste período<sup>[86]</sup>, sendo que a definição introduzida em 1990 (ITS-90<sup>[77]</sup>) substituiu a escala definida em 1968 (IPTS-68<sup>[76]</sup>).

Com esta alteração de valores adotados para os padrões secundários a temperatura de 22,5°C na escala de 1990 ( $t_{90}=22,5^{\circ}\text{C}$ ) difere de 5,52 mK<sup>[75, 77]</sup> da temperatura de 22,5°C na escala definida em 1968 ( $t_{68}=22,5^{\circ}\text{C}$ ). A mudança de escala nesta faixa de temperatura pode ser avaliada através da alteração do valor determinado para o ponto de fusão do Gálio, de 29,772°C em 1968<sup>[76]</sup> para 29,7646°C em 1990<sup>[77]</sup>. A Figura IV.1 representa esquematicamente o efeito desta alteração para as temperaturas  $t_{68}=22,5^{\circ}\text{C}$  e  $t_{90}=22,5^{\circ}\text{C}$ .



*As linhas oblíquas unem pontos correspondentes à mesma temperatura nas duas escalas.*

**Figura IV.1 - Relação esquemática entre as escalas de temperatura definidas em 1968 e em 1990, na região entre 0°C e +30°C**

Usando o coeficiente de dilatação térmica do Si\*,  $\alpha_{\text{Si}} = 2,56(3)\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , obtemos a correção a ser aplicada nos parâmetros de rede apresentados nas escalas do ITS-90: uma redução relativa de  $14,13(17)\cdot 10^{-9}$ . Esta alteração corresponde a cerca de um terço da incerteza do parâmetro de rede do Si em 1998 e 2002 sendo, portanto, uma correção que não pode ser negligenciada.

\* O valor deste coeficiente, determinado tanto no NIST<sup>[107]</sup> quanto na PTB<sup>[109]</sup> coincidem e continua sendo o valor adotado atualmente (ver, por exemplo, a referência 75).

#### **IV.1.2 (ii) O parâmetro de rede do Si do NBS**

Aplicando as correções necessárias, aquelas devidas à diferença de pressão, variação relativa de  $-341.10^{-9}$ , as causadas pela presença de impurezas, variação relativa de  $5(30).10^{-9}$ , e a devida à diferença da escala de temperatura adotada, é possível obter o valor a ser adotado para o parâmetro de rede do Si do cristal do NBS nas condições do comparador de parâmetros de rede,  $a_{Si}^{\#}$ , com base no valor recomendado para o parâmetro de rede de um cristal ideal de Si fornecido pelo CODATA.

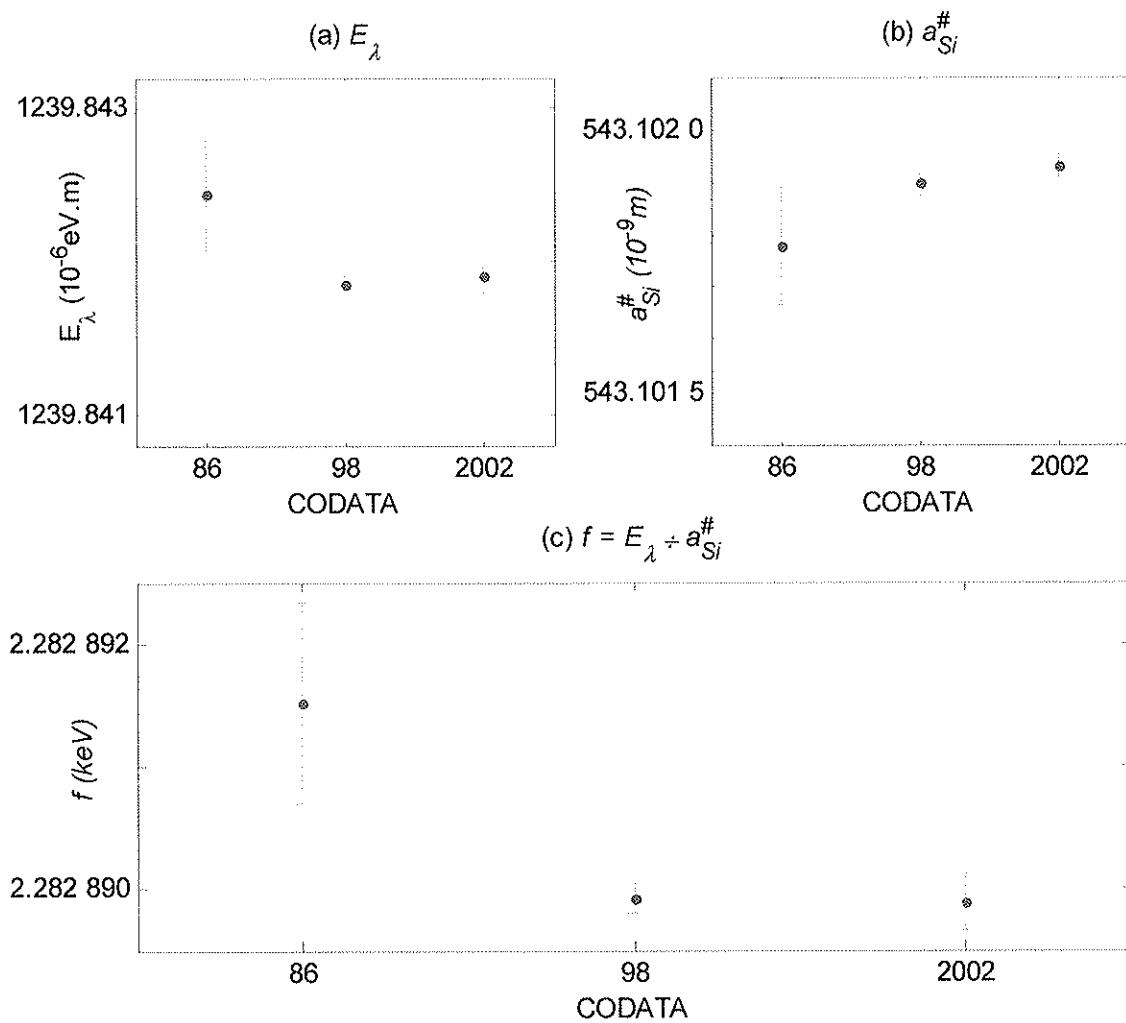
Os valores de  $a_{Si}^{\#}$  baseados nos valores recomendados fornecidos pelas atualizações das constantes fundamentais de 1986, 1998 e 2002, são os apresentados na Tabela IV-3.

**Tabela IV-3 - Valores do parâmetro de rede do cristal de silício PERFX-XROI nas condições do NBS, com base nas compilações CODATA (1986-2002).**

<i>Origem do</i> $a_{Si}$	$a_{Si}^{\#}$ ( $10^{-9}m$ )	<i>incerteza</i> <i>relativa</i>
CODATA 86 <sup>[6]</sup>	0,543 101 78 (11)	$0,21 \cdot 10^{-6}$
CODATA 1998 <sup>[6]</sup>	0,543 101 898 (23)	$0,042 \cdot 10^{-6}$
CODATA 2002 <sup>[7]</sup>	0,543 101 932 (26)	$0,048 \cdot 10^{-6}$

#### **IV.1.3 Novo valor para o parâmetro relacionado às constantes fundamentais, $f$**

Com os valores do fator de conversão entre energia e comprimento de onda e do parâmetro de rede do cristal de Si do NBS, obtidos a partir dos dados das compilações das constantes fundamentais de 1986, 1998 e 2002, determinamos os valores a serem adotados para a relação entre as constantes fundamentais,  $f$ . A evolução destes valores pode ser observada na Figura IV.2. Os valores obtidos para  $f$  estão apresentados na Tabela IV-4.



(a) – Evolução dos valores recomendados para o fator de conversão de comprimento de onda em energia,  $E_\lambda$ .

(b) – Evolução dos valores obtidos para o parâmetro de rede do cristal de Si X-ROI nas condições do NBS,  $a_{Si}^\#$ .

(c) – Evolução da relação entre as constantes fundamentais,  $f$ .

**Figura IV.2 - Evolução dos valores recomendados para constantes fundamentais das quais as energias gama dependem.**

**Tabela IV-4 - Valores experimentais da relação entre as constantes fundamentais  $f$  baseados nos valores recomendados pelas compilações CODATA (1986-2002).**

<i>Origem de <math>E_\lambda</math> e de <math>a_{Si}</math></i>	<i>Identificação</i>	$f = \frac{E_\lambda}{a_{Si}^{\#}}$ (keV)	<i>incerteza relativa</i>
CODATA 86 <sup>[5]</sup>	$f_{86}$	2,282 891 51 (83)	$0,36 \cdot 10^{-6}$
CODATA 1998 <sup>[6]</sup>	$f_{1998}$	2,282 889 93 (13)	$0,06 \cdot 10^{-6}$
CODATA 2002 <sup>[7]</sup>	$f_{2002}$	2,282 889 89 (23)	$0,10 \cdot 10^{-6}$

Percebe-se que entre a compilação de 1986 e a de 2002 houve uma grande mudança em  $f$ , tanto no valor a ser adotado quanto em sua incerteza, revelando que a alteração do valor experimental de  $f$  no ajuste de compilação das energias gama produz alterações perceptíveis, principalmente para aqueles raios gama que apresentavam correlação importante com  $f$  no ajuste de 1986.

## ***IV.2 Atualização dos padrões de energia gama para os valores recomendados para as constantes fundamentais de 2002***

A atualização do conjunto de padrões de energia gama para os novos valores de  $f$  provoca alterações nos valores adotados, nas incertezas das energias dos padrões gama e nas correlações das energias dos padrões, tanto entre si, quanto com as constantes fundamentais.

Esta atualização pode ser realizada de duas formas:

- com todos os dados experimentais - efetuando a substituição do dado experimental relacionado com as constantes fundamentais,  $f$ , no ajuste, juntamente com as correspondentes alterações na matriz de covariância dos dados e com as devidas correções nos valores experimentais das medidas de energia em detectores semicondutores (por serem todas elas proporcionais a  $f$ ); ou

- apenas com o resultado da compilação (valores e respectiva matriz de covariância)
  - usando o procedimento apresentado na referência 8.

Ambos os procedimentos são equivalentes do ponto de vista estatístico, porém a atualização usando apenas os resultados da compilação é mais afetada por erros de arredondamento.

#### **IV.2.1 Valores adotados e incertezas dos padrões de energia gama**

Efetuamos as atualizações para as constantes fundamentais baseadas nos valores recomendados do CODATA2002,  $f_{2002}$ , obtendo o novo conjunto de valores adotados com respectiva matriz de covariância para as energias dos padrões gama. A listagem com os valores recomendados para as energias dos padrões gama, obtidos nesta compilação, são apresentados na Tabela B.2 do Apêndice B, juntamente com os valores obtidos no ajuste quando é utilizado o fator antigo,  $f_{86}$ . Trechos desta listagem de resultados estão reproduzidos na Tabela IV-5.

**Tabela IV-5 - Alterações nos valores recomendados para as energias de raios gama quando considerando as constantes fundamentais do CODATA 2002 e do CODATA 86.**

Nuclídeo	Gama (keV)	Energia MMQ2002 <sup>(a)</sup> (keV)	Energia MMQ86 <sup>(b)</sup> (keV)	Valor <sup>(c)</sup>	Incerteza <sup>(d)</sup>	[D] <sup>(e)</sup>	[S] <sup>(f)</sup>	[R] <sup>(g)</sup>
7-Be	477	477,6030 (22)	477,6034 (22)				2	
22-Na	1274	1274,535 (5)	1274,536 (5)				1	
24-Na	1368	1368,6253 (30)	1368,6263 (31)				2	
	2754	2754,008 (12)	2754,010 (12)				1	
44-Ti	67	67,8675 (18)	67,8676 (18)				1	
	78	78,3235 (11)	78,3235 (11)				2	
46-Sc	889	889,2726 (15)	889,2732 (15)				11	
	1120	1120,5357 (32)	1120,5365 (32)				5	
51-Cr	320	320,0821 (5)	320,0824 (5)			1	1	
54-Mn	834	834,8392 (22)	834,8397 (23)				4	
56-Co	733	733,5089 (26)	733,5094 (26)				6	X
	787	787,7393 (27)	787,7399 (28)				6	X
	846	846,7631 (22)	846,7637 (22)				3	X
	896	896,497 (5)	896,498 (5)				2	X
	977	977,364 (4)	977,365 (4)				2	X
	996	996,938 (4)	996,938 (4)				2	X
	1037	1037,8345 (24)	1037,8352 (24)				6	X
	1140	1140,352 (6)	1140,353 (6)				1	X
	1159	1159,925 (6)	1159,926 (6)				1	X
	1175	1175,0853 (26)	1175,0862 (27)				4	X
	1238	1238,2731 (23)	1238,2740 (23)				3	X
	1335	1335,38 (3)	1335,38 (3)				1	
	1360	1360,197 (3)	1360,198 (3)				4	X
	1640	1640,448 (5)	1640,449 (5)				1	X
	1771	1771,329 (4)	1771,330 (4)				4	X
	1810	1810,726 (4)	1810,727 (4)				3	X
	1963	1963,715 (5)	1963,717 (5)				4	X
	2015	2015,179 (5)	2015,181 (5)				2	X
	2034	2034,752 (5)	2034,754 (5)				5	X
	2113	2113,099 (5)	2113,100 (5)				5	X
	2212	2212,896 (4)	2212,898 (4)				2	X
	2598	2598,438 (4)	2598,440 (4)				6	X
	3009	3009,560 (4)	3009,562 (5)				4	X
	3201	3201,942 (6)	3201,944 (6)				1	X
	3253	3253,405 (5)	3253,407 (6)					X
	3272	3272,977 (6)	3272,979 (6)					X
	3451	3451,117 (5)	3451,119 (5)				3	X
57-Co	122	122,06054 (14)	122,06063 (14)			1		
	136	136,4734 (3)	136,4735 (3)			1	1	
58-Co	810	810,7593 (24)	810,7599 (24)				9	
	863	863,9475 (19)	863,9481 (19)				3	
	1674	1674,721 (7)	1674,722 (7)				1	
59-Fe	142	142,6516 (26)	142,6517 (26)				1	
	192	192,348 (3)	192,348 (3)				2	X
	1099	1099,244 (3)	1099,244 (3)				1	X
	1291	1291,588 (4)	1291,589 (4)				2	X
60-Co	1173	1173,2245 (23)	1173,2254 (23)			1	8	
	1332	1332,4931 (25)	1332,4941 (26)			1	9	
65-Zn	1115	1115,5395 (22)	1115,5403 (22)				4	

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama (keV)</i>	<i>Energia MMQ2002<sup>a)</sup> (keV)</i>	<i>Energia MMQ86<sup>b)</sup> (keV)</i>	<i>Valor<sup>c)</sup></i>	<i>Incerteza<sup>d)</sup></i>	<i>[D]<sup>e)</sup></i>	<i>[S]<sup>f)</sup></i>	<i>[R]<sup>g)</sup></i>
66-Ga	686	686,082 (6)	686,083 (6)				1	X
	833	833,5328 (20)	833,5334 (20)				2	X
	853	853,032 (7)	853,033 (7)				2	X
	1039	1039,2198 (30)	1039,2205 (30)				2	X
	1148	1147,893 (10)	1147,893 (10)				2	X
	1190	1190,283 (8)	1190,284 (8)				2	X
	1333	1333,115 (5)	1333,116 (5)				1	X
	1418	1418,756 (6)	1418,757 (6)				1	X
	1459	1458,661 (12)	1458,662 (12)				2	
	1508	1508,156 (7)	1508,157 (7)				1	X
	1741	1740,906 (18)	1740,907 (18)				1	X
	1898	1898,835 (7)	1898,836 (7)				1	X
	1918	1918,334 (5)	1918,335 (5)				1	X
	2066	2065,782 (7)	2065,783 (8)				1	X
	2173	2173,326 (16)	2173,327 (16)				1	
	2189	2189,623 (6)	2189,624 (6)				2	X
	2213	2213,189 (10)	2213,191 (10)				1	X
	2393	2393,128 (8)	2393,130 (8)				1	X
	2423	2422,525 (8)	2422,527 (8)				1	X
	2751	2751,841 (5)	2751,843 (5)				1	X
	2780	2780,096 (18)	2780,098 (18)				1	X
	2933	2933,359 (10)	2933,361 (10)				1	X
	2977	2977,08 (5)	2977,09 (5)				1	
	2993	2993,21 (4)	2993,21 (4)				1	
	3047	3046,692 (10)	3046,694 (10)				1	X
	3228	3228,806 (6)	3228,808 (6)				1	X
	3380	3380,849 (7)	3380,851 (7)				1	X
	3422	3422,038 (9)	3422,040 (9)				1	X
	3432	3432,307 (8)	3432,310 (8)				1	X
	3766	3766,852 (10)	3766,854 (10)					X
	4085	4085,860 (10)	4085,863 (11)					X
	4461	4461,200 (10)	4461,203 (10)					X
	4806	4806,008 (11)	4806,011 (11)					X
75-Se	66	66,0519 (9)	66,0520 (9)				1	X
	96	96,7339 (10)	96,7339 (10)				2	X
	121	121,1154 (12)	121,1154 (12)				1	X
	136	136,0000 (6)	136,0001 (6)				1	X
	198	198,6057 (13)	198,6058 (13)				1	X
	264	264,6574 (10)	264,6576 (10)				2	X
	279	279,5420 (12)	279,5422 (12)				1	X
	303	303,9234 (11)	303,9236 (11)				1	X
	400	400,6569 (8)	400,6572 (8)				3	X
	221	221,4792 (22)	221,4793 (22)				2	X
82-Br	554	554,3473 (18)	554,3477 (18)				1	X
	619	619,1022 (16)	619,1027 (16)				2	X
	698	698,3714 (16)	698,3719 (16)				4	X
	776	776,5135 (22)	776,5140 (22)				3	X
	827	827,8238 (22)	827,8244 (22)				4	X
	1044	1043,9932 (25)	1043,9939 (26)				4	X
	1317	1317,4679 (21)	1317,4689 (22)				1	X
	1474	1474,8777 (28)	1474,8788 (28)				1	X
	1650	1650,331 (3)	1650,332 (3)					X
	881	881,6060 (16)	881,6066 (16)				3	X
84-Rb	1016	1016,160 (4)	1016,160 (4)				2	X
	1897	1897,754 (4)	1897,756 (4)				4	X
	514	514,0044 (24)	514,0048 (24)				1	
88-Y	898	898,0358 (27)	898,0365 (27)				3	
	1836	1836,048 (5)	1836,049 (5)				6	
94-Nb	702	702,6441 (12)	702,6446 (13)				9	
	871	871,1155 (15)	871,1161 (15)				9	

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama (keV)</i>	<i>Energia MMQ2002<sup>a)</sup> (keV)</i>	<i>Energia MMQ86<sup>b)</sup> (keV)</i>	<i>Valor<sup>(c)</sup></i>	<i>Incerteza<sup>(d)</sup></i>	<i>[D]<sup>(e)</sup></i>	<i>[S]<sup>(f)</sup></i>	<i>[R]<sup>(g)</sup></i>
95-Tc	204	204,1172 (16)	204,1173 (16)				5	X
	253	253,0713 (22)	253,0715 (22)				2	X
	582	582,0783 (18)	582,0787 (18)				4	X
	765	765,803 (6)	765,804 (6)				1	
	786	786,1942 (22)	786,1947 (22)				1	X
	820	820,6244 (28)	820,6249 (29)				2	
	835	835,1480 (21)	835,1485 (21)				3	X
	1039	1039,2632 (23)	1039,2640 (24)				3	X
95-Zr	724	724,1951 (28)	724,1956 (28)				1	
99-Mo	40	40,58321 (15)	40,58323 (15)			1	1	
	140	140,5104 (12)	140,5105 (12)				1	
106-Ru	511	511,8530 (26)	511,8534 (26)				1	
108-Ag	433	433,939 (3)	433,939 (3)				5	
	614	614,2808 (14)	614,2813 (14)				6	
	721	722,890 (3)	722,890 (3)				2	
	723	722,925 (3)	722,926 (3)				2	
109-Cd	88	88,0336 (11)	88,0336 (11)				1	
110-Ag	446	446,8146 (20)	446,8149 (20)				2	3
	620	620,3561 (14)	620,3566 (14)				2	X
	657	657,7595 (11)	657,7600 (11)				2	X
	677	677,6206 (11)	677,6211 (12)				2	X
	687	687,0101 (14)	687,0106 (15)				1	X
	706	706,6775 (12)	706,6780 (12)				2	X
	744	744,2746 (14)	744,2751 (15)				1	X
	763	763,9420 (15)	763,9425 (15)				2	X
	818	818,0240 (15)	818,0246 (16)				1	X
	884	884,6779 (14)	884,6785 (15)				1	X
	937	937,4830 (21)	937,4837 (21)				2	X
	1384	1384,2935 (18)	1384,2945 (18)				2	X
	1475	1475,7782 (21)	1475,7793 (21)				4	X
	1505	1505,0286 (20)	1505,0297 (20)			1	2	X
	1562	1562,2926 (20)	1562,2937 (21)				1	X
113-Sn	391	391,698 (3)	391,698 (3)				1	
124-Sb	602	602,7265 (21)	602,7269 (21)				1	X
	645	645,8500 (14)	645,8504 (14)				2	X
	713	713,7770 (27)	713,7776 (27)				1	X
	722	722,7829 (16)	722,7834 (16)				4	X
	790	790,710 (4)	790,710 (4)					X
	968	968,1897 (26)	968,1904 (26)				2	X
	1045	1045,1224 (26)	1045,1231 (27)				2	X
	1325	1325,5056 (27)	1325,5066 (27)				2	X
	1368	1368,162 (5)	1368,163 (5)				2	X
	1436	1436,555 (4)	1436,556 (4)				2	X
	1690	1690,9665 (29)	1690,9677 (30)				6	X
	1720	1720,41 (7)	1720,41 (7)				1	
	2090	2090,937 (6)	2090,938 (6)					X
125-Sb	176	176,3131 (10)	176,3132 (10)				2	
	204	204,137 (11)	204,137 (11)				1	
	208	208,076 (4)	208,076 (4)				3	X
	427	427,876 (4)	427,876 (4)				1	X
	443	443,557 (10)	443,557 (10)				1	
	463	463,367 (4)	463,367 (4)				1	X
	600	600,5995 (15)	600,5999 (15)				3	
	606	606,7167 (23)	606,7172 (23)				2	
	635	635,9507 (13)	635,9512 (13)				2	X
	671	671,4416 (19)	671,4421 (19)				1	X
125-Sn	1806	1806,686 (11)	1806,687 (11)				1	
	1889	1889,880 (11)	1889,881 (11)				1	
	2002	2002,155 (5)	2002,157 (5)				5	
	2201	2201,006 (13)	2201,008 (13)				1	
	2275	2275,753 (11)	2275,755 (11)				1	

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama (keV)</i>	<i>Energia MMQ2002<sup>a)</sup> (keV)</i>	<i>Energia MMQ86<sup>b)</sup> (keV)</i>	<i>Valor<sup>c)</sup></i>	<i>Incerteza<sup>d)</sup></i>	<i>[D]<sup>e)</sup></i>	<i>[S]<sup>f)</sup></i>	<i>[R]<sup>g)</sup></i>
132-Cs	667	667,7155 (13)	667,7159 (13)				2	X
	1317	1317,922 (5)	1317,923 (5)				1	X
	1985	1985,630 (5)	1985,631 (5)				1	X
133-Ba	53	53,1621 (7)	53,1621 (7)				3	X
	79	79,6143 (14)	79,6144 (14)				2	X
	80	80,9966 (10)	80,9967 (10)				4	X
	160	160,6109 (17)	160,6110 (17)				1	X
	223	223,2368 (14)	223,2369 (14)				1	X
	276	276,3987 (14)	276,3989 (14)				4	X
	302	302,8510 (6)	302,8512 (6)				4	X
	356	356,0129 (7)	356,0131 (7)				4	X
	383	383,8474 (11)	383,8476 (11)				4	X
	137-Cs	661,6566 (11)	661,6570 (11)			1	16	
139-Ce	165	165,8555 (9)	165,8556 (9)			1	4	
141-Ce	145	145,4436 (13)	145,4437 (13)			1	2	
144-Ce	696	696,5092 (13)	696,5097 (13)				4	X
	1489	1489,1478 (28)	1489,1488 (28)				3	X
	2185	2185,649 (3)	2185,651 (3)				8	X
	152-Eu	121,7816 (3)	121,7817 (3)			1		X
	244	244,6973 (8)	244,6975 (8)			1	3	X
	251	251,633 (11)	251,633 (11)				1	
	295	295,9386 (19)	295,9388 (19)				2	X
	344	344,2776 (9)	344,2778 (9)			1	3	X
	367	367,7889 (18)	367,7892 (18)			1	2	X
	411	411,1161 (11)	411,1164 (11)			1	3	X
153-Gd	488	488,6785 (22)	488,6788 (22)				1	X
	503	503,472 (5)	503,473 (5)				1	X
	566	566,440 (6)	566,441 (6)				2	X
	586	586,2643 (23)	586,2647 (23)				2	X
	656	656,489 (5)	656,489 (5)				1	
	671	671,155 (19)	671,155 (19)				1	
	678	678,620 (4)	678,621 (4)				1	X
	688	688,673 (4)	688,674 (4)				1	X
	778	778,9039 (21)	778,9045 (21)			1		X
	810	810,454 (4)	810,455 (4)				1	X
	841	841,574 (6)	841,574 (6)				1	X
	867	867,379 (4)	867,379 (4)				1	X
	919	919,335 (4)	919,336 (4)				1	X
	1085	1085,834 (11)	1085,834 (11)				1	
	1089	1089,734 (4)	1089,735 (4)				1	X
	1112	1112,074 (4)	1112,075 (4)				1	X
	1212	1212,945 (12)	1212,946 (12)				1	X
	1299	1299,143 (8)	1299,144 (8)				1	
	1408	1408,011 (4)	1408,012 (4)				1	X
	1457	1457,640 (12)	1457,641 (12)				1	X
153-Gd	69	69,67293 (14)	69,67298 (15)			1		X
	75	75,42207 (26)	75,42213 (26)			1		X
	83	83,36711 (23)	83,36717 (23)			1		X
	89	89,48588 (24)	89,48595 (24)			1		X
	97	97,43092 (23)	97,43099 (24)			1		X
	103	103,18006 (19)	103,18013 (20)			1	?	X
	172	172,85294 (21)	172,85306 (22)			1		X

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama (keV)</i>	<i>Energia MMQ2002<sup>(a)</sup> (keV)</i>	<i>Energia MMQ86<sup>(b)</sup> (keV)</i>	<i>Valor<sup>(c)</sup></i>	<i>Incerteza<sup>(d)</sup></i>	<i>[D]<sup>(e)</sup></i>	<i>[S]<sup>(f)</sup></i>	<i>[R]<sup>(g)</sup></i>	
<i>154-Eu</i>	123	123,0702 (10)	123.0703 (10)				2	X	
	247	247,9284 (9)	247.9285 (9)				2	X	
	444	444,4934 (20)	444.4937 (20)				2	X	
	591	591,7601 (27)	591.7606 (27)				1	X	
	625	625,2585 (22)	625.2589 (22)				2	X	
	692	692,4210 (18)	692.4215 (18)				4	X	
	723	723,3028 (20)	723.3033 (20)				2	X	
	756	756,8011 (26)	756.8017 (26)				2	X	
	845	845,416 (8)	845.417 (8)				1		
	873	873,1858 (22)	873.1864 (22)				2	X	
	892	892,775 (6)	892.775 (6)				2	X	
	904	904,0676 (26)	904.0682 (26)				3	X	
	996	996,2552 (23)	996.2560 (23)				1	X	
	1128	1128,549 (8)	1128.550 (8)				3		
	1140	1140,702 (6)	1140.702 (6)				2	X	
	1246	1246,121 (5)	1246.122 (5)				1	X	
	1274	1274,430 (4)	1274.431 (4)				2		
	1494	1494,047 (5)	1494.048 (5)				2	X	
	1596	1596,4842 (27)	1596.4853 (28)				1	X	
<i>160-Tb</i>	86	86,7876 (4)	86.7877 (4)			1		X	
	93	93,921 (5)	93.922 (5)			1		X	
	197	197,0340 (11)	197.0341 (11)			1	1		
	215	215,6451 (11)	215.6452 (11)			1	2	X	
	298	298,5783 (16)	298.5785 (16)			1		X	
	879	879,3740 (14)	879.3746 (15)				7	X	
	962	962,3068 (22)	962.3075 (22)					X	
	966	966,1611 (15)	966.1618 (15)					X	
	1177	1177,9505 (19)	1177.9514 (19)				2	X	
	1271	1271,871 (5)	1271.872 (5)				1	X	
	161-Tb	25	25,651302 (29)	25.651321 (31)			1	2	X
	48	48,91524 (5)	48.91528 (5)			4	2	X	
<i>169-Yb</i>	57	57,1916 (3)	57.1917 (3)				1		
	74	74,56654 (8)	74.56659 (8)			1	4	X	
	63	63,12039 (3)	63.12043 (4)	X			2	X	
	93	93,61439 (6)	93.61445 (7)	x			3		
	109	109,77915 (4)	109.77923 (5)	X	x		3	X	
	118	118,18931 (11)	118.18940 (12)				3	X	
	130	130,52284 (3)	130.52293 (6)	X	x		3	X	
	177	177,21290 (4)	177.21303 (8)	X	x		4	X	
<i>170-Tm</i>	197	197,95658 (5)	197.95672 (8)	X	x		8	X	
	261	261,07689 (6)	261.07708 (11)	X	x		3	X	
	307	307,73559 (6)	307.73581 (12)	X	X		5	X	
	84	84,25457 (7)	84.25463 (7)				4		
	23	23,93290 (22)	23.93292 (22)				2		
<i>172-Hf</i>	81	81,7513 (5)	81.7513 (5)				3		
	78	78,7423 (5)	78.7424 (5)				2		
	90	90,6435 (7)	90.6436 (7)				2		

Nuclídeo	Gama (keV)	Energia MMQ2002 <sup>a)</sup> (keV)	Energia MMQ86 <sup>b)</sup> (keV)	Valor <sup>c)</sup>	Incerteza <sup>d)</sup>	[D] <sup>e)</sup>	[S] <sup>f)</sup>	[R] <sup>g)</sup>
182-Ta	31	31,7373 (5)	31,7373 (5)			1		X
	42	42,7146 (3)	42,7147 (3)			1		X
	65	65,72215 (14)	65,72219 (14)			2		X
	67	67,74970 (7)	67,74975 (7)			5		X
	84	84,68012 (24)	84,68018 (25)			1	3	X
	100	100,10586 (7)	100,10593 (8)			1	2	X
	113	113,67155 (21)	113,67163 (22)			2	1	X
	116	116,4174 (5)	116,4175 (5)			1	1	X
	152	152,42979 (24)	152,42990 (25)			2	1	X
	156	156,38616 (29)	156,38627 (30)			2		X
	179	179,39365 (24)	179,39378 (24)			2	1	X
	198	198,35162 (27)	198,35176 (28)			2	3	X
	222	222,10825 (31)	222,10840 (31)			2	1	X
	229	229,3204 (6)	229,3205 (6)			2	1	
	264	264,07369 (29)	264,07388 (30)			2	3	X
	1121	1121,2874 (19)	1121,2882 (20)			4		X
	1157	1157,2996 (20)	1157,3005 (20)					X
	1189	1189,0367 (19)	1189,0375 (20)			4		X
	1221	1221,3926 (19)	1221,3935 (20)			2		X
	1231	1231,0019 (20)	1231,0028 (20)			2		X
	1257	1257,4048 (20)	1257,4057 (20)			2		X
	1273	1273,7162 (19)	1273,7171 (20)					X
	1289	1289,1418 (19)	1289,1428 (20)					X
	1373	1373,8213 (19)	1373,8223 (20)			1		X
	1387	1387,3869 (19)	1387,3879 (20)					X
185-Os	125	125,3583 (9)	125,3584 (9)			2		X
	162	162,8486 (22)	162,8487 (22)			1		X
	234	234,1545 (22)	234,1547 (22)			1		X
	592	592,0743 (17)	592,0747 (17)			5		X
	646	646,1264 (14)	646,1268 (14)			4		X
	717	717,4321 (16)	717,4326 (16)			5		X
	874	874,8242 (27)	874,8248 (27)			4		
	880	880,2800 (19)	880,2806 (19)			6		X
192-Ir	136	136,34272 (21)	136,34281 (22)			2		X
	205	205,79417 (18)	205,79432 (20)			4		
	295	295,95634 (10)	295,95655 (15)	X	x	6	4	X
	308	308,45494 (14)	308,45516 (18)	X	x	6	3	X
	316	316,50587 (10)	316,50609 (15)	X	x	7	4	X
	416	416,4693 (5)	416,4696 (5)			2		X
	468	468,06841 (17)	468,06875 (23)	X	x	8	3	X
	484	484,5749 (4)	484,5752 (4)			3	2	
	588	588,5812 (5)	588,5817 (5)			5	8	X
	604	604,41077 (18)	604,41120 (28)	X	x	6	4	X
	612	612,46169 (15)	612,46212 (26)	X	x	6	4	X
	884	884,5366 (5)	884,5372 (6)	X		1	6	X

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama (keV)</i>	<i>Energia MMQ2002<sup>(a)</sup> (keV)</i>	<i>Energia MMQ86<sup>(b)</sup> (keV)</i>	<i>Valor<sup>(c)</sup></i>	<i>Incerteza<sup>(d)</sup></i>	<i>[D]<sup>(e)</sup></i>	<i>[S]<sup>(f)</sup></i>	<i>[R]<sup>(g)</sup></i>
198-Au	411	411,80169 (9)	411,80198 (17)	X	x	137	2	X
	675	675,8832 (7)	675,8836 (7)			2	2	X
	1087	1087,6833 (7)	1087,6841 (8)	x			5	X
199-Au	49	49,82630 (11)	49,82634 (11)			1		X
	158	158,37837 (9)	158,37848 (10)	X		1	1	X
	208	208,20463 (10)	208,20478 (12)	X		1	1	X
203-Hg	279	279,1947 (10)	279,1949 (10)			2	2	X
203-Pb	401	401,3206 (27)	401,3208 (27)				1	X
	680	680,5147 (27)	680,5151 (27)				2	X
207-Bi	569	569,7001 (15)	569,7005 (15)				4	
	1063	1063,6526 (24)	1063,6534 (24)				4	
	1770	1770,217 (7)	1770,218 (7)				2	
210-Pb	46	46,5394 (10)	46,5394 (10)				2	
228-Th	583	583,1870 (23)	583,1874 (23)				2	
	2614	2614,511 (11)	2614,513 (11)				1	
241-Am	26	26,34461 (22)	26,34463 (22)				2	
	59	59,54076 (12)	59,54080 (12)				3	

(a) Resultados usando o procedimento desenvolvido neste trabalho adotando as constantes fundamentais do CODATA 2002.

(b) Resultados usando o procedimento desenvolvido neste trabalho quando adotando as constantes fundamentais do CODATA 86

(c) Indicador de que as diferenças nos valores recomendados é superior à menor das incertezas.

(d) Indicador de que as incertezas atribuídas diferem de mais de 25% da menor das incertezas.

(e) Número de informações experimentais de medidas baseadas em difração.

(f) Número de informações experimentais de medidas em detectores semicondutores

(g) Indica se o gama está envolvido em relações baseadas nos esquemas de decaimento.

## IV.2.2 Principais correlações entre os padrões de energia gama

As correlações entre os padrões de energia gama foram alteradas pela mudança no valor adotado para as constantes fundamentais e a listagem das principais correlações, tanto usando  $f_{86}$  quanto  $f_{2002}$ , (selecionadas segundo o critério estabelecido na seção III.3) está apresentada na Tabela B.3 do Apêndice B com trechos reproduzidos na Tabela IV-6.

**Tabela IV-6 - Comparaçāo das correlações entre as energias gama quando considerando as constantes fundamentais do CODATA 2002 e do CODATA 86.**

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{2002}^{(a)}$	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(b)}$	Mesmo nuclídeo
78 keV (44-Ti)	67 keV (44-Ti)	0,43	0,43	X
3451 keV (56-Co)	1037 keV (56-Co)	0,53	0,55	X
	1175 keV (56-Co)	0,77	0,78	X
	1238 keV (56-Co)	0,77	0,78	X
	1640 keV (56-Co)	0,63	0,64	X
	1771 keV (56-Co)	0,43	0,45	X
	1810 keV (56-Co)	0,47	0,48	X
	2015 keV (56-Co)	0,39	0,41	X
	2034 keV (56-Co)	0,31	0,33	X
	2113 keV (56-Co)	0,36	0,38	X
	2212 keV (56-Co)	0,92	0,92	X
	2598 keV (56-Co)	0,57	0,59	X
	3009 keV (56-Co)	0,73	0,75	X
	3201 keV (56-Co)	0,52	0,54	X
	3253 keV (56-Co)	0,66	0,67	X
	3272 keV (56-Co)	0,58	0,60	X
1291 keV (59-Fe)	1274 keV (22-Na)	0,78	0,78	
	192 keV (59-Fe)	0,65	0,65	X
	1099 keV (59-Fe)	0,64	0,65	X
3228 keV (66-Ga)	1963 keV (56-Co)	0,80	0,80	
	3201 keV (56-Co)	0,86	0,87	
	1418 keV (66-Ga)	0,38	0,38	X
	1898 keV (66-Ga)	0,53	0,54	X
	1918 keV (66-Ga)	0,61	0,61	X
	2066 keV (66-Ga)	0,35	0,36	X
	2189 keV (66-Ga)	0,88	0,88	X
	2213 keV (66-Ga)	0,49	0,49	X
	2751 keV (66-Ga)	0,60	0,62	X
	3047 keV (66-Ga)	0,49	0,50	X
4806 keV (66-Ga)	1039 keV (66-Ga)	0,35	0,36	X
	2933 keV (66-Ga)	0,94	0,94	X
	3766 keV (66-Ga)	0,96	0,96	X
	4461 keV (66-Ga)	0,30	0,32	X
198 keV (75-Se)	66 keV (75-Se)	-0,67	-0,66	X
	136 keV (75-Se)	-0,38	-0,38	X
264 keV (75-Se)	121 keV (75-Se)	0,31	0,31	X
	136 keV (75-Se)	-0,52	-0,51	X
	198 keV (75-Se)	0,73	0,73	X
279 keV (75-Se)	121 keV (75-Se)	-0,76	-0,75	X
303 keV (75-Se)	96 keV (75-Se)	-0,69	-0,68	X
	198 keV (75-Se)	0,31	0,32	X
	264 keV (75-Se)	0,43	0,43	X
1650 keV (82-Br)	221 keV (82-Br)	-0,61	-0,60	X
	554 keV (82-Br)	0,49	0,50	X
	619 keV (82-Br)	0,37	0,39	X
	698 keV (82-Br)	0,42	0,43	X
	827 keV (82-Br)	0,41	0,43	X
	1044 keV (82-Br)	0,48	0,49	X
	1317 keV (82-Br)	0,59	0,60	X
	1474 keV (82-Br)	0,29	0,31	X
208 keV (125-Sb)	433 keV (108-Ag)	-0,89	-0,89	
	204 keV (125-Sb)	0,34	0,34	X
427 keV (125-Sb)	433 keV (108-Ag)	0,95	0,95	
	204 keV (125-Sb)	-0,32	-0,31	X
	208 keV (125-Sb)	-0,93	-0,93	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{2002}^{(a)}$	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(b)}$	Mesmo nuclídeo
443 keV (125-Sb)	208 keV (125-Sb)	-0,31	-0,31	X
	427 keV (125-Sb)	0,33	0,33	X
463 keV (125-Sb)	433 keV (108-Ag)	0,95	0,95	
	208 keV (125-Sb)	-0,86	-0,86	X
	427 keV (125-Sb)	0,91	0,91	X
	443 keV (125-Sb)	0,33	0,34	X
80 keV (133-Ba)	78 keV (44-Ti)	0,76	0,76	
160 keV (133-Ba)	79 keV (133-Ba)	0,80	0,80	X
	80 keV (133-Ba)	0,56	0,56	X
223 keV (133-Ba)	53 keV (133-Ba)	-0,34	-0,33	X
	79 keV (133-Ba)	-0,91	-0,91	X
	160 keV (133-Ba)	-0,76	-0,76	X
276 keV (133-Ba)	79 keV (133-Ba)	-0,87	-0,86	X
	160 keV (133-Ba)	-0,69	-0,69	X
	223 keV (133-Ba)	0,87	0,87	X
302 keV (133-Ba)	53 keV (133-Ba)	-0,42	-0,41	X
356 keV (133-Ba)	53 keV (133-Ba)	0,65	0,64	X
	302 keV (133-Ba)	0,42	0,43	X
383 keV (133-Ba)	80 keV (133-Ba)	0,84	0,84	X
	160 keV (133-Ba)	0,53	0,53	X
	302 keV (133-Ba)	0,42	0,43	X
661 keV (137-Cs)	667 keV (132-Cs)	0,70	0,71	
696 keV (144-Ce)	702 keV (94-Nb)	0,73	0,74	
	661 keV (137-Cs)	0,70	0,71	
1121 keV (182-Ta)	1175 keV (56-Co)	0,69	0,70	
	1238 keV (56-Co)	0,79	0,80	
	3451 keV (56-Co)	0,75	0,76	
1221 keV (182-Ta)	1175 keV (56-Co)	0,69	0,70	
	1238 keV (56-Co)	0,79	0,80	
	3451 keV (56-Co)	0,75	0,76	
	1121 keV (182-Ta)	1,00	1,00	X
	1157 keV (182-Ta)	0,97	0,97	X
	1189 keV (182-Ta)	1,00	1,00	X
1387 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0,79	0,80	
	3451 keV (56-Co)	0,75	0,76	
	1121 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1157 keV (182-Ta)	0,96	0,97	X
	1189 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1221 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1231 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1257 keV (182-Ta)	0,96	0,97	X
	1273 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1289 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1373 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
468 keV (192-Ir)	136 keV (192-Ir)	-0,58	-0,26	X
	295 keV (192-Ir)	0,18	0,58	X
	308 keV (192-Ir)	0,18	0,52	X
	316 keV (192-Ir)	0,14	0,59	X
604 keV (192-Ir)	130 keV (169-Yb)	0,21	0,70	
	197 keV (169-Yb)	0,22	0,71	
	261 keV (169-Yb)	0,22	0,72	
	307 keV (169-Yb)	0,29	0,76	
	136 keV (192-Ir)	0,64	0,57	X
	205 keV (192-Ir)	0,06	0,31	X
	295 keV (192-Ir)	0,61	0,82	X
	308 keV (192-Ir)	0,81	0,88	X
	316 keV (192-Ir)	0,18	0,65	X
	416 keV (192-Ir)	0,17	0,32	X
	468 keV (192-Ir)	0,25	0,65	X
	484 keV (192-Ir)	0,06	0,32	X
	588 keV (192-Ir)	0,13	0,39	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{2002}^{(a)}$	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(b)}$	Mesmo nuclídeo
411 keV (198-Au)	109 keV (169-Yb)	0,38	0,75	
	130 keV (169-Yb)	0,41	0,82	
	177 keV (169-Yb)	0,50	0,85	
	197 keV (169-Yb)	0,46	0,85	
	261 keV (169-Yb)	0,55	0,87	
	307 keV (169-Yb)	0,63	0,91	
	316 keV (192-Ir)	0,28	0,74	
	604 keV (192-Ir)	0,26	0,74	
	612 keV (192-Ir)	0,33	0,80	
675 keV (198-Au)	411 keV (198-Au)	0,08	0,31	X
1087 keV (198-Au)	411 keV (198-Au)	0,20	0,49	X
	675 keV (198-Au)	0,99	0,98	X

(a) Correlação entre Gama 1 e Gama 2 quando considerando as constantes fundamentais do CODATA 2002

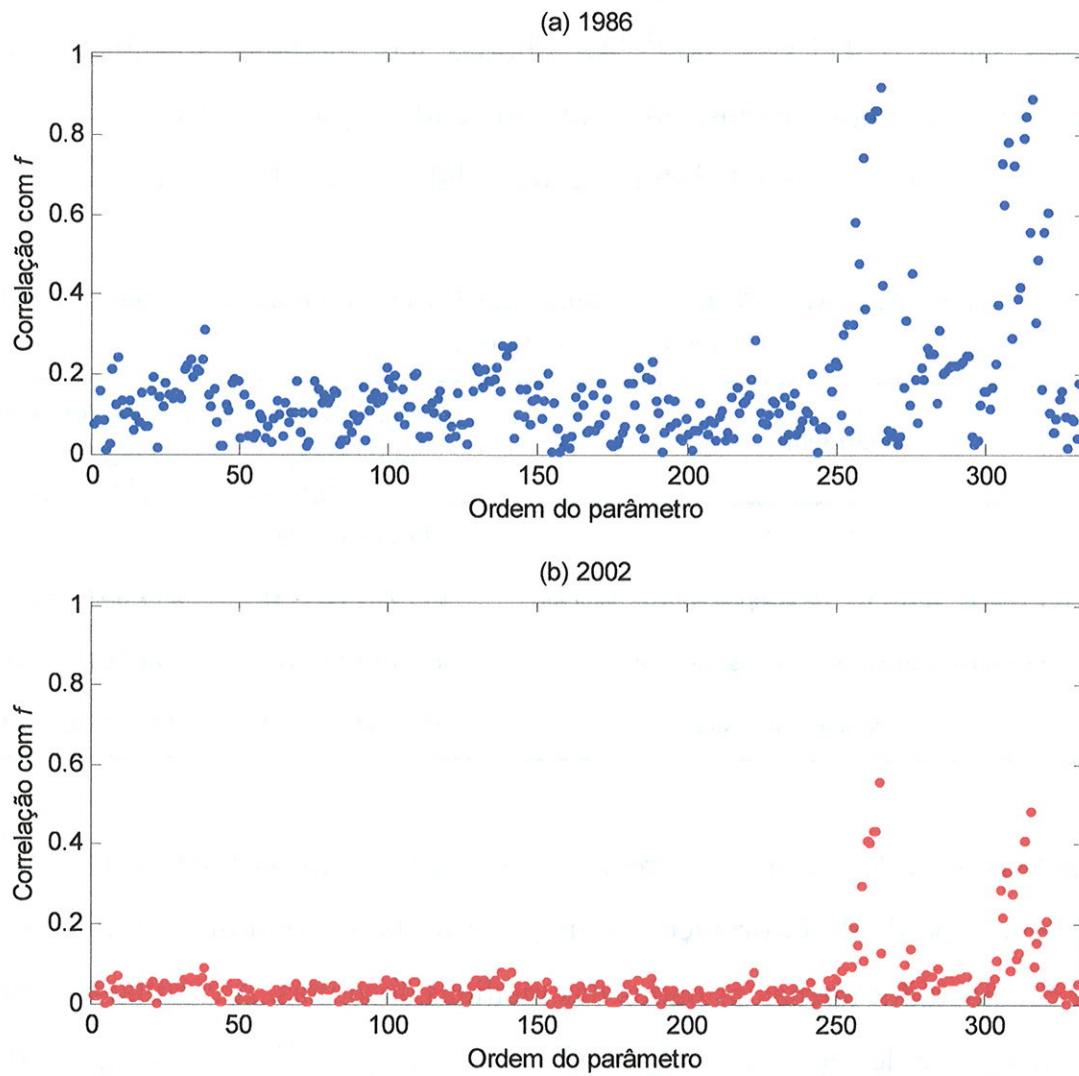
(b) Correlação entre Gama 1 e Gama 2 quando considerando as constantes fundamentais do CODATA 86

### IV.3 Diferenças devidas à atualização para as constantes fundamentais de 2002

A seguir discutimos alguns efeitos sobre o conjunto das energias dos raios gama padrões de calibração originados pela atualização das constantes fundamentais de 1986 para 2002.

#### IV.3.1 Correlações entre as energias gama e $f$

Com a redução da incerteza do parâmetro relacionado às constantes fundamentais das quais as energias gama dependem,  $f$ , as correlações entre as energias e  $f$  diminuíram bastante, como pode ser observado na Figura IV.3.



Correlações entre cada uma das energias gama e a relação entre as constantes fundamentais expressa por  $f$ :

- (a) – Usando os valores recomendados do CODATA 86<sup>[5]</sup>
- (b) – Usando os valores recomendados do CODATA 2002<sup>[7]</sup>

**Figura IV.3 - Correlações entre as energias gama e  $f$ .**

### IV.3.2 O “gold standard” na escala de 2002

Conforme discutido na seção III.5, a compilação das energias gama da ref. 1 considerou o raio gama de 411 keV do  $^{198}\text{Au}$  como um padrão imutável de energia, determinado apenas pelas medidas “absolutas” de energia gama. Com isso, não foram aproveitadas as informações sobre a energia deste gama originadas dos dados experimentais que o relacionavam com os demais raios gama do conjunto de padrões.

Usando a mesma idéia empregada na seção III.5, isto é, separando as informações sobre o 411 keV do  $^{198}\text{Au}$  obtidas nas medidas absolutas daquelas obtidas a partir dos outros dados, obtivemos os dados apresentados na Tabela IV-7, onde podemos avaliar o efeito da informação perdida sobre este gama.

**Tabela IV-7 – Energia do 411 keV do  $^{198}\text{Au}$ : influência dos dados considerados e das constantes fundamentais ( $f_{86}$  ou  $f_{2002}$ ).**

<i>Origem</i>	<i>Energia do 411 keV do <math>^{198}\text{Au}</math> (em keV)</i>	
	<i>considerando CODATA 86</i>	<i>considerando CODATA 2002</i>
<i>Análise ref. 1</i>	<b>411,802 05 (17)</b>	
<i>Apenas medidas “absolutas” de comprimento de onda <math>Au_A</math></i>	<b>411,802 06 (18)</b>	<b>411,801 77 (11)</b>
<i>Apenas relações com os outros gamas <math>Au_C</math></i>	<b>411,801 91 (18)</b>	<b>411,801 61 (11)</b>
<i>Análises deste trabalho <math>Au_{MMQ}</math></i>	<b>411,801 98 (17)</b>	<b>411,801 69 (9)</b>

Analizando a Tabela IV-7 percebe-se que a redução na incerteza de  $f$  tornou mais evidente a perda de informações e de precisão na energia do 411 keV do  $^{198}\text{Au}$  se forem considerados apenas os dados das medidas absolutas. A correlação entre  $Au_A$  e  $Au_C$  reduziram-se de  $\rho(Au_A, Au_C)_{86} = 0,71$ , com  $f_{86}$ , para  $\rho(Au_A, Au_C)_{2002} = 0,21$ .

Usando o conceito de quantidade de informação como o inverso da variância<sup>[78]</sup>, a informação perdida, por considerar o Au como um parâmetro fixo, corresponde a cerca de 40% ( $\frac{(0,085\text{ eV})^{-2} - (0,11\text{ eV})^{-2}}{(0,085\text{ eV})^{-2}} \approx 0,4$ , pois a incerteza do  $Au_{MMQ}$  usando  $f_{2002}$  é 0,085eV) de toda a informação sobre o 411 keV do  $^{198}\text{Au}$  disponível nos dados sobre as energias dos padrões de calibração gama. É importante atentar para o fato de que a consideração equivocada de um parâmetro como fixo em uma compilação resulta na perda de precisão tanto deste parâmetro quanto na dos demais correlacionados com ele.

### IV.3.3 Diferenças nos valores adotados e nas incertezas das energias gama

Como as energias gama podem ser consideradas proporcionais a  $f$ , a mudança no valor experimental considerado para  $f$  provocou mudanças nos valores a serem adotados para todas as energias gama. Estas alterações serão estatisticamente significativas nos casos em que a incerteza relativa da energia gama obtida usando  $f_{86}$  é comparável com a variação relativa de  $f$ , que foi de

$$\frac{f_{86} - f_{2002}}{f_{86}} = 7 \cdot 10^{-7}.$$

Os gamas em que a alteração nos valores adotados para a energia foram superiores a incerteza usando  $f_{2002}$  estão assinalados na Tabela IV-5, anteriormente apresentada, com um “X” na coluna identificada por “valor”.

As alterações estatisticamente significativas nas incertezas das energias gama ocorreram naquelas em que a correlação com o parâmetro relacionado com as constantes fundamentais era importante, pois nestes casos (discutidos na seção III.4.1) a incerteza de  $f$  produz uma contribuição importante na incerteza da energia do gama. Os casos em que as alterações relativas das incertezas foram superiores a 25% estão assinalados na Tabela IV-5 com um “X” na coluna identificada por “incerteza”.

Analizando as colunas “valor” e “incerteza” da Tabela IV-5 é possível notar que geralmente os casos que apresentaram variação importante na incerteza também apresentaram variações importantes de valor, uma vez que ambas as variações são tão mais significativas quanto maiores forem as correlações com as constantes fundamentais.

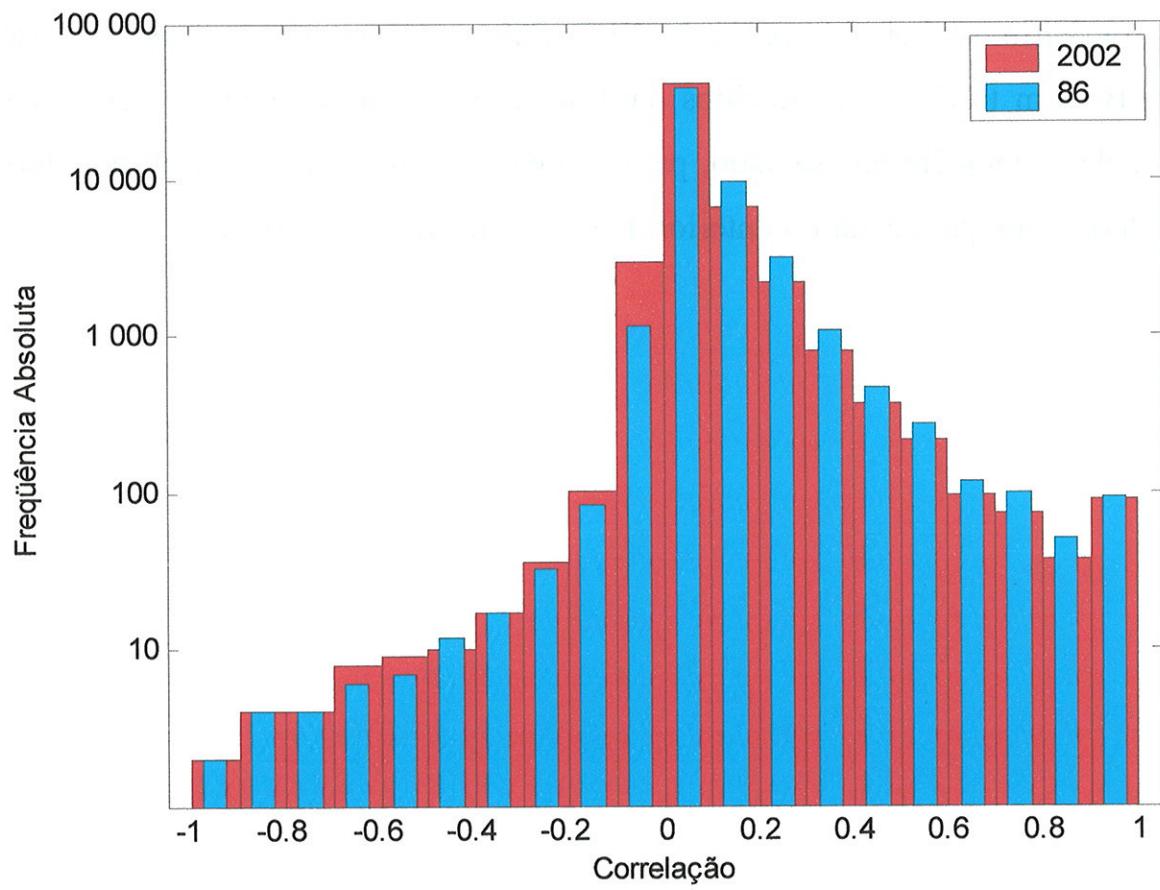
#### IV.3.4 Diferenças nas correlações importantes

As correlações importantes entre energias gama obtidas na compilação utilizando  $f_{86}$  e as principais origens destas correlações foram discutidas nas seções III.3 e III.4, respectivamente. As correlações entre energias gamas devidas às constantes fundamentais foram muito reduzidas com a utilização, no ajuste de compilação das energias gama, do valor experimental de  $f$  baseado nos valores recomendados para as constantes fundamentais de 2002.

Assim, é esperado que as alterações nas correlações entre as energias gama provocadas pela mudança do valor adotado para  $f$  sejam geralmente no sentido de torná-las menos positivas por conta da redução significativa na incerteza de  $f$  e, consequentemente em um fator que contribui positivamente para a covariância entre duas energias gama conforme mostra a equação (59).

Avaliando a Tabela B.2 do Apêndice B (com trechos reproduzidos na Tabela IV-6), é possível perceber, no entanto, alguns casos em que a correlação aumentou, como é o caso da correlação entre as energias dos raios gama de 1087 keV e 675 keV do  $^{198}\text{Au}$ , cuja correlação aumentou de 0,98 para 0,99. Este aumento é provocado pelo fato de que a origem da correlação positiva entre o 1087 keV e o 675 keV é devida às relações baseadas no esquema de decaimento do  $^{198}\text{Au}$ , pois os gamas de 675 keV e 411 keV formam uma cascata em que o 1087 keV é o gama do cross-over. Com a atualização para as constantes fundamentais de 2002 a energia do gama de 411 keV apresentou uma redução de incerteza muito maior que a dos demais raios gama do  $^{198}\text{Au}$ . Assim, como a incerteza na diferença de energia entre os gamas de 1087 keV e 675 keV reduziu-se, aumentou a correlação positiva entre estas energias. Este é o mesmo motivo da elevação da correlação entre as energias dos raios gama de 604 keV e 136 keV do  $^{192}\text{Ir}$  cuja correlação passou de 0,57 para 0,64.

A Figura IV.4 compara o histograma das correlações entre as energias gama quando é utilizado  $f_{2002}$  com aquele, já apresentado na Figura III.5, que corresponde ao uso de  $f_{86}$ .



Histograma comparativo das correlações das energias gama dos padrões de calibração entre si obtidas nos ajustes considerando a relação entre as constantes fundamentais de 86 e de 2002.

**Figura IV.4 - Histograma das correlações entre energias gama padrões usando  $f_{2002}$  e  $f_{86}$ .**

Analizando a Figura IV.4 percebe-se que, com a diminuição da incerteza de  $f$ , de fato há uma redução na quantidade de correlações positivas, embora seja mantido o predomínio de correlações positivas em relação às negativas.

É interessante perceber que a freqüência das correlações de módulo próximos a 1, tanto positivas (entre 0,9 e 1,0), quanto negativas (entre -1,0 e -0,7), no entanto, praticamente não se alteraram. O motivo reside no fato de que a principal origem das correlações negativas e das positivas de módulo próximos a 1 são as relações baseadas nos esquemas de decaimento e não as constantes fundamentais\*.

\* Algumas correlações positivas próximas a +1 são também provocadas por medidas de diferença de energia em detectores semicondutores, que também não sofrem alterações por causa das constantes fundamentais.

As correlações importantes entre os padrões de energia gama selecionadas segundo o critério estabelecido na seção III.3<sup>\*</sup> estão apresentadas na Tabela B.2 do Apêndice B, com trechos reproduzidos na Tabela IV-6, anteriormente apresentada. Nestas tabelas é também apresentado, para comparação, o valor da correlação entre aquele determinado par de gamas anteriormente obtido considerando  $f_{86}$ .

---

\* Nossa critério de quais as correlações apresentar explicitamente no Apêndice foi o seguinte: apresentamos todas as correlações superiores a 0,7 em módulo e aquelas superiores a 0,3 em módulo quando associadas a raios gama que seguem o decaimento de um mesmo nuclídeo.

# Capítulo V. O Método do Ajuste Único

Diversos procedimentos experimentais baseiam-se no processo de calibrar equipamentos com padrões conhecidos e determinar as grandezas de interesse por interpolações ou extrapolações. Neste capítulo apresentamos um método desenvolvido para analisar medidas com equipamentos calibráveis que é adequado para ser utilizado com padrões, pois, em uma única etapa, este procedimento determina a curva de calibração do equipamento, fornece os valores das grandezas procuradas e atualiza o conjunto de valores a serem adotados para todo o conjunto de padrões das grandezas, observadas ou não no experimento. Iremos ilustrar o caso de medidas de energia de raios gama em espectroscopia gama com detectores semicondutores, porém este procedimento pode ser generalizado para qualquer problema de calibração-interpolação.

## ***V.1 Análise de medidas de espectroscopia gama com detectores semicondutores***

Nas medidas de energia de raios gama em detectores semicondutores, a escala do equipamento corresponde à posição (do centróide) do fotópico e a grandeza física de interesse é a energia do raio gama. O dado primário obtido neste tipo de experimento é um histograma (chamado de espectro) do número de eventos detectados em termos de uma escala que se relaciona com a energia depositada no detector.

Assim, consideremos o caso de uma medida em que raios gama são observados em um detector cuja relação entre o valor verdadeiro da energia do raio gama ( $E_i^0$ ) e a posição verdadeira do fotópico correspondente ( $P_i^0$ ) é descrita por um polinômio de

grau G através dos valores verdadeiros dos parâmetros da curva de calibração dos detectores ( $C_k^0$ ,  $k=0,1,\dots,G$ ). Nestas condições, a relação entre os valores verdadeiros das grandezas envolvidas no experimento, devido às características do detector utilizado, é

$$0 = -E_i^0 + \sum_{k=0}^G (P_i^0)^k \cdot C_k^0. \quad (60)$$

Nos casos reais, no entanto, não se têm os valores verdadeiros das posições dos fotópicos, mas sim um valor experimental de posição do fotópico,  $P_i$ , e sua respectiva incerteza,  $\sigma_{P_i}$ , determinados de um ajuste do espectro na região do fotópico<sup>[85, 84, 83]</sup>.

Assim, a relação entre a posição do fotópico e as energias verdadeiras dos gama é

$$0 = -E_i^0 + \sum_{k=0}^G (P_i)^k \cdot C_k^0 + \varepsilon_{PC_i}, \quad (61)$$

onde  $\varepsilon_{PC_i}$  corresponde ao erro da posição do fotópico em unidades de energia e se relaciona com a incerteza da posição do fotópico por  $\langle \varepsilon_{PC_i}^2 \rangle = (b \cdot \sigma_{P_i})^2$ , sendo  $b$  uma estimativa do coeficiente angular da curva de calibração na posição do fotópico\* ou, de modo mais geral,  $\langle \varepsilon_{PC_i} \cdot \varepsilon_{PC_j} \rangle = V_{PC_{i,j}}$ , sendo  $V_{PC}$  a matriz de covariância das posições dos fotópicos em unidades de energia. Eventuais dúvidas sobre a validade da relação entre a energia e a posição dos fotópicos (como, por exemplo, efeitos de uma pequena não linearidade diferencial do ADC) são incluídas em  $V_{PC}$ <sup>[108, 80, 79]</sup>.

As energias verdadeiras dos raios gama não são conhecidas exatamente. Porém, sabe-se que os valores de referência da literatura,  $R_i$ , são estimativas de seus valores verdadeiros,

---

\* Em espectroscopia gama o termo linear é predominante, de modo que o coeficiente angular da relação entre energia e canal é aproximadamente o mesmo em todo o espectro e corresponde a uma estimativa de  $C_1^0$ .

$$R_i = E_i^0 + \varepsilon_{R_i}, \quad (62)$$

sujeitas a erros,  $\varepsilon_{R_i}$ , desconhecidos, porém relacionados com a matriz de correlação dos valores de referência,  $V_R$ , por  $\langle \varepsilon_{R_i} \cdot \varepsilon_{R_j} \rangle = V_{R_{i,j}}$ .

Os procedimentos de análise de medidas de energia em detectores semicondutores consistem em relacionar os valores de referência das energias dos raios gama com as relações entre as energias e as posições dos fotópicos correspondentes expressa pela equação (61). Um dos modos de efetuar esta relação é combinar (somar) as equações que descrevem o comportamento do detector, equação (61), com as relacionadas às informações da literatura, equação (62), resultando em

$$R_i = \sum_{k=0}^G (P_i)^k \cdot C_k^0 + (\varepsilon_{PC_i} + \varepsilon_{R_i}). \quad (63)$$

Devido à independência estatística entre os erros das posições dos fotópicos e os erros das energias de referência da literatura, a relação entre os vetores dos erros da equação (63) e as matrizes de covariância correspondentes é

$$\langle (\vec{\varepsilon}_{PC} + \vec{\varepsilon}_R) \cdot (\vec{\varepsilon}_{PC} + \vec{\varepsilon}_R)^T \rangle = V_{PC} + V_R. \quad (64)$$

### V.1.1 O procedimento tradicional

O procedimento usual para tratar os dados de medidas de energia em detectores semicondutores consiste em dividir os raios gama observados no experimento em dois grupos: um para calibração e outro cujos valores de energia serão determinados no experimento. A definição sobre em qual dos grupos cada um dos raios gama irá ser classificado depende de escolhas arbitrárias relacionadas, inclusive, com a precisão com que as energias são conhecidas na época em que se realiza a análise dos dados do experimento.

O procedimento tradicional divide-se em duas etapas: a primeira, durante a qual é determinada a curva de calibração do detector com os raios gama selecionados

para calibração; e uma segunda, em que é efetuada a determinação das energias dos raios gama de interesse, por interpolações sobre a curva de calibração.

Na primeira etapa a relação entre as energias de referência e a curva de calibração do detector é dada pela equação (63). Assim, se dos  $M$  raios gama observados no experimento, os  $Mc$  primeiros forem selecionados para calibração, a equação matricial do procedimento de calibração (primeira etapa) é

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_{Mc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & P_1 & (P_1)^2 & \cdots & (P_1)^G \\ 1 & P_2 & (P_2)^2 & \cdots & (P_2)^G \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & P_{Mc} & (P_{Mc})^2 & \cdots & (P_{Mc})^G \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} C_0^0 \\ C_1^0 \\ C_2^0 \\ \vdots \\ C_G^0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{trad\ 1} \\ \varepsilon_{trad\ 2} \\ \vdots \\ \varepsilon_{trad\ Mc} \end{pmatrix}$$

onde  $\varepsilon_{trad\ i} = \varepsilon_{PC\ i} + \varepsilon_{R\ i}$  e, pela equação (64),  $\langle \bar{\varepsilon}_{trad} \cdot \bar{\varepsilon}_{trad}^T \rangle = V_{PC} + V_R$ . Por identificação direta com a equação do modelo linear do MMQ (7), temos o vetor de

dados,  $\bar{\mathbf{Y}}_{\text{trad}} = \bar{\mathbf{R}}_C = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_{Mc} \end{pmatrix}$ , a matriz de planejamento,

$\mathbf{X}_{\text{trad}} = \mathbf{P}_C = \begin{pmatrix} 1 & P_1 & (P_1)^2 & \cdots & (P_1)^G \\ 1 & P_2 & (P_2)^2 & \cdots & (P_2)^G \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & P_{Mc} & (P_{Mc})^2 & \cdots & (P_{Mc})^G \end{pmatrix}$ , e o vetor de parâmetros,  $\bar{\mathbf{P}}_{\text{trad}}^0 = \bar{\mathbf{C}}^0 = \begin{pmatrix} C_0^0 \\ C_1^0 \\ C_2^0 \\ \vdots \\ C_G^0 \end{pmatrix}$ .

A matriz de covariância dos dados é  $\mathbf{V}_{\mathbf{Y}_{\text{trad}}} = V_{PC} + V_R$ .

Com a realização do ajuste pelo MMQ, os parâmetros da curva de calibração do detector são obtidos pela equação (8), com matriz de covariância dada pela equação (9).

Na segunda etapa, as energias dos outros  $Md$  ( $Md = M - Mc$ ) raios gama de interesse são obtidas por interpolações sobre a curva de calibração determinada na

primeira etapa, juntamente com as posições dos fotópicos correspondentes. As covariâncias nos valores das energias obtidas podem ser determinadas por propagação matricial de incertezas.

Com isso, percebe-se que no procedimento tradicional as grandezas “de interesse” têm seu conhecimento prévio totalmente desconsiderado durante a etapa de calibração do equipamento. Embora esta informação possa ser considerada em uma terceira etapa, combinando-se os valores das energias dos raios gama obtidos pela interpolação com os conhecidos a priori, as covariâncias envolvendo as outras energias de referência utilizadas para calibrar o detector não são corretamente consideradas.

As grandezas “de calibração”, por outro lado, são consideradas imutáveis, permanecendo em seus valores conhecidos a priori. Portanto, o conhecimento sobre estas grandezas obtido no experimento é totalmente desconsiderado.

## ***V.2 Procedimentos de Auto-Calibração em espectroscopia gama***

A percepção de que há perda de informação com o uso do procedimento tradicional levou ao desenvolvimento de metodologias de análise de dados mais completas, visando aproveitar de maneira mais ampla as informações experimentais obtidas nas medidas e a correta consideração das covariâncias envolvidas. Estes métodos são particularmente importantes quando as grandezas observadas são padrões de calibração.

### **V.2.1 Método da Auto-Calibração**

Um destes métodos, desenvolvido no Laboratório do Acelerador Linear do Departamento de Física Experimental do Instituto de Física da USP, é o Método da Auto-Calibração<sup>[79, 80]</sup>. Neste, em uma primeira etapa, o detector é calibrado com as informações conhecidas a priori sobre todos os raios gama observados, tanto os de

“calibração” quanto os de “interesse”; em uma segunda etapa, um segundo conjunto de valores de energias para estes mesmos raios gama é obtido por interpolação sobre a curva de calibração; e, em uma terceira etapa, os valores recomendados para as energias destes gamas são obtidos através de um novo ajuste pelo MMQ, considerando-se as correlações entre os valores das energias obtidas pela interpolação e o das energias conhecidas inicialmente que foram utilizadas para calibrar aquele detector.

O método da Auto-Calibração apresenta o inconveniente de lidar com a inversão de matrizes de covariância singulares<sup>[79, 11]</sup> que, por se tratar de uma singularidade não essencial, pode ser contornada com métodos numéricos\*.

Do ponto de vista conceitual, o método da Auto-Calibração é interessante na medida em que mostra que não há diferenças intrínsecas entre as grandezas físicas cujos valores são conhecidos com maior ou menor precisão antes da realização do experimento. Assim, os valores de referência usados na calibração e os valores a serem determinados são considerados de forma equivalente. Além disso, explicita o fato de que as medidas com detectores semicondutores adicionam informações sobre os raios gama utilizados para calibrar os detectores, e que estas informações podem ser obtidas desde que as covariâncias sejam corretamente consideradas em todas as etapas de análise.

### V.2.2 O Método do Ajuste Único

No procedimento que desenvolvemos, chamado de Método do Ajuste Único (MAU), a auto-calibração é efetuada em uma única etapa, aproveitando-se o fato de

---

Um destes artifícios consiste em adicionar na diagonal da matriz de covariância dos dados uma pequena constante positiva para evitar a singularidade da matriz. Esta constante é reduzida até que não produza mais alterações apreciáveis (por exemplo, variação de valor inferior a 0,1% da incerteza) nos resultados do ajuste - parâmetros e respectiva matriz de covariância. Para maiores detalhes ver referências 11, 79 e 80.

que em um ajuste pelo MMQ os parâmetros são obtidos pela completa consideração das covariâncias fornecidas e das relações lineares estabelecidas pelo detector.

Neste método, ao invés de combinar as informações referentes ao equipamento, equação (61), com as referentes ao conhecimento prévio, equação (62), considera-se ambas as informações em equações separadas no ajuste.

Assim, as informações referentes ao equipamento para todos os raios gama observados podem ser representadas pela equação matricial (generalização da equação (61)):

$$\vec{0} = -\vec{E}^0 + \mathbf{P} \cdot \vec{C}^0 + \vec{\varepsilon}_{PC} \quad (65)$$

onde o vetor  $\vec{0}$  é um vetor de zeros de comprimento igual ao número de raios gamas observados. As informações referentes ao conhecimento prévio de todos os raios

gama observados,  $\vec{R} = \begin{pmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_M \end{pmatrix}$ , formam a seguinte equação matricial

$$\vec{R} = \vec{E}^0 + \vec{\varepsilon}_R, \quad (66)$$

que, por sua vez, é uma generalização da equação (62).

Agrupando as equações (65) e (66) em uma só equação matricial obtemos a equação do modelo linear do Método do Ajuste Único,

$$\begin{pmatrix} \vec{0} \\ \vec{R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mathbf{I} & \mathbf{P} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0}' \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{E}^0 \\ \vec{C}^0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \vec{\varepsilon}_{PC} \\ \vec{\varepsilon}_R \end{pmatrix}, \quad (67)$$

onde  $\mathbf{I}$  é uma matriz identidade e  $\mathbf{0}'$  é uma matriz retangular composta de zeros.

Assim, por analogia com a equação (7) obtemos o vetor de parâmetros  $\vec{Y}_{MAU} = \begin{pmatrix} \vec{0} \\ \vec{R} \end{pmatrix}$ ,

com matriz de covariância  $\mathbf{V}_{Y_{MAU}} = \begin{pmatrix} \mathbf{V}_{PC} & \mathbf{0}' \\ \mathbf{0}' & \mathbf{V}_R \end{pmatrix}$  e matriz de planejamento

$$\mathbf{X}_{MAU} = \begin{pmatrix} -\mathbf{I} & \mathbf{P} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0}' \end{pmatrix}.$$

Os parâmetros a serem determinados no ajuste são  $\bar{\mathbf{A}}_{MAU}^0 = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{E}}^0 \\ \bar{\mathbf{C}}^0 \end{pmatrix}$  e podem ser

obtidos pela equação (8), com matriz de covariâncias obtida por (9).

A equação do modelo linear do ajuste do Método do Ajuste Único constituída por qualquer par de equações dentre as equações (61), (62) e (63) fornecerá os mesmos resultados (parâmetros e respectiva matriz de covariância). Assim são equivalentes todas as formas apresentadas no Quadro V-1.

**Quadro V-1- Diferentes opções de escrever o modelo linear do ajuste pelo Método do Ajuste Único.**

Modo	Equação do modelo linear do ajuste	Matriz de covariância dos dados	Relações consideradas
{1}	$\begin{pmatrix} \bar{\mathbf{0}} \\ \bar{\mathbf{R}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mathbf{I} & \mathbf{P} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0}' \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{E}}^0 \\ \bar{\mathbf{C}}^0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{\varepsilon}_{PC} \\ \bar{\varepsilon}_R \end{pmatrix}$	$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \mathbf{V}_{PC} & \mathbf{0}' \\ \mathbf{0}' & \mathbf{V}_R \end{pmatrix}$	Equipamento (61) e Referências (62)
{2}	$\begin{pmatrix} \bar{\mathbf{0}} \\ \bar{\mathbf{R}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mathbf{I} & \mathbf{P} \\ \mathbf{0}' & \mathbf{P} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{E}}^0 \\ \bar{\mathbf{C}}^0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{\varepsilon}_{PC} \\ \bar{\varepsilon}_R + \bar{\varepsilon}_{PC} \end{pmatrix}$	$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \mathbf{V}_{PC} & \mathbf{V}_{PC} \\ \mathbf{V}_{PC} & \mathbf{V}_R + \mathbf{V}_{PC} \end{pmatrix}$	Equipamento (61) e Calibração (63)
{3}	$\begin{pmatrix} \bar{\mathbf{R}} \\ \bar{\mathbf{R}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0}' \\ \mathbf{0}' & \mathbf{P} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{E}}^0 \\ \bar{\mathbf{C}}^0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{\varepsilon}_R \\ \bar{\varepsilon}_R + \bar{\varepsilon}_{PC} \end{pmatrix}$	$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \mathbf{V}_R & \mathbf{V}_R \\ \mathbf{V}_R & \mathbf{V}_R + \mathbf{V}_{PC} \end{pmatrix}$	Referências (62) e Calibração (63)

Embora todos os três modos, {1}, {2} e {3} resultem nos mesmos parâmetros, neste trabalho optamos por utilizar o modo {1} por separar as relações obtidas pelas novas informações experimentais das conhecidas a priori. Com isso, este modo possibilita a consideração dos casos em que o conjunto dos raios gama observados no experimento e o dos conhecidos a priori possuam alguns elementos diferentes.

No caso típico de espectroscopia gama com raios gama padrões de calibração de energia, apenas uma parte de todos os raios gama padrões são observados no experimento. Usando o Método do Ajuste Único é possível obter a atualização de todo o conjunto de padrões em decorrência das novas informações experimentais obtidas para os gamas observados, ou seja, a medida de um novo valor para uma grandeza altera os valores adotados, as variâncias e covariâncias de todas as outras grandezas correlacionadas com aquela que foi medida. Esta situação é exemplificada na seção V.3.

É importante salientar que os resultados obtidos com o uso do ajuste pelo Método do Ajuste Único coincidem exatamente com os obtidos pelo Método da Auto-Calibração. Porém, no MAU não há matriz de covariância singular e o procedimento de calibração, interpolação e atualização do conjunto de padrões é efetuado em uma única etapa.

### **V.3 Exemplo da utilização do Método do Ajuste Único**

Para ilustrar os efeitos da utilização do Método do Ajuste Único na análise de informações experimentais sobre padrões, analisamos os dados experimentais de uma medida de energias de raios gama usados como padrões de calibração realizada no Laboratório do Acelerador Linear por Pauliquevis-Júnior como parte de seu mestrado<sup>[11]</sup>. Utilizamos como valores de referência as energias gama consistentes com as constantes fundamentais de 2002, determinadas neste trabalho.

Os dados experimentais obtidos por Pauliquevis-Júnior estão apresentados na Tabela V-1 e correspondem às posições em canais dos fotópicos das transições gama observadas no experimento, que foram obtidas em uma única medida usando um detector semicondutor de Ge. As fontes utilizadas, mantidas juntas a cerca de 20cm do detector, foram o  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{192}\text{Ir}$ . Devido ao tempo de duração da medida, 96 horas, foi utilizado um procedimento de relocação<sup>[11, 82, 81]</sup> para reduzir o

efeito das instabilidades eletrônicas do sistema que provocavam pequenas variações nos parâmetros da curva de calibração.

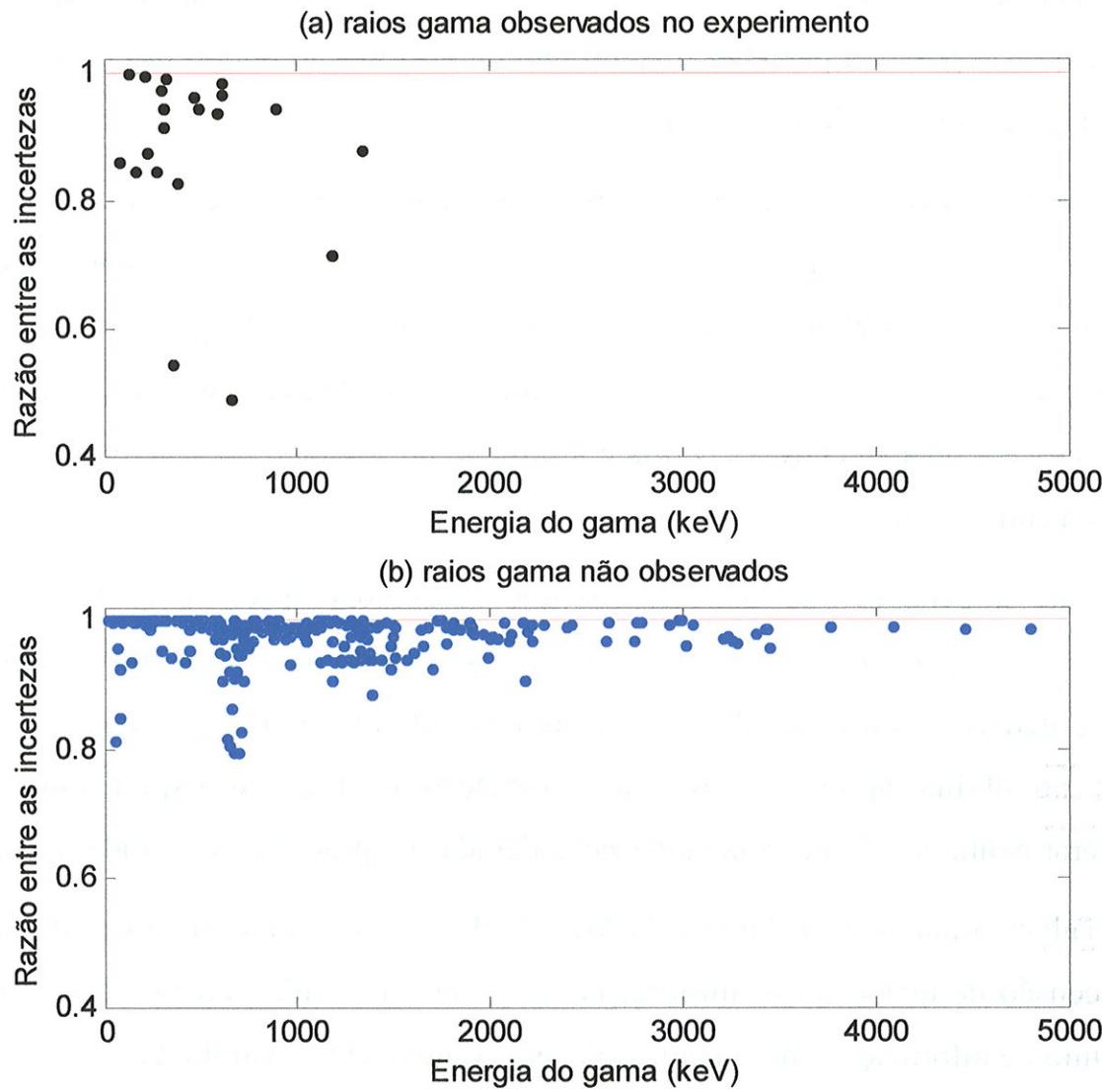
**Tabela V-1 - Posições dos fotópicos observados na medida de Pauliquevis-Júnior<sup>[11]</sup>.**

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama (keV)</i>	<i>Posição P (canais)</i>
$^{133}\text{Ba}$	80	190,256 (5)
$^{57}\text{Co}$	122	297,541 (53)
$^{133}\text{Ba}$	160	398,292 (63)
$^{192}\text{Ir}$	205	516,345 (6)
$^{133}\text{Ba}$	223	561,878 (48)
$^{133}\text{Ba}$	276	700,830 (6)
$^{192}\text{Ir}$	295	751,930 (1)
$^{133}\text{Ba}$	302	769,948 (9)
$^{192}\text{Ir}$	308	784,588 (1)
$^{192}\text{Ir}$	316	805,624 (4)
$^{133}\text{Ba}$	356	908,859 (1)
$^{133}\text{Ba}$	383	981,587 (5)
$^{192}\text{Ir}$	468	1201,673 (1)
$^{192}\text{Ir}$	484	1244,807 (3)
$^{192}\text{Ir}$	588	1516,609 (3)
$^{192}\text{Ir}$	604	1557,977 (1)
$^{192}\text{Ir}$	612	1579,014 (2)
$^{137}\text{Cs}$	661	1707,587 (1)
$^{192}\text{Ir}$	884	2290,149 (24)
$^{60}\text{Co}$	1173	3044,818 (3)
$^{60}\text{Co}$	1332	3461,294 (3)

Usando as posições dos fotópicos mostrados na Tabela V-1 e as energias dos raios gama de referência com respectiva matriz de covariância obtidas no Capítulo IV (fornecidas no CD-ROM anexado a este trabalho), utilizamos o Método do Ajuste Único no modo {1}, equação (67), para determinar, em uma única etapa, a curva de calibração do detector\* e os novos valores atualizados de todos os padrões de calibração gama.

A Figura V.1 apresenta a razão entre as incertezas das energias gama do conjunto de padrões antes e depois da realização do experimento em função da energia do raio gama, distinguindo aqueles diretamente observados.

\* Foi utilizado um polinômio de grau 3 para a relação entre a energia e a posição do fotópico<sup>[11]</sup>.



*Razão entre as incertezas das energias dos padrões de calibração gama após o experimento com relação ao conhecimento prévio.*  
 (a) *Raios gama que foram observados no experimento.*  
 (b) *Outros raios gama do conjunto de padrões.*

**Figura V.1 - Alterações das incertezas das energias gama dos padrões por causa do experimento considerado.**

Analizando a Figura V.1 percebemos que, embora as maiores variações relativas das incertezas tenham ocorrido nos raios gama observados no experimento, há um grande número de raios gama que apresentaram reduções importantes de incerteza que sequer foram observados no experimento, mas que são correlacionados com os gamas observados.

Este exemplo de aplicação do Método do Ajuste Único a um conjunto de padrões de calibração que tem suas correlações conhecidas ilustra a importância da

correta consideração das covariâncias ao longo de todas as etapas da análise, sem as quais não seria possível perceber o acréscimo de informação obtido nas energias dos raios gama não observados no experimento.

Também fica claro, com este exemplo, que as informações experimentais obtidas em uma medida de espectroscopia gama são as posições dos fotópicos e não as energias dos raios gama de interesse. É interessante perceber que o acréscimo de informação sobre as energias dos raios gama é promovida pelo fato de que a função que descreve a relação entre a energia e a posição do fotópico no sistema utilizado é (suposta) conhecida.

Vale a pena atentar para o fato que estas conclusões sobre medidas de espectroscopia gama são gerais, independendo do método de análise empregado para tratar os dados. A utilização de um procedimento de auto-calibração como o MAU apenas possibilita aproveitar toda a informação contida no experimento, sem considerar nenhuma hipótese além das consideradas no procedimento tradicional.

Talvez a maior contribuição do Método do Ajuste Único seja a de auxiliar na compreensão de quais são as informações experimentais relevantes e da origem do acréscimo de informação em uma medida com equipamentos calibráveis.

# Capítulo VI. O esquema de decaimento do $^{229}\text{Th}$ e a energia do primeiro estado excitado

O primeiro nível nuclear excitado do  $^{229}\text{Th}$  tem energia comparável com a energia de ligação dos elétrons menos ligados do Th ( $\sim 5,9\text{eV}$ )<sup>[23]</sup>. Embora a existência deste nível nuclear tenha sido prevista por Kroger e Reich<sup>[110]</sup> em 1976, sua energia de excitação só foi determinada com incerteza inferior ao próprio valor por Helmer e Reich<sup>[13]</sup> em 1994, que obtiveram para a energia deste estado o valor de  $\Delta=(3,5\pm1,0)\text{ eV}$ .

O conhecimento do valor da energia para este estado é necessário tanto para aplicações quanto para a pesquisa básica. Porém, como a transição eletromagnética entre este nível excitado, de spin e paridade  $\frac{3}{2}^+$ , e o estado fundamental  $\frac{5}{2}^+$  do  $^{229}\text{Th}$  não foi diretamente observada<sup>[25, 24]</sup>, a determinação da energia deste primeiro nível excitado depende da determinação precisa das energias de outros raios gama emitidos pelo  $^{229}\text{Th}$  e do uso de relações entre as energias dos níveis nucleares e dos raios gama, baseadas no esquema de decaimento do  $^{229}\text{Th}$ .

A seguir detalhamos o procedimento utilizado para determinar a energia dos níveis nucleares do  $^{229}\text{Th}$  usando as informações experimentais de medidas precisas de energia destas transições efetuadas por Reich e Helmer<sup>[13, 109]</sup>, juntamente com as energias dos raios gama padrões compatíveis com as constantes fundamentais de 2002, determinadas neste trabalho. O objetivo desta análise é o de avaliar a adequação de três diferentes modelos nucleares para o  $^{229}\text{Th}$ <sup>[13, 26 e 27]</sup>, bem como

determinar a energia de excitação do primeiro nível excitado do  $^{229}\text{Th}$  segundo cada uma daqueles modelos.

Utilizaremos nesta análise o mesmo procedimento de ajuste que empregamos para a determinação dos padrões de energia de raios gama, pois ele fornece tanto as energias dos raios gama como a dos níveis nucleares envolvidos nas relações baseadas nos esquemas de decaimento.

### ***VI.1 Medidas precisas de energias de raios gama emitidos pelo $^{229}\text{Th}$***

Quando a existência daquele estado nuclear  $\frac{3}{2}^+$  do  $^{229}\text{Th}$  foi inferida por Kroger e Reich, a sua energia de excitação,  $\Delta$ , pode apenas ser determinada como sendo inferior a 100 eV<sup>[110]</sup>. Em 1984, usando uma fonte de  $^{233}\text{U}$  (que decai pela emissão de um  $\alpha$  para o  $^{229}\text{Th}$ ), Reich e colaboradores<sup>[109]</sup> publicaram os resultados de uma primeira medida precisa das energias dos raios gama do decaimento  $\alpha$  do  $^{233}\text{U}$  (e portanto, emitidos pelo  $^{229}\text{Th}$ ) utilizando detectores semicondutores, com o procedimento de determinações de diferenças de energia. Com os dados desta primeira medida<sup>[109]</sup>, a energia deste nível foi determinada em 1990<sup>[12]</sup> como sendo  $(-1 \pm 4)$  eV, considerando uma determinada hipótese sobre o esquema de decaimento para o  $^{229}\text{Th}$ .

Uma segunda determinação, envolvendo um número maior de raios gama do  $^{233}\text{U}$ , foi publicada por Helmer e Reich<sup>[13]</sup> em 1994, também utilizando medidas de diferença de energia entre raios gama observados em detectores semicondutores, obtendo  $\Delta = (3,5 \pm 1,0)$  eV.

A Tabela VI-1 apresenta as informações sobre os raios gama do  $^{233}\text{U}$  (segundo a nomenclatura adotada neste trabalho, ou seja raios gama emitidos pelo  $^{229}\text{Th}$  que seguem o decaimento  $\alpha$  do  $^{233}\text{U}$ ), conforme foram obtidas naquelas duas medidas. Esta tabela informa, na terceira coluna, como dado primário, a diferença de energia determinada entre um raio gama do  $^{233}\text{U}$  (relacionado na 1<sup>a</sup> coluna) e o de uma fonte

de calibração ou outro gama associado ao decaimento do próprio  $^{233}\text{U}$  (2<sup>a</sup> coluna), dando a origem da qual a informação foi extraída na última coluna. Estes serão os dados a serem considerados na análise a seguir.

Tabela VI-1 - Dados experimentais considerados na análise

Gama 1 do $^{233}\text{U}$ (keV)	Gama 2 (Nuclídeo 2) (keV)	Dif. Energia $d$ (keV)	$\sigma_d$ (eV)	Origem	Gama 1 do $^{233}\text{U}$ (keV)	Gama 2 (Nuclídeo 2) (keV)	Dif. Energia $d$ (keV)	$\sigma_d$ (eV)	Origem	
25	23 (172-Hf)	1,3771	1,6	[B]	83	84 (170-Tm)	-1,2423	2,0	[B]	
	26 (241-Am)	-1,027	4	[C]		89 <sup>b)</sup> (233-U)	-6,994	30	[C]	
	26 (241-Am)	-1,034	0,9	[B]	85	84 (170-Tm)	1,1673	1,7	[B]	
	29 (233-U)	-3,8947	11,9	[A]	88	84 (170-Tm)	4,2195	1,4	[B]	
	29 (233-U)	-3,8738	1,3	[A]	89 <sup>b)</sup>	84 (182-Ta)	5,270	2	[C]	
	29 (233-U)	-3,8691	0,3	[A]		84 (170-Tm)	5,6995	0,5	[B]	
	29 (233-U)	-3,876	1,1	[A]		84 (182-Ta)	5,2785	1,0	[B]	
29	23 (172-Hf)	5,2489	0,9	[B]		93 (233-U)	-3,3924	0,3	[B]	
	26 (241-Am)	2,847	1	[C]	93 <sup>b)</sup>	97 (233-U)	-3,7842	0,1	[B]	
	26 (241-Am)	2,8397	0,4	[B]		100 (182-Ta)	-6,758	1	[C]	
	31 (182-Ta)	-2,5482	1,0	[B]	96	97 (233-U)	-0,890	2	[C]	
42 <sup>a)</sup>	31 (182-Ta)	10,7181	0,9	[B]	97	100 (182-Ta)	-2,973	1	[C]	
	46 (210-Pb)	-4,071	2	[C]		100 (182-Ta)	-2,9721	0,2	[B]	
	46 (210-Pb)	-4,0862	0,6	[B]	105 <sup>b)</sup>	100 (182-Ta)	5,515	2	[C]	
	48 (161-Tb)	-6,4642	0,4	[B]	117	113 (182-Ta)	3,4905	1,2	[B]	
	54 (233-U)	-12,251	0,4	[B]		118 (233-U)	-1,809	1	[C]	
53	46 (210-Pb)	7,0708	1,2	[B]		118 (233-U)	-1,8127	1,6	[A]	
	54 (233-U)	-1,091	1	[C]		118 (233-U)	-1,8101	2,6	[A]	
	54 (233-U)	-1,0927	0,3	[B]		118 (233-U)	-1,8094	0,4	[A]	
54	46 (210-Pb)	8,164	0,5	[B]		118 (233-U)	-1,8089	0,2	[A]	
	48 (161-Tb)	5,789	0,3	[B]		118 (233-U)	-1,8107	2,0	[A]	
	59 (241-Am)	-4,838	1	[C]	118	113 (182-Ta)	5,295	2	[C]	
	59 (241-Am)	-4,8374	0,2	[B]		113 (182-Ta)	5,2973	1,2	[B]	
	63 (169-Yb)	-8,4202	0,7	[B]		120 (233-U)	-1,847	1	[C]	
66	59 (241-Am)	6,5777	0,6	[B]		120 (233-U)	-1,8464	0,2	[B]	
	63 (169-Yb)	2,9968	0,8	[B]	120	113 (182-Ta)	7,144	1	[C]	
	70 (233-U)	-4,158	3	[C]		130 (169-Yb)	-9,7036	1,3	[B]	
67	59 (241-Am)	8,4048	1,2	[B]		135 (233-U)	-14,5202	0,6	[B]	
	63 (169-Yb)	4,8252	1,0	[B]	123	113 (182-Ta)	10,220	5	[C]	
	66 (233-U)	1,821	4	[C]		120 (233-U)	3,0663	0,4	[B]	
	66 (233-U)	1,8276	0,4	[B]		130 (169-Yb)	-6,637	1,3	[B]	
	71 (233-U)	-3,8702	0,7	[A]	135	130 (169-Yb)	4,8156	0,5	[B]	
	71 (233-U)	-3,8679	0,4	[A]	139	130 (169-Yb)	9,2135	5,0	[B]	
	71 (233-U)	-3,8612	2,4	[A]		135 (233-U)	4,3863	2,3	[B]	
70	63 (169-Yb)	7,1614	1,6	[B]	145	146 (233-U)	-1,006	2	[C]	
	71 (233-U)	-1,539	3	[C]		152 (182-Ta)	-7,097	6	[C]	
	71 (233-U)	-1,5362	0,6	[B]	146	130 (169-Yb)	15,8228	2,5	[B]	
71	59 (241-Am)	12,2719	1,0	[B]		148 (233-U)	-1,8145	1,0	[A]	
	63 (169-Yb)	8,6947	0,4	[B]		148 (233-U)	-1,8119	0,8	[A]	
	67 (182-Ta)	4,072	3	[C]		152 (182-Ta)	-6,086	2	[C]	
	69 (153-Gd)	2,141	3	[C]		152 (182-Ta)	-6,0848	0,7	[B]	
	74	74 (161-Tb)	-2,7492	0,6	[B]		156 (182-Ta)	-10,041	0,8	[B]
	84 (182-Ta)	-12,859	3	[C]	148	146 (233-U)	1,811	8	[C]	
74	71 (233-U)	2,7242	0,3	[B]		152 (182-Ta)	12,0932	0,8	[B]	
	76 (233-U)	-1,8099	0,8	[B]		156 (182-Ta)	8,134	2	[C]	
	84 (182-Ta)	-10,1273	2,4	[B]		156 (182-Ta)	8,1372	0,9	[B]	
	84 (170-Tm)	-9,7172	0,6	[B]		177 (169-Yb)	-12,6905	1,0	[B]	
76	84 (182-Ta)	-8,3218	4,9	[B]		179 (182-Ta)	-14,8711	0,9	[B]	
	84 (170-Tm)	-7,9053	1,6	[B]						

Gama 1 do $^{233}\text{U}$ (keV)	Gama 2 (Nuclídeo 2) (keV)	Dif. Energia d (keV)	$\sigma_d$ (eV)	Origem
169	177 (169-Yb)	-8,2123	5,4	[B]
170	177 (169-Yb)	-6,4049	2,4	[B]
174	177 (169-Yb)	-3,0221	2,0	[B]
187	177 (169-Yb)	10,7538	0,6	[B]
	179 (182-Ta)	8,576	2	[C]
	179 (182-Ta)	8,5716	0,7	[B]
	197 (169-Yb)	-9,9913	0,5	[B]
	198 (182-Ta)	-10,385	3	[C]
	198 (182-Ta)	-10,3865	0,8	[B]
193	197 (169-Yb)	-4,4549	4,7	[B]
208	197 (169-Yb)	10,2221	0,6	[B]
	198 (182-Ta)	9,818	2	[C]
	198 (182-Ta)	9,8253	1,0	[B]
	222 (182-Ta)	-13,9366	5,4	[B]
217	208 (233-U)	8,9754	0,8	[B]
	222 (182-Ta)	-4,951	2	[C]
	222 (182-Ta)	-4,9583	1,5	[B]
	229 (182-Ta)	-12,1734	1,0	[B]
240	229 (182-Ta)	11,0473	3,0	[B]
	245 (233-U)	-4,9769	1,4	[B]
245	229 (182-Ta)	16,023	2	[C]
	229 (182-Ta)	16,0249	4,0	[B]
	248 (233-U)	-3,3742	0,7	[B]
248	264 (182-Ta)	-15,350	6	[C]
	264 (182-Ta)	-15,3513	1,0	[B]

Gama 1 do $^{233}\text{U}$ (keV)	Gama 2 (Nuclídeo 2) (keV)	Dif. Energia d (keV)	$\sigma_d$ (eV)	Origem
261	264 (182-Ta)	-2,1178	3,9	[B]
268	264 (182-Ta)	4,5992	2,1	[B]
274	264 (182-Ta)	10,652	10	[C]
	264 (182-Ta)	10,658	1,4	[B]
	278 (233-U)	-3,3718	1,3	[B]
278	264 (182-Ta)	14,035	8	[C]
	264 (182-Ta)	14,0326	1,1	[B]
	291 (233-U)	-13,2483	1,4	[B]
288	278 (233-U)	9,9209	0,9	[B]
	291 (233-U)	-3,3267	1,0	[B]
	295 (192-Ir)	-7,925	5	[C]
291	295 (192-Ir)	-4,604	4	[C]
	307 (169-Yb)	-16,3815	0,9	[B]
293	307 (169-Yb)	-13,7428	9,3	[B]
302	307 (169-Yb)	-4,7471	4,4	[B]
317	307 (169-Yb)	9,4318	1,1	[B]
	344 (152-Eu)	-27,1168	2,8	[B]
320	307 (169-Yb)	12,8102	1,1	[B]
	308 (192-Ir)	12,084	5	[C]
	317 (233-U)	3,3782	0,4	[B]
	344 (152-Eu)	-23,741	2,8	[B]
323	320 (233-U)	2,8337	0,9	[B]
	344 (152-Eu)	-20,9013	2,7	[B]
336	323 (233-U)	13,24	1,3	[B]
	344 (152-Eu)	-7,6639	1,9	[B]
365	344 (152-Eu)	21,5394	2,9	[B]
367	344 (152-Eu)	23,5095	9,5	[B]
	365 (233-U)	1,9809	11,7	[B]

(a) Dublet

(b) Raio-X do Th

[A] – Dados da Tabela III da referência 13.

[B] – Dados da Tabela IV da referência 13.

[C] – Dados da referência 109.

A principal dificuldade no tratamento destes dados está relacionada ao fato de que as incertezas inicialmente avaliadas terem sido muito subestimadas. Nos trabalhos das referências 109 e 13 foi empregado o procedimento de resolver localmente as incompatibilidades detectadas (multiplicação da incerteza da média ponderada pela raiz quadrada do qui-quadrado reduzido,  $\chi^2_R$ , todas as vezes que o  $\chi^2_R$  era maior que 1,0).

Como apontado nas Seções III.1 e III.8.1, uma análise global dos dados possibilita uma melhor estimativa da correção a ser aplicada em todas as incertezas avaliadas, uma vez que, em especial no caso sob análise, o procedimento experimental e a metodologia para avaliação das incertezas foram iguais e, portanto, os problemas destas análises devam ser equivalentes para todos os resultados obtidos. Por este motivo, inicialmente consideramos as incertezas originais do modo como

foram avaliadas, portanto antes das correções locais, para decidir sobre a necessidade de correções nas incertezas, que, então, serão aplicadas a todos os dados.

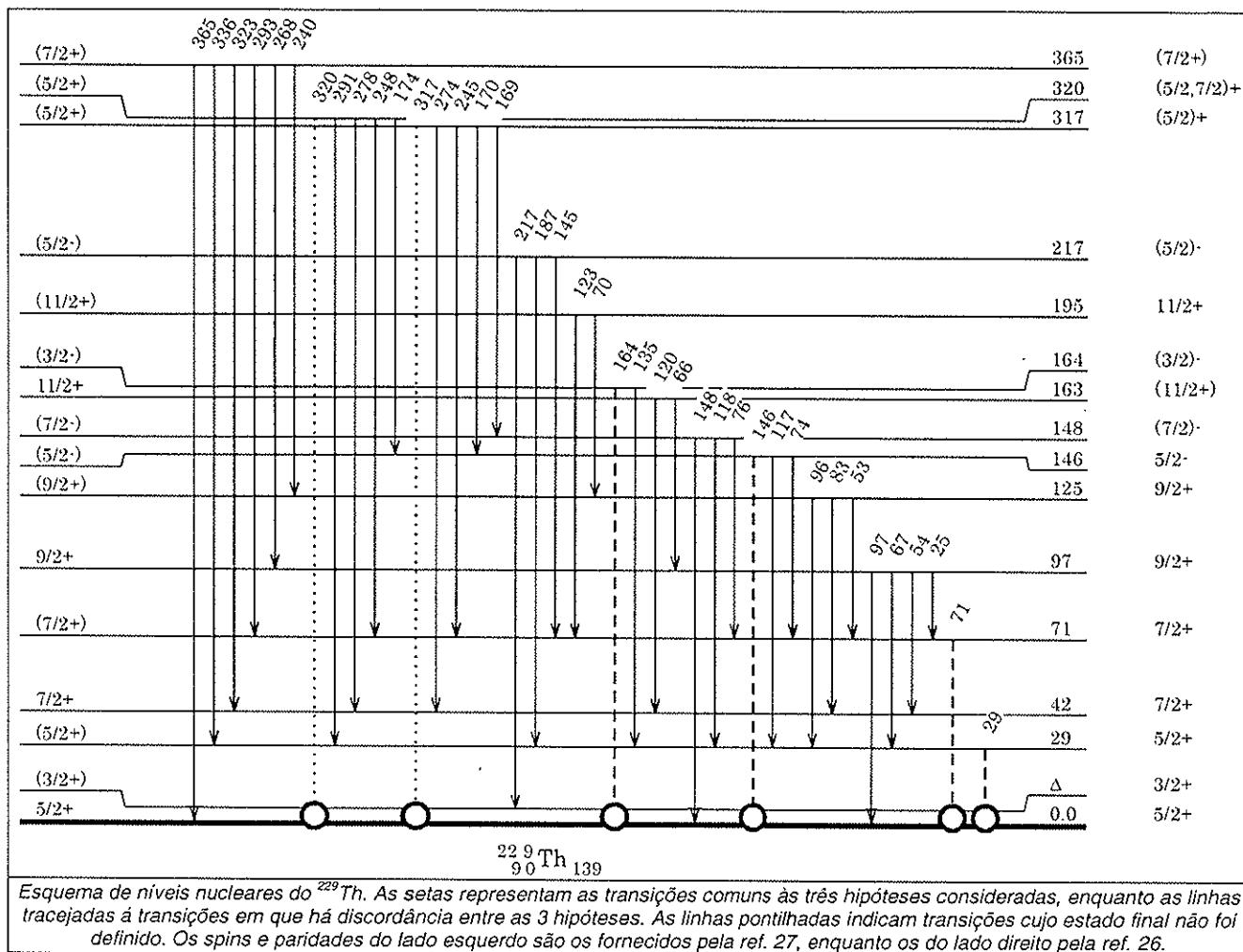
## ***VI.2 O esquema de decaimento do $^{229}\text{Th}$***

Trabalhos recentes (2002 e 2003) sobre a estrutura nuclear do  $^{229}\text{Th}$  levantam novas possibilidades para o seu esquema de decaimento que podem implicar em diferenças para a energia do primeiro nível excitado.

Consideramos três propostas de esquema de decaimento para o  $^{229}\text{Th}$ :

- a que foi apresentada na 8<sup>a</sup> edição da Tabela de Isótopos<sup>[11]</sup> (a qual é consistente com a utilizada por Reich e Helmer<sup>[12, 13]</sup> nas análises dos dois experimentos), denominada de Hipótese A;
- a Hipótese B, que corresponde ao esquema proposto por Barci e colaboradores<sup>[27]</sup>;
- e a que foi considerada por Gulda e colaboradores<sup>[26]</sup>, Hipótese C.

A Figura VI.1 e a Tabela VI-2 mostram as diferenças relevantes entre as três hipóteses em relação ao posicionamento do nível nuclear final de algumas transições, quanto a ser o primeiro nível excitado ou o estado fundamental. Na Figura VI.1 estão salientadas, como linhas contínuas, aquelas transições cujos posicionamentos não apresentam divergências entre as três hipóteses consideradas, correspondendo às linhas tracejadas àquelas cujo estado final não é o mesmo segundo os três modelos. As linhas pontilhadas correspondem a duas transições cujo estado final não é indicado com segurança por alguma das três hipóteses.

Figura VI.1 - Esquema de decaimento gama do  $^{229}\text{Th}$ .Tabela VI-2 - Estados finais de transições gama do  $^{229}\text{Th}$  segundo as hipóteses consideradas.

Raio gama (keV)	Nível Inicial (keV)	Nível final hipótese A <sup>(111)</sup>	Nível final hipótese B <sup>(27)</sup>	Nível final hipótese C <sup>(26)</sup>
29	29	1º N.	1º N. 75% E. F. 25%	1º N.
71	71	1º N.	1º N. 60% E. F. 40%	1º N.
146	146	1º N.	1º N.	E. F.
164	164	1º N.	1º N.	1º N. 88% E. F. 12%

E. F. – Estado fundamental.

1º N. – Primeiro nível nuclear excitado.

Observando a Tabela VI-2, vemos que as diferenças entre as hipóteses A, B e C envolvem os raios gama de 29 keV, 71 keV, 146 keV e 164 keV e estão relacionadas com as probabilidades de que o estado final destas transições gama seja o primeiro nível excitado ou o estado fundamental.

### **VI.3 Primeiro passo: utilização da parte comum das hipóteses consideradas**

Utilizando a parte comum entre as hipóteses A, B e C consideradas, podemos determinar a energia dos raios gama correspondentes que conectam níveis nucleares excitados do  $^{229}\text{Th}$ . Neste primeiro passo foram considerados 178 dados (150 diferenças de energia e 28 energias de padrões gama). Assim, foi possível avaliar o fator de correção a ser aplicado a todas as incertezas dos dados experimentais da Tabela VI-1.

As diferenças de energia entre raios gama apresentadas na Tabela VI-1,  $d$ , foram atualizadas para a escala de energia consistente com as constantes fundamentais de 2002, usando o fato de que o fator de proporcionalidade relacionado às constantes fundamentais comum a todas as energias gama,  $f$ , considerado nestas

medidas foi  $f_{\text{Th}} = \frac{E_{\lambda 73}}{a_{SiNBS80}^{\#}} = 2,282\,904\,8(59)\text{keV}$ , que deve ser atualizado para

$f_{2002} = 2,282\,889\,89(23)\text{keV}$ . Assim, multiplicando os valores  $d$  pela razão  $\frac{f_{2002}}{f_{\text{Th}}}$  (correspondendo a uma redução relativa de  $6,5 \cdot 10^{-6}$ ) obtivemos estas diferenças de energia atualizadas\* para  $f_{2002}$ , que identificaremos por  $D$ .

Usando a mesma abordagem que empregamos no tratamento dos dados dos padrões gama, os dados de diferenças de energia entre os raios gama atualizadas ( $D_{ik}$ ) foram relacionados com os valores verdadeiros das energias dos gama correspondentes ( $E_i^0$  e  $E_k^0$ ) através de

$$D_{ik} = E_i^0 - E_k^0 + \varepsilon_{D_{ik}} \quad (68)$$

---

\* Embora os efeitos de cada uma destas correções seja muito menor que as incertezas de cada um dos dados  $d$  (apresentados na Tabela VI-1) ela é importante para preservar a auto-consistência.

onde a relação entre os erros ( $\varepsilon_{D_{ik}}$ ) e as incertezas experimentais apresentadas na Tabela VI-1 é, como usual, dada por  $\langle (\varepsilon_{D_{ik}})^2 \rangle = \sigma_{D_{ik}}^2$ .

As energias de referência, obtidas neste trabalho, relacionam-se com os valores verdadeiros das energias dos correspondentes raios gama por

$$R_i = E_i^0 + \varepsilon_{R_i} \quad (69)$$

que é equivalente a equação (62) utilizada no Método do Ajuste Único. A relação entre os erros (desconhecidos) e a matriz de covariância das energias dos padrões gama é  $\langle \vec{\varepsilon}_R \cdot \vec{\varepsilon}_R^T \rangle = V_R$ . As relações baseadas nos esquemas de decaimento do  $^{229}\text{Th}$  foram incorporadas no ajuste através de

$$K_i = N_{I_i}^0 - N_{F_i}^0 - E_i^0 + \varepsilon_{K_i} \quad (70)$$

onde  $K_i = \frac{(E_i)^2}{2M \cdot c^2}$  é a energia de recuo do núcleo de  $^{229}\text{Th}$  (de massa  $M$ ) ao emitir o gama de energia  $E_i$ . Os erros das energias de recuo estão relacionados com as incertezas de recuo, dadas pela equação (27), por meio de  $\langle (\varepsilon_{K_i})^2 \rangle = \sigma_{K_i}^2$ . No ajuste utilizamos como incerteza relativa nas energias de recuo o valor  $5 \cdot 10^{-5}$ , que faz com que as relações baseadas nos esquemas de decaimento sejam, na prática, equivalentes a vínculos (ver Seção III.7).

Assim, como o qui-quadrado obtido com as incertezas originais nesta primeira etapa foi 886 para 116 graus de liberdade, as incertezas de todos os dados da Tabela VI-1 foram multiplicadas por  $\sim 2,8$  (que é a raiz do qui-quadrado reduzido), e o ajuste foi, então, refeito com as incertezas alteradas\*.

---

\* Utilizamos nesta análise exatamente o mesmo procedimento que empregamos na determinação das energias dos raios gama padrões para calibração (ver Seções III.1 e III.2).

O ajuste com as incertezas re-escalonadas forneceu as energias dos raios gama do  $^{233}\text{U}$  e dos níveis nucleares do  $^{229}\text{Th}$  apresentados na Tabela VI-3. Estes dados são todos correlacionados entre si, havendo correlações importantes, tanto entre pares de energias de raios gama (p. ex.  $\rho(\gamma_{117}, \gamma_{118}) = 0,86$  e  $\rho(\gamma_{169}, \gamma_{170}) = 0,97$ ), quanto entre pares de energias de níveis nucleares (p. ex:  $\rho(n_{146}, n_{148}) = 0,87$  e  $\rho(n_{29}, n_{217}) = 0,71$ ), e, ainda, quanto entre energias de raios gama e energias de níveis nucleares (p. ex:  $\rho(\gamma_{274}, n_{317}) = 0,93$  e  $\rho(\gamma_{25}, n_{71}) = -0,84$  ).

**Tabela VI-3 - Energias dos raios gama e dos níveis obtidos no primeiro passo.**

<i>Tipo de parâmetro<sup>(a)</sup></i>	<i>Identificação (keV)</i>	<i>Energia (keV)</i>	<i>Tipo de parâmetro<sup>(a)</sup></i>	<i>Identificação (keV)</i>	<i>Energia (keV)</i>
<i>dubletos do <math>^{233}\text{U}</math></i>	25	25,3162 (8)	<i>nível do <math>^{229}\text{Th}</math></i>	248	248,7227 (15)
	29	29,1856 (8)		261	261,956 (11)
	42	42,4524 (7)		268	268,6716 (20)
	53	53,6110 (8)		274	274,7356 (17)
	54	54,7033 (4)		278	278,1098 (14)
	66	66,1175 (7)		288	288,0282 (23)
	67	67,9451 (7)		291	291,3516 (14)
	70	70,2766 (11)		293	293,9878 (21)
	71	71,8138 (6)		302	302,989 (12)
	74	74,5368 (7)		317	317,1652 (19)
<i>raio X do Th</i>	76	76,3455 (8)		320	320,5431 (18)
	83	82,9981 (13)		323	323,3748 (20)
	85	85,422 (5)		336	336,6166 (21)
	88	88,474 (4)		365	365,8047 (21)
	89	89,9560 (8)		367	367,786 (21)
	93	93,3489 (6)	<i>nível do <math>^{229}\text{Th}</math></i>	29	29,1881 (9)
	96	96,2399 (12)	<i>nível do <math>^{229}\text{Th}</math></i>	42	42,4299 (6)
	97	97,1332 (5)	<i>nível do <math>^{229}\text{Th}</math></i>	71	71,8170 (9)
	105	105,621 (6)	<i>nível do <math>^{229}\text{Th}</math></i>	97	97,1332 (5)
	117	117,1657 (9)	<i>nível do <math>^{229}\text{Th}</math></i>	125	125,4280 (12)
<i>raio X do Th</i>	118	118,9744 (8)	<i>nível do <math>^{229}\text{Th}</math></i>	146	146,3539 (9)
	120	120,8207 (8)	<i>nível do <math>^{229}\text{Th}</math></i>	148	148,1626 (9)
	123	123,8876 (11)	<i>nível do <math>^{229}\text{Th}</math></i>	163	163,2507 (9)
	135	135,3395 (11)	<i>nível do <math>^{229}\text{Th}</math></i>	164	164,5276 (13)
	139	139,728 (6)	<i>nível do <math>^{229}\text{Th}</math></i>	195	195,7046 (14)
	145	145,3370 (12)	<i>nível do <math>^{229}\text{Th}</math></i>	217	217,1540 (12)
	146	146,3467 (11)	<i>nível do <math>^{229}\text{Th}</math></i>	317	317,1657 (18)
	148	148,1625 (9)	<i>nível do <math>^{229}\text{Th}</math></i>	320	320,5399 (15)
	164	164,5228 (12)	<i>nível do <math>^{229}\text{Th}</math></i>	365	365,8050 (21)
	169	169,0031 (18)			
	170	170,8118 (18)			
	174	174,1860 (15)			
	187	187,9659 (9)			
	193	193,502 (13)			
	208	208,1770 (13)			
	217	217,1509 (17)			
	240	240,3789 (22)			
	245	245,3485 (18)			

(a) Salvo indicação em contrário, raio gama do  $^{233}\text{U}$  (gama emitido pelo  $^{229}\text{Th}$ , que segue o decaimento  $\alpha$  do  $^{233}\text{U}$ ).

## VI.4 Segundo passo: a determinação da energia do primeiro estado excitado, $\Delta$

Como pode ser observado na Figura VI.1, a energia do primeiro nível nuclear excitado do  $^{229}\text{Th}$  e as transições cujo estado final ainda está em discussão podem ser estudadas apenas em termos das diferenças ( $\delta$ ) entre as energias dos níveis nucleares de 29 keV, 71 keV, 146 keV, 164 keV, 217 keV, 317 keV e 320 keV e as correspondentes transições gama para o estado fundamental e/ou o primeiro nível excitado (a energia da transição gama é a soma da energia do raio gama com a correspondente energia de recuo do núcleo e corresponde à diferença entre as energias dos níveis nucleares inicial e final da transição). A Tabela VI-4 apresenta estas diferenças de energia, obtidas no primeiro passo, portanto utilizando apenas as informações comuns das três hipóteses consideradas, juntamente com as correlações correspondentes.

**Tabela VI-4 – Resultados do primeiro passo necessários para a determinação de  $\Delta$  e avaliação do esquema de decaimento do  $^{229}\text{Th}$**

gama (keV)	$\delta$ (eV)	Correlações					
		29	71	146	164	217	317
29	2,5 (12)						
71	3,2 (12)		0,68				
146	7,1 (13)		0,23	0,22			
164	4,8 (18)		0,32	0,23	0,12		
217	3,0 (21)		0,33	0,23	0,08	0,16	
317	0,3 (25)		0,16	0,16	0,07	0,08	0,08
320	-3,5 (23)		0,20	0,19	0,08	0,09	0,09
							0,71

A relação entre cada uma das diferenças de energia,  $\delta_i$ , e a energia do primeiro nível nuclear excitado,  $\Delta$ , pode ser estabelecida em termos da probabilidade ( $\mu_i$ ) de que os raios gama da transição  $i$  tenham como estado final o primeiro nível excitado do  $^{229}\text{Th}$ , resultando na expressão  $\delta_i = \mu_i \cdot \Delta$ .

É importante destacar que estamos usando uma “simplificação de notação” ao considerar uma transição gama para dois possíveis estados finais, pois, na verdade, para cada estado inicial  $i$  há duas transições gama a serem consideradas: uma para o primeiro nível excitado e outra que termina no estado fundamental. A simplificação

é, neste caso, particularmente adequada porque o fotópico dos raios gama correspondentes a estas duas transições não é separável em um detector semicondutor\* e, portanto, o fotópico do raio gama observado apresenta energia média igual à média entre as energias destas duas transições ponderadas por fatores proporcionais a suas respectivas intensidades de emissão de raios gama.

#### VI.4.1 A construção do ajuste: as três hipóteses

A equação do modelo linear do ajuste pelo Método dos Mínimos Quadrados para a determinação da energia do primeiro nível nuclear excitado utilizada no segundo passo é

$$\tilde{\delta} = \mathbf{M} \cdot \Delta^0 + \tilde{\varepsilon}_\delta. \quad (71)$$

Por comparação direta com a equação (7), identificamos o vetor de dados,

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \tilde{\boldsymbol{\delta}} = \begin{pmatrix} \delta_{29} \\ \delta_{71} \\ \delta_{146} \\ \delta_{164} \\ \delta_{217} \end{pmatrix}, \text{ com respectiva matriz de covariância } \mathbf{V}_Y = \mathbf{V}_\delta, \text{ obtidos do primeiro}$$

passo da análise. A matriz de planejamento,  $\mathbf{X} = \mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mu_{29} \\ \mu_{71} \\ \mu_{146} \\ \mu_{164} \\ \mu_{217} \end{pmatrix}$ , dependerá da hipótese

considerada. Os valores das probabilidades  $\mu$  para as transições de 29 keV, 71 keV, 146 keV e 164 keV podem ser obtidas na Tabela VI-2, enquanto que para a transição

---

\* Porque a diferença entre as energias dos raios gama correspondentes a estas duas transições é igual a energia do primeiro nível nuclear excitado, que é da ordem de alguns eV, enquanto a resolução (largura a meia altura dos fotópicos) dos detectores semicondutores na faixa de energia considerada são da ordem de centenas de eV.

de 217 keV a probabilidade correspondente é  $\mu_{217}=1$  para todas as três hipóteses, conforme pode ser observado na Figura VI.1.

O parâmetro,  $\vec{\mathbf{A}}^0 = \Delta^0$ , a ser determinado pelo ajuste é obtido pela equação (8) com variância dada pela equação (9). Usando este formalismo podemos avaliar a adequação de cada uma das hipóteses sobre a estrutura nuclear do  $^{229}\text{Th}$  com o uso do qui-quadrado do ajuste, calculado através da equação (52).

#### **VI.4.1 (i) Hipótese A**

A hipótese **A** corresponde a considerar como matriz de planejamento,

$$\mathbf{X}_A = \mathbf{M}_A = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (72)$$

como pode ser observado na Tabela VI-2. Este ajuste resultou em  $\Delta_A=4,8(9)$  eV com  $\chi^2=9,4$  que para 4 graus de liberdade corresponde a um nível de significância de cerca de 5%.

#### **VI.4.1 (ii) Hipótese B**

Na hipótese **B** a matriz de planejamento é

$$\mathbf{X}_B = \mathbf{M}_B = \begin{pmatrix} 0,75 \\ 0,60 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (73)$$

resultando em  $\Delta_B=5,6(10)$  eV com  $\chi^2=6,1$  correspondendo a um nível de significância de cerca de 20%.

### VI.4.1 (iii) Hipótese C

Quando consideramos a hipótese **C**,

$$\mathbf{X}_C = \mathbf{M}_C = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0,88 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (74)$$

Embora possa parecer estranho um ajuste onde os elementos de uma linha da matriz de planejamento sejam nulos (equivalente a dizer que um dos dados experimentais não é relacionado a nenhum dos parâmetros, tendo portanto este dado valor verdadeiro igual a zero), ela é necessária para refletir corretamente o fato de que, segundo a hipótese **C** a transição de 146 keV tem como estado final apenas o estado fundamental. Como as diferenças de energia são covariântes entre si, o fato do valor previsto para  $\delta_{146}$  pela hipótese **C** ser zero tem como consequência alterações nos valores a serem adotados para as energias de todas as outras diferenças e, portanto, no valor de  $\Delta_C$ .

O ajuste segundo a hipótese **C** resultou em  $\Delta_C = 1,8(10)$  eV com  $\chi^2 = 34,7$  que corresponde a um nível de significância inaceitável, de  $\sim 5 \cdot 10^{-5}\%$ , indicando que a hipótese **C** não é consistente com os resultados experimentais de energias dos raios gama emitidos pelo  $^{229}\text{Th}$ .

### VI.4.2 Avaliação das diferenças entre as três hipóteses

Os resultados obtidos no ajuste, considerando cada uma três hipóteses aqui examinadas, estão resumidos na Tabela VI-5, mostrando que as hipóteses **A** e **B** são consistentes com os resultados experimentais obtidos, o mesmo não acontecendo com a hipótese **C**. De fato, sob critérios estatísticos usuais, embora a hipótese **B** seja mais consistente com os dados experimentais, não é possível desconsiderar a hipótese **A**.

Tabela VI-5 - Resultados do ajuste do segundo passo para cada uma das três hipóteses.

Hipótese	Energia do primeiro nível excitado do $^{229}\text{Th}$	$\chi^2$ (a)	$P(\chi^2)$ (b)
A <sup>[111]</sup>	$\Delta_A = 4,8(9) \text{ eV}$	9,4	5,2%
B <sup>[27]</sup>	$\Delta_B = 5,6(10) \text{ eV}$	6,1	19%
C <sup>[26]</sup>	$\Delta_C = 1,8(10) \text{ eV}$	34,7	$5 \cdot 10^{-5} \%$

(a) Em todas as três hipóteses o número de graus de liberdade do ajuste do segundo passo é 4.

(b) Corresponde à probabilidade de que em um ajuste com este número de graus de liberdade se obtenha, por mera flutuação estatística, um qui-quadrado maior ou igual ao que foi obtido.

Observando as diferenças entre as três hipóteses apresentadas na Tabela VI-2 percebemos que a diferença entre as hipóteses A e B reside no fato de que a hipótese B considera a existência de duas transições gama partindo de cada um dos níveis de 29 keV e 71 keV, enquanto a hipótese A considera apenas uma transição de cada um destes níveis para o primeiro nível excitado (embora Reich e Helmer tenham discutido a possibilidade de haver duas transições gama partindo destes níveis\*).

Já, a diferença entre a hipótese C e as duas outras, A e B, reside basicamente no posicionamento do estado final da transição gama de 146 keV. Observando a Tabela VI-4 fica evidente que  $\delta_{146}$  não é compatível com zero. Portanto, esta transição gama deve ocorrer entre níveis com diferença de energia menores que a energia de excitação do nível de 146 keV (que é o nível de partida). Logo, o estado final desta transição gama não pode ser o estado fundamental. O elevado qui-quadrado obtido quando consideramos esta hipótese reflete quantitativamente este fato.

\* Com base nas relações entre as intensidades intra-banda e inter-bandas no  $^{229}\text{Th}$  Reich e Helmer concluem que as transições de 29 keV decaem para o estado fundamental com ~14 vezes menos intensidade que para o primeiro nível excitado, enquanto que para a transição de 71 keV esta razão de alimentação é de ~8 vezes<sup>[13]</sup>.

### VI.4.3 As transições de 317 keV e 320 keV

Os níveis finais das transições de 317 keV e 320 keV do  $^{229}\text{Th}$  não foram ainda determinadas. Com os resultados do primeiro passo é possível avaliar as probabilidades de que os níveis finais destas transições sejam o estado fundamental ou o primeiro nível excitado. Observando apenas os valores e incertezas das diferenças apresentadas na Tabela VI-4,  $\delta_{317} = 0,3(25)\text{ eV}$  e  $\delta_{320} = -3,5(23)\text{ eV}$  temos a impressão de que o estado final de ambas as transições deva ser o estado fundamental, com reduzidas probabilidades de alimentação para o primeiro nível excitado.

Porém, atentando para a correlação,  $\rho(\delta_{317}, \delta_{320}) = 0,71$ , percebemos que, embora nossa conclusão sobre o estado final da transição de 320 keV não se altere, como estas diferenças são fortemente correlacionadas positivamente, o fato de uma delas estar subestimada implica que a outra também estará, provavelmente, subestimada. Conseqüentemente, a transição de 317 keV provavelmente não tem como estado final apenas o estado fundamental.

A consideração de qual seja o estado final destas transições pode provocar alterações no valor de todos os resultados covariantes com as energias dos níveis nucleares e raios gama de 317 keV e 320 keV, inclusive podendo mudar o valor a ser adotado para  $\Delta$ . Para avaliar este efeito os ajustes do segundo passo (seção VI.4.1) foram refeitos incluindo a transição de 320 keV com probabilidade nula de alimentar o primeiro nível excitado, ou seja,  $\mu_{320} = 0$ . Os resultados obtidos para  $\Delta$  nestes testes para as hipóteses estatisticamente aceitáveis foram  $5,0(9)\text{ eV}$ ,  $5,8(10)\text{ eV}$ , respectivamente para as hipóteses A e B, equivalentes aos resultados apresentados na Tabela VI-5, porém, em ambos os casos, 0,2 eV superiores. Nestes testes também foi determinado o efeito sobre o valor para a diferença  $\delta_{317}$ , obtendo-se  $\delta_{317}^{Novo} = 3,0(18)\text{ eV}$  para ambas as hipóteses, A e B, indicando que é grande a

probabilidade de que a transição de 317 keV alimente, ao menos parcialmente, o primeiro nível excitado do  $^{229}\text{Th}$ .

#### VI.4.4 Conclusões e consequências deste estudo

Utilizando as hipóteses estatisticamente aceitáveis, obtemos para a energia do primeiro nível nuclear excitado os valores de 4,8(9) eV ou 5,6(10) eV (para as hipóteses **A** e **B**, respectivamente), indicando que não é possível desconsiderar a possibilidade de que a energia deste primeiro nível nuclear seja superior ao potencial de ionização do Th.

Os resultados obtidos desta análise têm consequências sobre avaliações de possíveis investigações e aplicações usando o  $^{229}\text{Th}$ , pois os estudos apresentados na literatura eram baseados no valor determinado por Reich e Helmer em 1994<sup>[13]</sup>,  $\Delta=3,5(10)$  eV. Com isso, muitos destes trabalhos<sup>[14, 20, 18, 17, 15, 22, 16]</sup> se limitaram a considerar valores de  $\Delta$  no intervalo entre 2,5 eV e 4,5 eV, enquanto os resultados desta análise indicam que estes estudos precisam considerar, também, valores mais elevados para a energia deste estado.

Com os resultados do primeiro passo pôde-se concluir que a transição de 320 keV alimenta predominantemente o estado fundamental, enquanto a transição de 317 keV tem grande probabilidade de alimentar, mesmo que parcialmente, o primeiro nível excitado. Este resultado pode auxiliar nos testes de modelos de estrutura nuclear do  $^{229}\text{Th}$ .

## Capítulo VII. Discussões finais e conclusões

Resultados experimentais podem ser correlacionados com outros resultados e, em particular, podem depender dos valores adotados para algumas grandezas físicas necessárias para suas determinações. Porém, o procedimento usual de tratamento de dados empregado em Espectroscopia Gama ignora ambos os efeitos ao fornecer como resultados valores acompanhados apenas de suas incertezas, perdendo as informações sobre as dependências comuns, expressas pelas correlações.

Neste trabalho estudamos e determinamos como as diversas metodologias de medida introduzem correlações e salientamos, em especial, a dependência quanto às constantes fundamentais envolvidas para o caso de um conjunto de energias de raios gama utilizados como padrões de calibração.

A metodologia de análise que empregamos para efetuar a compilação das energias de raios gama padrões de calibração, ajuste simultâneo pelo MMQ de todas as informações experimentais, possibilitou a realização de testes globais sobre os dados, revelando a boa qualidade das informações experimentais selecionadas por Helmer e van der Leun<sup>[1]</sup>, pois, em um ajuste em que foram combinadas 855 informações experimentais para a determinação de 459 parâmetros, não foram detectados casos de dados discrepantes nem indícios de subestimação grande das incertezas.

A determinação das correlações entre as energias dos padrões gama revelou muitos casos de correlações importantes (módulo próximo a 1) que, se não forem consideradas, podem comprometer a confiabilidade dos resultados das análises e testes estatísticos. A investigação das origens das correlações importantes mostrou que os principais efeitos são: as relações baseadas nos esquemas de decaimento

(correlacionando os raios gama provenientes de uma mesma fonte radioativa); e as medidas de diferenças de energia em detectores semicondutores (envolvendo raios gamas da mesma região de energia). Este fato reforça a necessidade da consideração e conhecimento das correlações, pois elas são importantes tanto para a correta calibração dos equipamentos utilizados em cada experimento (uma vez que em calibrações utilizam-se usualmente energias de diversos raios gama emitidos por uma mesma fonte) quanto para a avaliação de resultados de experimentos diferentes em que os equipamentos foram calibrados utilizando as mesmas fontes ou gamas na mesma faixa de energia. Por exemplo, as correlações elevadas percebidas entre os gamas de energia superiores a 2 MeV do  $^{56}\text{Co}$  e do  $^{66}\text{Ga}$  têm implicações em diversos resultados experimentais, pois estas são as principais fontes de calibração para esta faixa de energia.

A consideração das covariâncias do conjunto de energias de raios gama padrões para calibração durante todo procedimento de compilação e o aproveitamento integral das informações experimentais disponíveis (sem a necessidade de escolher caminhos) resultou em valores recomendados e incertezas atribuídas para as energias dos padrões que apresentam diferenças significativas com relação às obtidas pela compilação de Helmer e van der Leun<sup>[1]</sup> (efetuada com base nas mesmas informações experimentais). Estas diferenças refletem a importância do procedimento de análise para a compilação de resultados experimentais.

A consideração explícita da dependência de suas energias com as constantes fundamentais propiciou identificar quais das correlações entre energias de raios gama eram provocadas basicamente pelas constantes fundamentais, como, por exemplo, a correlação de 0,76 entre o 307 keV do  $^{169}\text{Yb}$  e o 604 keV do  $^{192}\text{Ir}$ . Pôde-se, também, avaliar o efeito da atualização das constantes fundamentais sobre o conjunto de padrões de energias gama tanto nos valores recomendados e incertezas quanto, principalmente, nas correlações (por exemplo, redução de 0,76 para 0,29 na correlação anteriormente mencionada).

Ainda com relação à compilação dos padrões de calibração gama, também determinamos a precisão necessária nas energias médias de recuo para que suas eventuais incertezas possam ser, de fato, desconsideradas, não encontrando nenhum efeito que comprometa a precisão exigida, de ~2%, validando a usual consideração destas equações como vínculos nos ajustes de energias gama.

O Método do Ajuste Único, procedimento de auto-calibração desenvolvido neste trabalho<sup>[10]</sup>, possibilita incorporar novas informações experimentais ao conjunto de padrões em uma única etapa e é um procedimento adequado para ser empregado na análise de quaisquer medidas que envolvam o procedimento de calibração e interpolação de equipamentos, sendo seu uso especialmente indicado no caso de medidas envolvendo padrões de calibração. Neste trabalho, o efeito da utilização deste procedimento foi exemplificado em uma medida de espectroscopia gama, revelando como todo o conjunto de padrões tem seus valores e incertezas alterados quando novos resultados experimentais são obtidos sobre algum dos padrões.

Embora o Método do Ajuste Único facilite a realização da atualização do conjunto de padrões, não é indicado que os padrões sejam alterados a cada experimento<sup>[2, 3]</sup>, pois as mudanças nos padrões devem ser efetuadas em compilações<sup>[3]</sup> (envolvendo, preferencialmente, informações de diversos experimentos). Porém, mesmo sem recomendar novos valores, o MAU pode ser utilizado pela sua praticidade de efetuar toda a análise em uma única etapa e para avaliar os efeitos sobre o conjunto de padrões que aquelas informações provocam (principalmente quanto à redução das incertezas, semelhante ao que foi efetuado na referência 3).

A importância do uso de um procedimento de análise que considere as correlações envolvidas e que possibilite um olhar global sobre os dados, temas centrais deste trabalho, podem ser também percebidos na revisão do esquema de decaimento gama do  $^{229}\text{Th}$ , onde os problemas existentes nas incertezas primárias foram avaliados em uma primeira etapa, possibilitando a posterior utilização de testes estatísticos para avaliar a adequação de diferentes modelos nucleares para o  $^{229}\text{Th}$ . Os

resultados desta análise permitiram descartar um dos modelos e indicam que a energia de excitação do primeiro estado nuclear do  $^{229}\text{Th}$  pode ser superior à energia de ionização do Tório, com consequências sobre o intervalo de energia a ser considerado nos estudos sobre aquele primeiro estado excitado e, em particular, seu decaimento.

Finalmente, cabe apontar que a AIEA recentemente tem reconhecido a importância do conhecimento e consideração das covariâncias entre dados nucleares, principalmente no caso de conjuntos de padrões para calibração<sup>[112]</sup>. A determinação das covariâncias entre as energias de raios gama, efetuada como parte do presente trabalho<sup>[9]</sup>, é um passo essencial para que as correlações possam ser corretamente consideradas nas medidas de energias de raios gama. Além de disponibilizar as covariâncias entre os padrões gama, também foram apresentados procedimentos que possibilitam a correta consideração dessas covariâncias na análise de medidas de espectroscopia gama com detectores semicondutores.

A importância da obtenção de resultados completos (valores recomendados das grandezas e suas variâncias e covariâncias) é ainda mais relevante, tanto em Física Básica como em aplicações, quando se trata de intensidade de processos físicos tais como seções de choque<sup>[2]</sup> ou intensidades de decaimento gama<sup>[113, 2]</sup>. Um dos problemas enfrentados na compilação destes conjuntos de padrões reside na dificuldade de se considerar adequadamente as correlações nos experimentos em que são determinados esses padrões (porque estes freqüentemente envolvem interpolações sobre funções resposta determinadas com base em padrões do mesmo conjunto). O Método do Ajuste Único, adaptado para estas situações, pode ser um procedimento adequado para efetuar a combinação das informações experimentais sobre estes padrões, além de ser um aliado para a compreensão de qual seja a informação experimental relevante obtida no experimento e que precisa ser fornecida para que os dados possam ser corretamente aproveitados em compilações.

## Referências Bibliográficas

- 1) R.G. Helmer e C. van der Leun, *Recommended Standards for  $\gamma$ -ray Energy Calibration* (1999), Nucl. Instr. and Meth. **A450** (2000) 35
- 2) W. Mannhart, *A Small Guide to Generating Covariances of Experimental Data*, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig (1981)
- 3) B.N. Taylor and E.R. Cohen, *Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: A Status Report*, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. **95** (1990) 497
- 4) E.R. Cohen and B.N. Taylor, *The 1973 Least-Squares Adjustment of the Fundamental Constants*, J. Phys. Chem. Data **2** (1973) 663
- 5) E.R. Cohen and B.N. Taylor, *The 1986 Adjustment of the Fundamental Physical Constants*, Rev. Mod. Phys. **59** (1987) 1121
- 6) P.J. Mohr and B.N. Taylor, *CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 1998*, Rev. Mod. Phys. **72** (2000) 351
- 7) P.J. Mohr and B.N. Taylor, *The 2002 CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants, Web Version 4.0*, disponível em physics.nist.gov/constants (9 de Dezembro de 2003); a ser publicado em 2004
- 8) O. Helene, V.R. Vanin and Z.O. Guimarães-Filho, *Covariances Between Gamma-ray Energies: Updating Adopted Values*, J. Nucl. Sci. Tech., Supp 2 (2002) 467
- 9) O. Helene, Z.O. Guimarães-Filho, V.R. Vanin, T.M. Pauliquevis Jr, I.D. Goldman and P.R. Pascholati, *Covariances Between Gamma-ray Energies*, Nucl. Instr. and Meth. **A460** (2001) 289
- 10) Z.O. Guimarães-Filho and O. Helene, *One Step Self-Calibration Procedure in Gamma-ray Energy Measurements*, Braz. Jour. Phys. **33** (2003) 280

- 11) T.M. Pauliquevis Júnior, *Auto Calibração e Determinação de Matrizes de Covariância em Medidas de Energia em Espectroscopia Gama*, dissertação de mestrado, IFUSP (2000)
- 12) C.W. Reich and R.G. Helmer, *Energy Separation of the Doublet of Intrinsic States at the Ground State of  $^{229}\text{Th}$* , Phys. Rev. Lett. **64** (1990) 271
- 13) R.G. Helmer and C.W. Reich, *An Excited State of  $^{229}\text{Th}$  at 3.5eV*, Phys. Rev. C **49** (1994) 1845
- 14) K. Pachuki, S. Wycech, J. Zylicz and M. Pfützner, *Nuclear-spin mixing oscillations in Th-229 (89+)*, Phys. Rev. C **64** (2001) Art. No. 064301
- 15) F.F. Karpeshin, S. Wycech, I.M. Band, M.B. Trzhaskovskaya, M. Pfützner, J. Zylicz, *Rates of transitions between the hyperfine-splitting components of the ground-state and the 3.5 eV isomer in  $^{229}\text{Th}^{89+}$* , Phys. Rev. C **57** (1998) 3085
- 16) I.M. Band, *Discrete conversion of gamma rays in Th-229 and lightly ionized Te-125(Q) ions*, J. Exp. Theor. Phys. **93** (2001) 948
- 17) P. Kalman and T. Bukki, *Deexcitation of Th-229(m): Direct gamma ray and electronic-bridge process*, Phys. Rev. C **63** (2001) Art. No. 027601
- 18) S. Matinyan, *Lasers as a bridge between atomic and nuclear physics*, Phys. Rep. **298** (1998) 199
- 19) P. Walker and G. Dracoulis, *Energy traps in atomic nuclei*, Nature **399** (1999) 35
- 20) E. Peik and C. Tamm, *Nuclear laser spectroscopy of the 3.5 eV transition in Th-229*, Europhys. Lett. **61** (2003) 181
- 21) T. Mitsugashira, M. Hara, T. Ohtsuki, H. Yuki, K. Takamiya, Y. Kasamatsu, A. Shinohara, H. Kikunaga and T. Nakanishi, *Alpha-Decay from the 3.5 eV Isomer of Th-229*, Jour. Rad. and Nucl. Chem. **255** (2003) 63
- 22) E. Browne, E.B. Norman, R.D. Canaan, D.C. Glasgow, J.M. Keller, and J.P. Young, *Search for decay of the 3.5 eV level in Th-229*, Phys. Rev. C **64** (2001) Art. No. 014311

- 23) F.B. Larkins, At. Data Nucl. Data Tables **20** (1977) 313
- 24) S.B. Utter, P. Beiersdorfer, A. Barnes, R.W. Lougheed, J.R.C. López-Urrutia, J.A. Becker, M.S. Weiss, *Reexamination of the optical gamma ray decay in  $^{229}Th$* , Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 505
- 25) R.W. Shaw, J.P. Young, S.P. Cooper, O.F. Webb, *Spontaneous ultraviolet emission from  $^{233}Uranium/^{229}Thorium$  samples*, Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 1109
- 26) K. Gulda, W. Kurcewicz, A.J. Aas, M.J.G. Borge, D.G. Burke, B. Fogelberg, I.S. Grant, E. Hagebø, N. Kaffrell, J. Kvasil, G. Løvhøiden, H. Mach, A. Mackova, T. Martinez, G. Nyman, B. Rubio, J.L. Tain, O. Tengblad, T.F. Thorsteinsen, *The nuclear structure of  $^{229}Th$* , Nucl. Phys. A **703** (2002) 45
- 27) V. Barci, G. Ardisson, G. Barci-Funel, B. Weiss, O. El Samad and R.K. Sheline, *Nuclear structure of  $^{229}Th$  from  $\gamma$ -ray spectroscopy study of  $^{233}U$   $\alpha$ -particle decay*, Phys. Rev. C **68** (2003) 034329
- 28) R.G. Helmer, P.H.M. Van Assche and C. van der Leun, *Recommended Standards for Gamma-Ray Energy Calibration* (1979), Atom. Data and Nucl. Data Tables **24** (1979) 39
- 29) V.R. Vanin e P. Gouffon, *Tópicos avançados em tratamento estatístico de dados em Física Experimental*, LAL-IFUSP, São Paulo (1996)
- 30) ISO - International Organization for Standardization, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, Genebra, Suiça (1993)
- 31) R.D. Deslattes, E.G. Kessler Jr., W.C. Sauder and A. Henins, *Remeasurement of  $\gamma$ -ray reference lines*, Annals of Physics **129** (1980) 378
- 32) E.G. Kessler Jr., L. Jacobs, W. Schwitz and R.D. Deslattes, *Precise  $\gamma$ -ray energies from the radioactive decay of  $^{170}Tm$  and  $^{169}Yb$* , Nucl. Instr. and Meth. **160** (1979) 435

- 33) R.D. Deslattes, A. Henins, R.M. Schoonover, C.L. Carroll and H.A. Bowman, *Avogadro Constant – Corrections to an Earlier Report*, Phys. Rev. Lett. **36** (1976) 898
- 34) E.G. Kessler Jr., R.D. Deslattes, A. Henins and W.C. Sauder, *Redetermination of  $^{198}\text{Au}$  and  $^{192}\text{Ir}$   $\gamma$ -ray standards between 0.1 and 1.0 MeV*, Phys. Rev. Lett. **40** (1978) 171
- 35) R.D. Deslattes and A. Henins, *X-Ray to visible wavelength ratios*, Phys. Rev. Lett. **31** (1973) 972
- 36) D.C. Lu, L. Delker, G Dugan, C.S. Wu, A.J. Caffrey, Y.T. Cheng and Y.K. Lee, *New high-accuracy measurement of the pionic mass*, Phys. Rev. Lett. **45** (1980) 1066 – citando medida realizada no NBS em colaboração com E.G Kessler Jr and R.D. Deslates
- 37) G.L. Borchert, W. Scheck, and K.P. Wieder, *Precision Measurement of the  $\gamma$ -Ray Energies from the Radioactive Decay of  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{169}\text{Tm}$ ,  $^{192}\text{Ir}$  and  $^{203}\text{Hg}$* , Z. Naturforsch. **30a** (1975) 274
- 38) G.L. Borchert, *Precision Measurement of  $\gamma$ -Ray Energies from the Decay of  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{153}\text{Sm}$  and  $^{198}\text{Au}$* , Z. Naturforsch. **31a** (1976) 387
- 39) J.J. Reidy, *Curved-Crystal Spectrometers: Theory and Use for Gamma-Ray Energy and Intensity Measurements*, em: *The Electromagnetic Interaction in Nuclear Spectroscopy*, ed. W.D. Hamilton, North-Holland, Amsterdam (1975) 839
- 40) G.L. Borchert, W. Scheck, and O.W.B. Schult, *Precision Measurement of Relative  $\gamma$ -Ray Energies with a Curved Crystal Diffractometer*, em: *Atomic Masses and Fundamental Constants*, 5 eds. J.H. Sanders e A.H. Wapstra, Plenum Press, New York (1976) 42
- 41) J. Kern and W. Schwitz, *Precision Energy Measurements of  $\gamma$ -Rays Occurring in the Decay of  $^{110}\text{Ag}$* , Nucl. Instr. and Meth. **151** (1978) 549

- 42) J.J. Reidy, *comunicação privada para R.G. Helmer e C. van der Leun*, citado na referência 1 (1961)
- 43) M.A. Ludington, J.J. Reidy et al., *The Decay of  $^{160}\text{Tb}$  to Levels in  $^{160}\text{Dy}$* , Nucl. Phys. A **119** (1968) 398
- 44) B. Jeckelmann, W. Beer et al., *A New Determination of the 25.7 keV Wavelength Standard in the Decay of  $^{161}\text{Tb}$* , Nucl. Instr. and Meth. A **241** (1985) 191
- 45) W. Beer and J. Kern, *The Precision Determination of some  $\gamma$ -Ray Energies Using the Fridourg Curved-Crystal Spectrometer*, Nucl. Instr. and Meth. **117** (1974) 183
- 46) W. Schwitz and J. Kern, *Large Angle Optical Interferometer for a Crystal Spectrometer*, em: *Proc. 2nd. Intern. Symp. on Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics*, Petten (1975) 697
- 47) O. Piller, W. Beer and J. Kern, *Das Fokussierende KristallSpektrometer Der Universität Fribourg*, Nucl. Instr. and Meth. **107** (1973) 61
- 48) G.L. Borchert, W. Scheck, and O.W.B. Schult, *Curved Crystal Spectrometer for Precise Energy Measurements of Gamma Rays from 30 to 1500 keV*, Nucl. Instr. and Meth. **124** (1975) 107
- 49) R.G. Helmer,  *$\gamma$ -Ray Energies for Calibration from the Decay of  $^{161}\text{Tb}$ ,  $^{172}\text{Hf}$ + $^{172}\text{Lu}$ , and  $^{241}\text{Am}$* , Nucl. Instr. and Meth. A **330** (1993) 434
- 50) R.G. Helmer, A.J. Cafrey, R.J. Gehrke and R.C. Greenwood,  *$\gamma$ -Ray Energies from the Decay of  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ , and  $^{210}\text{Pb}$* , Nucl. Instr. and Meth. **188** (1981) 671
- 51) C. Wesselborg and D.E. Alburger, *Precision Energy Measurements of Gamma Rays from  $^{44}\text{Ti}$  and  $^{133}\text{Ba}$* , Nucl. Instr. and Meth. A **302** (1991) 89
- 52) R.G. Helmer, R.C. Greenwood and R.J. Gehrke, *Precise Comparison and Measurement of Gamma-Ray Energies with a Ge(Li) Detector II. 400-1300 keV*, Nucl. Instr. and Meth. **96** (1971) 173

- 53) R.C. Greenwood, R.G. Helmer and R.J. Gehrke, *Precise Comparison and Measurement of Gamma-Ray Energies with a Ge(Li) Detector I. 50-420 keV*, Nucl. Instr. and Meth. **77** (1970) 141
- 54) R.G. Helmer, *Selected Gamma-ray Energies and Emission Probabilities for the Decay of  $^{125}\text{Sb}$  and  $^{154}\text{Eu}$* , Appl. Radiat. Isot. **41** (1990) 75
- 55) R.C. Greenwood, R.G. Helmer and R.J. Gehrke, *Precise  $\gamma$ -Ray Energies for Calibration of Ge Semiconductor Spectrometers to 3.5 MeV*, Nucl. Instr. and Meth. **159** (1979) 465
- 56) E.K. Warburton and D.E. Alburger, *Precision Measurements of Gamma-Ray Energies from 13.3 a  $^{152}\text{Eu}$  Decay*, Nucl. Instr. and Meth. A **253** (1986) 38
- 57) R.G. Helmer, R.J. Gehrke and R.C. Greenwood,  *$\gamma$ -Ray Energies for  $^{40}\text{K}$ ,  $^{108m}\text{Ag}$ , and  $^{226}\text{Ra}$  Decay Chain*, Nucl. Instr. and Meth. **166** (1979) 547
- 58) G. Wang, E.K. Warburton and D.E. Alburger, *Precision Energy Determinations of Gamma Transitions from  $^{56}\text{Co}$  Decay*, Nucl. Instr. and Meth. A **272** (1988) 791
- 59) C. Alderliesten, J.A. van Nie, A.P. Slok and P.M. Endt, *Precision Energy Determination of Gamma-Rays from the  $^{66}\text{Ga}(\beta^+ + \varepsilon)^{66}\text{Zn}$  Decay*, Nucl. Instr. and Meth. A **335** (1993) 219
- 60) H. Kumahora, H. Inoue and Y. Yoshizawa, *Precision Measurement of Gamma-Ray Energies in the Range 450-600 keV*, Nucl. Instr. and Meth. **206** (1983) 489
- 61) H. Kumahora, *Precision Energy Measurement of Gamma Rays from the Decay of  $^{75}\text{Se}$  and  $^{133}\text{Ba}$* , Nucl. Instr. and Meth. A **238** (1985) 431
- 62) E.R. Mucciolo and O. Helene, *Energy Measurement of Gamma Rays from  $^{133}\text{Ba}$  Decay: Consistency with Cascade Cross-Over Relations*, Nucl. Instr. and Meth. A **256** (1987) 153
- 63) D.E. Alburger and C. Wesselborg, *Precision Energy Measurement of the 166 keV  $\gamma$ -Ray in  $^{139}\text{Ce}$  Decay*, Nucl. Instr. and Meth. A **423** (1999) 49

- 64) Y. Lee, N. Hashimoto, H. Inoue and Y. Yoshizawa, *Gamma-ray Energies from the Decay of  $^{152}\text{Eu}$* , Appl. Radiat. Isot. **43** (1992) 1247
- 65) P. Becker, K. Dorenwendt, G. Ebeling, R. Lauer, W. Lucas, R. Probst, H.J. Rademacher, G. Reim, P. Seyfried and H. Siegert, *Absolute measurement of the (220) lattice plane spacing in a Silicon crystal*, Phys. Rev. Lett. **46** (1981) 1540
- 66) P. Becker, P. Seyfried and H. Siegert, *The lattice of highly pure Silicon single crystals*, Z. Phys. B. **48** (1982) 17
- 67) P. Seyfried, *Work Related to the Determination of the Avogadro Constant in the PTB*, in: *Precision Measurement and Fundamental Constants II*, Eds. B.N. Taylor and W.D. Phyllips, Natl. Bur. Stand. (U.S.) Spec. Publ. 617 (1984) 313
- 68) H. Siegert and P. Becker, *Systematic Uncertainties in the Determination of the Lattice Spacing  $d(220)$  in Silicon*, in: *Precision Measurement and Fundamental Constants II*, Eds. B.N. Taylor and W.D. Phyllips, Natl. Bur. Stand. (U.S.) Spec. Publ. 617 (1984) 313
- 69) R.D. Deslattes, *X-Ray interferometry and  $\gamma$ -Ray Wavelengths*, in: *The Art of Measurement*, Ed. B. Kramer, Weinheim, Germany, VCH Verlagsgesellschaft (1988) 193
- 70) R.D. Deslattes, M. Tanaka, G.L. Greene, A. Henins and E.G. Kessler Jr., *Remeasurement of a Silicon lattice period*, IEEE Trans. on Instr. and Meas. **IM-36** (1987) 166
- 71) R.D. Deslattes, A. Henins, H.A. Bowman, R.M. Schoonover, C.L. Carroll, I.L. Barnes, L.A. Machlan, L.J. Moore and W.R. Shields, *Determination of the avogadro constant*, Phys. Rev. Lett. **33** (1974) 463
- 72) R.D. Deslattes, *High Resolution  $\gamma$ -ray spectroscopy: the first 85 years*, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. **105** (2000) 1
- 73) C. Doll, H.G. Börner, T. von Egidy, H. Fujimoto, M. Jentschel and H. Lehmann, *GAMS 5*, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. **105** (2000) 167

- 74) Yu.V. Shvyd'ho, M. Lerche, J. Jäschke, M. Lucht, E. Gerdau, M. Gerken, H.D. Rüter, H.-C. Wille, P. Becker, E.E. Alp, W. Sturhahn, J. Sutter and T.S. Toellner,  *$\gamma$ -Ray Wavelength Standard for Atomic Scales*, Phys. Rev. Lett. **85** (2000) 495
- 75) P. Becker, H. Bettin, H-U Danzebrink *et al*, *Determination of the Avogadro Constant via the Silicon Route*, Metrologia **40** (2003) 271
- 76) H. Preston-Thomas, *The international practical temperature scale of 1968*, Metrologia **5** (1969) 35
- 77) H. Preston-Thomas, *The international temperature scale of 1990*, Metrologia **27** (1990) 3
- 78) G. Maurice, M.A. Kendall and A. Stuart, *The advanced theory of Statistics*, Charles Griffin, Londres (1961)
- 79) O. Helene, V.R. Vanin and S.P. Tsai, *Improvement of  $^{192}\text{Ir}$  and  $^{152}\text{Eu}$  gamma-ray calibration energies by using a self-calibration procedure*, Nucl. Instr. and Meth. A **433** (1999) 592
- 80) S.P. Tsai, *Auto Calibração das transições gama do  $^{152}\text{Eu}$  e  $^{192}\text{Ir}$* , dissertação de mestrado, IFUSP (2002)
- 81) S.P. Tsai, E.R. Mucciolo and O. Helene, *Relocation of multichannel spectra*, Nucl. Instr. and Meth. A **345** (1994) 538
- 82) O. Helene and M. Morales, *Comparison of two methods for relocation of multichannel spectra*, Nucl. Instr. and Meth. A **378** (1996) 624
- 83) N. Sassamoto, K. Koyama and S.I. Tanaka, *Analysis method of Gamma-ray pulse-height distributions obtained with a Ge(Li) detector*, Nucl. Instr. and Meth. **125** (1975) 507
- 84) P. Gouffon, *IDF – Manual do Usuário*, LAL-IFUSP, São Paulo (1983)
- 85) G.F. Knoll, *Radiation Detection and measurement*, Wiley, New York (1979)

- 86) INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, *Sistema Internacional de Unidades – SI*, 6<sup>a</sup> ed., Brasília (2000)
- 87) E.G. Kessler Jr., J.E. Schewppe and R.D. Deslattes, *Intercomparison of Silicon Samples from the Avogadro Projects*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **46** (1997) 551
- 88) E.G. Kessler Jr., A. Henins, R.D. Deslattes, L. Nielsen, and M. Arif, *Precision Comparison of the Lattice Parameters of Silicon Monocrystals*, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. **99** (1994) 1
- 89) E.G. Kessler Jr., S.M. Owens, A. Henins and R.D. Deslattes, *Silicon Lattice Comparisons Related to the Avogadro Project: Uniformity of New Material and Surface Preparation Effects*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **48** (1999) 221
- 90) E.G. Kessler Jr., comunicação privada para P.J. Mohr and B.N. Taylor (1999) citada na referência 6
- 91) J. Martin, U. Kuettgens, J. Stümpel, and P. Becker, *The Silicon Lattice Parameter – An Invariant Quantity of Nature?*, Metrologia **35** (1998) 811
- 92) J. Martin, H. Bettin, U. Kuettgens, D. Schiel, and P. Becker, *About the Existing Discrepancy in the Determinations of the Avogadro Constant*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **48** (1999) 216
- 93) D. Windisch, and P. Becker, *Lattice Distortions Induced by Carbon in Silicon*, Phil. Mag. A **58** (1988) 435
- 94) D. Windisch, and P. Becker, *Silicon Lattice Parameters as an Absolute Scale of Length for High Precision Measurements of Fundamental Constants*, Phis. Stat. Sol. A **118** (1990) 379
- 95) P. Becker, *Tracing the Definition of the Kilogram to the Avogadro Constant Using a Silicon Single Crystal*, Metrologia **40** (2003) 366
- 96) J.F. Nye, *Physical Properties Of Crystals*, Oxford Univ. Press., Oxford, England (1957)

- 97) H.J. McSkimin, *Measurement of Elastic Constants at Low Temperatures by Means of Ultrasonic Waves-Data for Silicon and Germanium Single Crystals, and for Fused Silica*, J. App. Phys. **24** (1953) 988
- 98) T.J. Quinn, *The Kilogram: The Present State of Our Knowledge*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **40** (1991) 81
- 99) M. Hart, *Ten Years of X-Ray Interferometry*, Proc. R. Soc. Lond. A **346** (1975) 1
- 100) H. Wagenbreth, comunicação privada na PTB citada na referência 65 (1981)
- 101) R.K. Kirby, comunicação privada no NIST citada na referência 34 (1978)
- 102) F.S. Borges, *Elementos de Cristalografia*, Fundação Calouste Gulbenkian, Portugal, Lisboa (1982)
- 103) G.L. Clark, *Applied X-Rays*, 4<sup>a</sup>. ed., McGraw-Hill Book Company, New York (1955)
- 104) B.M. Ando, D. Bailey and M. Hart, *A Simple Bragg-Spacing Comparator*, Acta Cryst. A **34** (1978) 484
- 105) J.A. Baker, T.N. Tucker, N.E. Moyer and R.C. Buschert, *Effect of Carbon on the Lattice Parameter of Silicon*, J. Appl. Phys. **39** (1968) 4365
- 106) R.M. Castro, *Transformando o  $^{152}\text{Eu}$  em um padrão de calibração de eficiência para deteção de gamas*, tese de doutoramento, IFUSP (2003)
- 107) R.G. Helmer, *Modern tools for precise  $\gamma$ -ray spectrometry with Ge detectors*, Nucl. Instr. and Meth. A **505** (2003) 297
- 108) V.R. Vanin, G. Kenchian, M. Morales, O. Helene and P.R. Pascholati, *An experimental method for a precise determination of gamma-ray energies with semiconductor detectors*, Nucl. Instr. and Meth. A **391** (1997) 338
- 109) C.W. Reich, R.G. Helmer, J.D. Baker and R.J. Gehrke, *Emission Probabilities and Energies of  $\gamma$ -ray Transitions from the Decay of  $^{233}\text{U}$* , Int. J. Appl. Radiat. Isot. **35** (1984) 185

- 110) L.A. Kroger and C.W. Reich, *Features of the Low-Energy Level Scheme of  $^{229}Th$  as Observed in the  $\alpha$ -Decay of  $^{233}U$* , Nucl. Phys. A **259**, 29 (1976)
- 111) R.B. Firestone and V.S. Shirley, *Table of Isotopes*, Eighth Edition, John Wiley & Sons, Inc. (1996)
- 112) A. Nichols e M. Herman (editors), *Preparation of the proposal for a coordinated research project to update X- and  $\gamma$ -ray decay data standards for detector calibration*, IAEA Report INDC(NDS) 378, Vienna (1998)
- 113) R.M. Castro, V.R. Vanin, P.R. Pascholati, N.L. Maidana, M.S. Dias and M.F. Koskinas, *Developing  $^{152}Eu$  into a standard for detector efficiency calibration*, Appl. Radiat. and Isotop. **60** (2004) 283
- 114) C.O. Guimarães, *Programa Vecorrel*, comunicação privada, (2004)



# Apêndice A. Resultados considerando as constantes fundamentais de 1986

**Tabela A.1 - Listagem dos valores das energias dos raios gama padrões para calibração obtidas utilizando o procedimento desenvolvido neste trabalho quando considerando as constantes fundamentais do CODATA 86 e comparação com os resultados da compilação de Helmer e van der Leun<sup>[1]</sup>.**

Nuclídeo	Gama (keV)	Energia MMQ 86 <sup>(a)</sup> (keV)	Energia ref. 1 (keV)	Dif. valor <sup>(b)</sup>	Dif. incerteza <sup>(c)</sup>	$\frac{\sigma_{E_{MMQ}}}{E_{MMQ}} (x10^6)$	[D] <sup>(d)</sup>	[S] <sup>(e)</sup>	[R] <sup>(f)</sup>
7-Be	477	477,6034 (22)	477,6035 (20)			4,6		2	
22-Na	1274	1274,536 (5)	1274,537 (7)		>	4,2		1	
24-Na	1368	1368,6263 (31)	1368,6260 (50)		>	2,2		2	
	2754	2754,010 (12)	2754,007 (11)			4,3		1	
44-Ti	67	67,8676 (18)	67,8688 (17)			26		1	
	78	78,3235 (11)	78,3236 (17)		>	14		2	
46-Sc	889	889,2732 (15)	889,2710 (20)	<!	>	1,7		11	
	1120	1120,5365 (32)	1120,5370 (30)			2,8		5	
51-Cr	320	320,0824 (5)	320,0824 (4)			1,5	1	1	
54-Mn	834	834,8397 (23)	834,8380 (50)		>!	2,7		4	
56-Co	733	733,5094 (26)	733,5085 (23)			3,6		6	X
	787	787,7399 (28)	787,7391 (23)			3,5		6	X
	846	846,7637 (22)	846,7638 (19)			2,6		3	X
	896	896,498 (5)	896,503 (7)		>	6		2	X
	977	977,365 (4)	977,363 (4)			3,8		2	X
	996	996,938 (4)	996,939 (5)			4,4		2	X
	1037	1037,8352 (24)	1037,8333 (24)			2,4		6	X
	1140	1140,353 (6)	1140,356 (7)			5		1	X
	1159	1159,926 (6)	1159,933 (8)	>	>	5		1	X
	1175	1175,0862 (27)	1175,0878 (22)			2,3		4	X
	1238	1238,2740 (23)	1238,2736 (22)			1,9		3	X
	1335	1335,381 (32)	1335,380 (29)			24		1	
	1360	1360,198 (3)	1360,196 (4)			2,5		4	X
	1640	1640,449 (5)	1640,450 (5)			3,0		1	X
	1771	1771,3300 (36)	1771,3270 (30)	<		2,0		4	X
	1810	1810,727 (4)	1810,726 (4)			2,4		3	X
	1963	1963,717 (5)	1963,703 (11)	<!	>!	2,6		4	X
	2015	2015,181 (5)	2015,176 (5)	<		2,3		2	X
	2034	2034,754 (5)	2034,752 (5)			2,4		5	X
	2113	2113,100 (5)	2113,092 (6)	<!		2,6		5	X
	2212	2212,8980 (37)	2212,8980 (30)			1,7		2	X
	2598	2598,440 (4)	2598,438 (4)			1,6		6	X
	3009	3009,562 (5)	3009,559 (4)			1,5		4	X
	3201	3201,944 (6)	3201,930 (11)	<!	>	1,9		1	X
	3253	3253,407 (6)	3253,402 (5)			1,7			X

Nuclídeo	Gama (keV)	Energia MMQ 86 <sup>(a)</sup> (keV)	Energia ref. 1 (keV)	Dif. valor <sup>(b)</sup>	Dif. incerteza <sup>(c)</sup>	$\frac{\sigma_{E_{MMQ}}}{E_{MMQ}}$ ( $\times 10^3$ )	[D] <sup>(d)</sup>	[S] <sup>(e)</sup>	[R] <sup>(f)</sup>
57-Co	3272	3272,979 (6)	3272,978 (6)	.	.	1,7		X	
	3451	3451,119 (5)	3451,119 (4)	.	<	1,5	3	X	
58-Co	122	122,06063 (14)	122,06065 (12)	.	.	1,2	1		
	136	136,47352 (33)	136,47356 (29)	.	.	2,4	1	1	
59-Fe	810	810,7599 (24)	810,7593 (20)	.	.	3,0		9	
	863	863,9481 (19)	863,9510 (60)	>	>!	2,2		3	
	1674	1674,722 (7)	1674,725 (7)	.	.	4,4		1	
60-Co	142	142,6517 (26)	142,6510 (20)	.	<	18		1	
	192	192,348 (3)	192,349 (5)	.	>	17	2	X	
	1099	1099,2445 (32)	1099,2450 (30)	.	.	2,9	1	X	
	1291	1291,589 (4)	1291,590 (6)	.	>	3,2	2	X	
65-Zn	1173	1173,2254 (23)	1173,2280 (30)	>	>	2,0	1	8	
	1332	1332,4941 (26)	1332,4920 (40)	.	>	1,9	1	9	
66-Ga	1115	1115,5403 (22)	1115,5390 (20)	.	.	2,0		4	
75-Se	686	686,083 (6)	686,080 (6)	.	.	9	1	X	
	833	833,5334 (20)	833,5324 (21)	.	.	2,4	2	X	
	853	853,033 (7)	853,038 (8)	.	.	8	2	X	
	1039	1039,2205 (30)	1039,2200 (30)	.	.	2,9	2	X	
	1148	1147,893 (10)	1147,896 (10)	.	.	9	2	X	
	1190	1190,284 (8)	1190,287 (7)	.	.	7	2	X	
	1333	1333,116 (5)	1333,112 (5)	.	.	3,5	1	X	
	1418	1418,757 (6)	1418,754 (5)	.	.	4,0	1	X	
	1459	1458,662 (12)	1458,662 (12)	.	.	8	2		
	1508	1508,157 (7)	1508,158 (7)	.	.	4,9	1	X	
	1741	1740,907 (18)	1740,904 (16)	.	.	11	1	X	
	1898	1898,836 (7)	1898,823 (8)	<!	.	3,9	1	X	
	1918	1918,335 (5)	1918,329 (5)	<!	.	2,7	1	X	
	2066	2065,783 (8)	2065,778 (7)	.	.	3,6	1	X	
	2173	2173,327 (16)	2173,319 (15)	.	.	8	1		
	2189	2189,624 (6)	2189,616 (6)	<!	.	2,8	2	X	
	2213	2213,191 (10)	2213,181 (9)	<	.	4,5	1	X	
	2393	2393,130 (8)	2393,129 (7)	.	.	3,3	1	X	
	2423	2422,527 (8)	2422,525 (7)	.	.	3,4	1	X	
	2751	2751,843 (5)	2751,835 (5)	<!	.	2,0	1	X	
	2780	2780,098 (18)	2780,095 (16)	.	.	7	1	X	
	2933	2933,361 (10)	2933,358 (9)	.	.	3,4	1	X	
	2977	2977,09 (5)	2977,08 (4)	.	.	16	1		
	2993	2993,21 (4)	2993,21 (3)	.	.	12	1		
	3047	3046,694 (10)	3046,684 (9)	<	.	3,4	1	X	
	3228	3228,808 (6)	3228,800 (6)	<!	.	2,0	1	X	
	3380	3380,851 (7)	3380,850 (6)	.	.	2,2	1	X	
	3422	3422,040 (9)	3422,040 (8)	.	.	2,7	1	X	
	3432	3432,310 (8)	3432,309 (7)	.	.	2,4	1	X	
	3766	3766,854 (10)	3766,850 (9)	.	.	2,8		X	
	4085	4085,863 (11)	4085,853 (9)	<	.	2,6		X	
	4461	4461,203 (10)	4461,202 (9)	.	.	2,3		X	
	4806	4806,011 (11)	4806,007 (9)	.	.	2,3		X	
	66	66,0520 (9)	66,0518 (8)	.	.	13	1	X	
	96	96,7339 (10)	96,7340 (9)	.	.	10	2	X	
	121	121,1154 (12)	121,1155 (11)	.	.	10	1	X	
	136	136,0001 (6)	136,0001 (6)	.	.	4,7	1	X	
	198	198,6058 (13)	198,6060 (12)	.	.	7	1	X	
	264	264,6576 (10)	264,6576 (9)	.	.	3,7	2	X	
	279	279,5422 (12)	279,5422 (10)	.	.	4,2	1	X	
	303	303,9236 (11)	303,9236 (10)	.	.	3,7	1	X	
	400	400,6572 (8)	400,6572 (8)	.	.	2,1	3	X	

Nuclídeo	Gama (keV)	Energia MMQ 86 <sup>(a)</sup> (keV)	Energia ref. 1 (keV)	Dif. valor <sup>(b)</sup>	Dif. incerteza <sup>(c)</sup>	$\frac{\sigma_{E_{MMQ}}}{E_{MMQ}}$ (x10 <sup>6</sup> )	[D] <sup>(d)</sup>	[S] <sup>(e)</sup>	[R] <sup>(f)</sup>
82-Br	221	221,4793 (22)	221,4788 (18)	.	.	10	2	X	
	554	554,3477 (18)	554,3460 (30)	.	>	3,2	1	X	
	619	619,1027 (16)	619,1040 (30)	.	>	2,6	2	X	
	698	698,3719 (16)	698,3680 (30)	<!	>	2,3	4	X	
	776	776,5140 (22)	776,5130 (40)	.	>	2,8	3	X	
	827	827,8244 (22)	827,8200 (50)	<	>!	2,7	4	X	
	1044	1043,9939 (26)	1043,9930 (50)	.	>	2,4	4	X	
	1317	1317,4689 (22)	1317,4660 (40)	<	>	1,7	1	X	
	1474	1474,8788 (28)	1474,8740 (50)	<	>	1,9	1	X	
	1650	1650,332 (3)	1650,328 (5)	<	>	2,1		X	
84-Rb	881	881,6066 (16)	881,6041 (16)	<!	.	1,8	3	X	
	1016	1016,160 (4)	1016,158 (11)	.	>!	3,8	2	X	
	1897	1897,756 (4)	1897,751 (11)	<	>!	2,2	4	X	
85-Sr	514	514,0048 (24)	514,0048 (22)			4,8		1	
88-Y	898	898,0365 (27)	898,0360 (40)		>	3,1	3		
	1836	1836,049 (5)	1836,052 (13)	.	>!	3,0	6		
94-Nb	702	702,6446 (13)	702,6390 (40)	<!	>!	1,8	9		
	871	871,1161 (15)	871,1140 (30)	<	>	1,8	9		
95-Tc	204	204,1173 (16)	204,1161 (17)	.	.	8	5	X	
	253	253,0715 (22)	253,0700 (30)	.	>	9	2	X	
	582	582,0787 (18)	582,0775 (21)	.	.	3,2	4	X	
	765	765,804 (6)	765,803 (6)		.	8	1		
	786	786,1947 (22)	786,1922 (27)	<	.	2,8	1	X	
	820	820,6249 (29)	820,6220 (70)	<	>!	3,5	2		
	835	835,1485 (21)	835,1460 (60)	<	>!	2,5	3	X	
	1039	1039,2640 (24)	1039,2600 (60)	<	>!	2,3	3	X	
95-Zr	724	724,1956 (28)	724,1930 (30)	.	.	3,8	1		
99-Mo	40	40,58323 (15)	40,58323 (17)		.	3,7	1	1	
	140	140,5105 (12)	140,5110 (10)	.	.	9	1		
106-Ru	511	511,8534 (26)	511,8534 (23)		.	5,0	1		
108-Ag	433	433,939 (3)	433,937 (4)	.	.	8	5		
	614	614,2813 (14)	614,2760 (40)	<!	>!	2,3	6		
	721	722,890 (3)	722,907 (10)	>!	>!	4,6	2		
	723	722,926 (3)	722,907 (10)	<!	>!	4,6	2		
	88	88,0336 (11)	88,0336 (10)		.	13	1		
110-Ag	446	446,8149 (20)	446,8120 (30)	<	>	4,4	2	3	X
	620	620,3566 (14)	620,3553 (17)	.	.	2,3	2	4	X
	657	657,7600 (11)	657,7600 (11)		.	1,7	2	10	X
	677	677,6211 (12)	677,6217 (12)	.	.	1,7	2	12	X
	687	687,0106 (15)	687,0091 (18)	<	.	2,1	1	8	X
	706	706,6780 (12)	706,6760 (15)	<!	.	1,7	2	15	X
	744	744,2751 (15)	744,2755 (18)	.	.	2,0	1	10	X
	763	763,9425 (15)	763,9424 (17)		.	2,0	2	7	X
	818	818,0246 (16)	818,0244 (18)		.	1,9	1	9	X
	884	884,6785 (15)	884,6781 (13)	.	.	1,7	1	16	X
937	937,4837 (21)	937,4850 (30)	.	.	>	2,3	2	7	X
1384	1384,2945 (18)	1384,2931 (20)	.	.	.	1,3	2	7	X
1475	1475,7793 (21)	1475,7792 (23)		.	.	1,4	4	X	
1505	1505,0297 (20)	1505,0280 (20)	.	.	.	1,4	1	2	X
1562	1562,2937 (21)	1562,2940 (18)		.	.	1,3	1	X	
113-Sn	391	391,6982 (35)	391,6980 (30)		.	9	1		

Nuclídeo	Gama (keV)	Energia MMQ 86 <sup>(a)</sup> (keV)	Energia ref. 1 (keV)	Dif. valor <sup>(b)</sup>	Dif. incerteza <sup>(c)</sup>	$\frac{\sigma_{E_{MMQ}}}{E_{MMQ}}$ ( $\times 10^3$ )	[D] <sup>(d)</sup>	[S] <sup>(e)</sup>	[R] <sup>(f)</sup>
124-Sb	602	602,7269 (21)	602,7260 (23)	.	.	3,5	1	X	
	645	645,8504 (14)	645,8520 (19)	>	>	2,2	2	X	
	713	713,7776 (27)	713,7760 (40)	.	>	3,8	1	X	
	722	722,7834 (16)	722,7820 (30)	.	>	2,2	4	X	
	790	790,710 (4)	790,706 (7)	<	>	4,6			X
	968	968,1904 (26)	968,1950 (40)	>!	>	2,7	2	X	
	1045	1045,1231 (27)	1045,1250 (40)	.	>	2,5	2	X	
	1325	1325,5066 (27)	1325,5040 (40)	.	>	2,1	2	X	
	1368	1368,163 (5)	1368,157 (5)	<!		4,0	2	X	
	1436	1436,556 (4)	1436,554 (7)	.	>	2,7	2	X	
	1690	1690,9677 (30)	1690,9710 (40)	>	>	1,8	6	X	
	1720	1720,41 (7)	1720,41 (6)			41	1		
	2090	2090,938 (6)	2090,930 (7)	<!		2,8			X
	176	176,3132 (10)	176,3140 (20)	.	>!	5	2		
125-Sb	204	204,137 (11)	204,138 (10)			52	1		
	208	208,076 (4)	208,077 (5)	.	>	17	3	X	
	427	427,876 (4)	427,874 (4)	.		8	1	X	
	443	443,557 (10)	443,555 (9)	.		21	1		
	463	463,367 (4)	463,365 (4)	.		8	1	X	
	600	600,5999 (15)	600,5970 (20)	<!	>	2,5	3		
	606	606,7172 (23)	606,7130 (30)	<!	>	3,8	2		
	635	635,9512 (13)	635,9500 (30)	.	>!	2,1	2	X	
	671	671,4421 (19)	671,4410 (60)	.	>!	2,9	1	X	
	1806	1806,687 (11)	1806,690 (16)	.	>	6	1		
125-Sn	1889	1889,881 (11)	1889,884 (16)	.	>	6	1		
	2002	2002,157 (5)	2002,134 (12)	<!	>!	2,4	5		
	2201	2201,008 (13)	2201,002 (12)	.		6	1		
	2275	2275,755 (11)	2275,748 (10)	.		4,6	1		
	667	667,7159 (13)	667,7140 (20)	<	>	2,0	2	X	
132-Cs	1317	1317,923 (5)	1317,918 (6)	.	>	3,6	1	X	
	1985	1985,631 (5)	1985,625 (6)	<!		2,6	1	X	
	53	53,1621 (7)	53,1622 (6)			13	3	X	
133-Ba	79	79,6144 (14)	79,6142 (12)			17	2	X	
	80	80,9967 (10)	80,9979 (11)	>!		12	4	X	
	160	160,6110 (17)	160,6120 (16)	.		10	1	X	
	223	223,2369 (14)	223,2368 (13)			6	1	X	
	276	276,3989 (14)	276,3989 (12)			5,0	4	X	
	302	302,8512 (6)	302,8508 (5)	.		2,0	4	X	
	356	356,0131 (7)	356,0129 (7)	.		2,0	4	X	
	383	383,8476 (11)	383,8485 (12)	.		2,9	4	X	
	661	661,6570 (11)	661,6570 (30)		>!	1,6	1	16	
	165	165,8556 (9)	165,8575 (11)	>!		6	1	4	
141-Ce	145	145,4437 (13)	145,4433 (14)	.		9	1	2	
144-Ce	696	696,5097 (13)	696,5050 (40)	<!	>!	1,9	4	X	
	1489	1489,1488 (28)	1489,1480 (30)	.		1,9	3	X	
	2185	2185,651 (3)	2185,645 (5)	<!	>	1,5	8	X	

Nuclídeo	Gama (keV)	Energia MMQ 86 <sup>(a)</sup> (keV)	Energia ref. 1 (keV)	Dif. valor <sup>(b)</sup>	Dif. incerteza <sup>(c)</sup>	$\frac{\sigma_{E_{MMQ}}}{E_{MMQ}}$ (x10 <sup>-6</sup> )	[D] <sup>(d)</sup>	[S] <sup>(e)</sup>	[R] <sup>(f)</sup>
152-Eu	121	121,78167 (32)	121,78170 (30)			2,7	1		X
	244	244,6975 (8)	244,6974 (8)			3,5	1	3	X
	251	251,633 (11)	251,633 (10)			44		1	
	295	295,9388 (19)	295,9387 (17)			6		2	X
	344	344,2778 (9)	344,2785 (12)		>	2,6	1	3	X
	367	367,7892 (18)	367,7891 (20)			5,0	1	2	X
	411	411,1164 (11)	411,1165 (12)			2,7	1	3	X
	488	488,6788 (22)	488,6792 (20)			4,5		1	X
	503	503,473 (5)	503,474 (5)			9		1	X
	566	566,441 (6)	566,442 (5)			10		2	X
	586	586,2647 (23)	586,2648 (26)			4,0		2	X
	656	656,489 (5)	656,489 (5)			7		1	
	671	671,155 (19)	671,155 (17)			28		1	
	678	678,621 (4)	678,623 (5)			6		1	X
	688	688,674 (4)	688,670 (5)		>	6		1	X
	778	778,9045 (21)	778,9045 (24)			2,7	1		X
	810	810,455 (4)	810,451 (5)		>	4,8		1	X
	841	841,574 (6)	841,574 (5)			7		1	X
	867	867,3792 (36)	867,3800 (30)			4,2		1	X
	919	919,336 (4)	919,337 (4)			4,5		1	X
	1085	1085,834 (11)	1085,837 (10)			10		1	
	1089	1089,735 (4)	1089,737 (5)			3,8		1	X
	1112	1112,0752 (36)	1112,0760 (30)			3,3		1	X
	1212	1212,946 (12)	1212,948 (11)			10		1	X
	1299	1299,144 (8)	1299,142 (8)			6		1	
	1408	1408,0117 (35)	1408,0130 (30)			2,5		1	X
	1457	1457,641 (12)	1457,643 (11)			9		1	X
153-Gd	69	69,67298 (15)	69,67300 (13)			2,1	1		X
	75	75,42213 (26)	75,42213 (23)			3,4	1		X
	83	83,36717 (23)	83,36717 (21)			2,7	1		X
	89	89,48595 (24)	89,48595 (22)			2,7	1		X
	97	97,43099 (24)	97,43100 (21)			2,4	1		X
	103	103,18013 (20)	103,18012 (17)			1,9	1	1	X
	172	172,85306 (22)	172,85307 (21)			1,3	1		X
154-Eu	123	123,0703 (10)	123,0706 (9)			8		2	X
	247	247,9285 (9)	247,9288 (7)			3,5		2	X
	444	444,4937 (20)	444,4924 (19)			4,4		2	X
	591	591,7606 (27)	591,7550 (30)	<!		4,6		1	X
	625	625,2589 (22)	625,2556 (24)	<!		3,6		2	X
	692	692,4215 (18)	692,4205 (18)			2,6		4	X
	723	723,3033 (20)	723,3014 (22)			2,8		2	X
	756	756,8017 (26)	756,8020 (23)			3,5		2	X
	845	845,417 (8)	845,416 (7)			9		1	
	873	873,1864 (22)	873,1834 (23)	<!		2,5		2	X
	892	892,775 (6)	892,775 (6)			7		2	X
	904	904,0682 (26)	904,0640 (30)	<!		2,9		3	X
	996	996,2560 (23)	996,2590 (42)	>	>	2,3		1	X
	1128	1128,550 (8)	1128,552 (7)			7		3	
	1140	1140,702 (6)	1140,702 (6)			6		2	X
	1246	1246,122 (5)	1246,121 (4)		<	4,1		1	X
	1274	1274,431 (4)	1274,429 (4)			3,2		2	
	1494	1494,048 (5)	1494,048 (5)			3,4		2	X
	1596	1596,4853 (28)	1596,4804 (28)	<!		1,8		1	X

Nuclídeo	Gama (keV)	Energia MMQ 86 <sup>(a)</sup> (keV)	Energia ref. 1 (keV)	Dif. valor <sup>(b)</sup>	Dif. incerteza <sup>(c)</sup>	$\frac{\sigma_{E_{MMQ}}}{E_{MMQ}}$ ( $\times 10^6$ )	[D] <sup>(d)</sup>	[S] <sup>(e)</sup>	[R] <sup>(f)</sup>
160-Tb	86	86,78768 (37)	86,78770 (30)			4,2	1		X
	93	93,922 (5)	93,919 (6)		>	49	1		X
	197	197,0341 (11)	197,0341 (10)			6	1	1	
	215	215,6452 (11)	215,6452 (11)			5	1	2	X
	298	298,5785 (16)	298,5783 (17)			5	1		X
	879	879,3746 (15)	879,3780 (20)	>!	>	1,7		7	X
	962	962,3075 (22)	962,3110 (30)	>!	>	2,3			X
	966	966,1618 (15)	966,1660 (20)	>!	>	1,6			X
	1177	1177,9514 (19)	1177,9540 (30)	>	>	1,6		2	X
	1271	1271,872 (5)	1271,873 (5)			3,6		1	X
161-Tb	25	25,651321 (31)	25,651350 (30)			1,2	1	2	X
	48	48,91528 (5)	48,91533 (5)	>		1,1	4	2	X
	57	57,19168 (34)	57,19170 (30)			6		1	
	74	74,56659 (8)	74,56669 (6)	>!	<	1,1	1	4	X
169-Yb	63	63,12043 (4)	63,12044 (4)			0,6	2		X
	93	93,61445 (7)	93,61447 (8)			0,8	3		
	109	109,77923 (5)	109,77924 (4)		<	0,49	3		X
	118	118,18940 (12)	118,18940 (14)			1,0	3		X
	130	130,52293 (6)	130,52293 (6)			0,43	3		X
	177	177,21303 (8)	177,21307 (7)			0,43	4		X
	197	197,95672 (8)	197,95675 (8)			0,42	8		X
	261	261,07708 (11)	261,07712 (10)			0,42	3		X
	307	307,73581 (12)	307,73586 (12)			0,39	5		X
	170-Tm	84	84,25463 (7)	84,25474 (8)	>!	0,9	4		
172-Hf	23	23,93292 (22)	23,93300 (20)			9		2	
	81	81,7513 (5)	81,7509 (5)			6		3	
172-Lu	78	78,7424 (5)	78,7422 (6)			6		2	
	90	90,6436 (7)	90,6434 (19)		>!	7		2	
182-Ta	31	31,7373 (5)	31,7377 (6)		>	14	1		X
	42	42,7147 (3)	42,7148 (4)			8	1		X
	65	65,72219 (14)	65,72215 (15)			2,1	2		X
	67	67,74975 (7)	67,74970 (10)		>	1,1	5		X
	84	84,68018 (25)	84,68024 (26)			2,9	1	3	X
	100	100,10593 (8)	100,10595 (7)			0,8	1	2	X
	113	113,67163 (22)	113,67170 (22)			1,9	2	1	X
	116	116,4175 (5)	116,4179 (6)			4,4	1	1	X
	152	152,42990 (25)	152,42991 (26)			1,6	2	1	X
	156	156,38627 (30)	156,38640 (30)			1,9	2		X
	179	179,39378 (24)	179,39381 (25)			1,4	2	1	X
	198	198,35176 (28)	198,35187 (29)			1,4	2	3	X
	222	222,10840 (31)	222,10850 (30)			1,4	2	1	X
	229	229,3205 (6)	229,3207 (6)			2,7	2	1	
	264	264,07388 (30)	264,07400 (30)			1,2	2	3	X
	1121	1121,2882 (20)	1121,2900 (30)		>	1,8	4		X
	1157	1157,3005 (20)	1157,3020 (30)		>	1,7			X
	1189	1189,0375 (20)	1189,0400 (30)	>	>	1,7		4	X
	1221	1221,3935 (20)	1221,3950 (30)		>	1,6		2	X
	1231	1231,0028 (20)	1231,0040 (30)		>	1,6		2	X
	1257	1257,4057 (20)	1257,4070 (30)		>	1,6		2	X
	1273	1273,7171 (20)	1273,7190 (30)		>	1,6			X
	1289	1289,1428 (20)	1289,1450 (30)	>	>	1,5			X
	1373	1373,8223 (20)	1373,8240 (30)		>	1,5		1	X
	1387	1387,3879 (20)	1387,3900 (30)	>	>	1,4			X

Nuclídeo	Gama (keV)	Energia MMQ 86 <sup>(a)</sup> (keV)	Energia ref. 1 (keV)	Dif. valor <sup>(b)</sup>	Dif. incerteza <sup>(c)</sup>	$\frac{\sigma_{E_{MMQ}}}{E_{MMQ}}$ ( $\times 10^6$ )	[D] <sup>(d)</sup>	[S] <sup>(e)</sup>	[R] <sup>(f)</sup>
185-Os	125	125,3584 (9)	125,3581 (9)	.	.	7	2	X	
	162	162,8487 (22)	162,8520 (30)	>!	>	13	1	X	
	234	234,1547 (22)	234,1560 (40)	.	>	9	1	X	
	592	592,0747 (17)	592,0722 (22)	<!	>	2,9	5	X	
	646	646,1268 (14)	646,1270 (40)	.	>!	2,2	4	X	
	717	717,4326 (16)	717,4298 (24)	<!	>	2,2	5	X	
	874	874,8248 (27)	874,8260 (40)	.	>	3,1	4		
	880	880,2806 (19)	880,2816 (27)	.	>	2,1	6	X	
	136	136,34281 (22)	136,34257 (26)	<	.	1,6	2		X
192-Ir	205	205,79432 (20)	205,79430 (9)	.	<!	1,0	4		
	295	295,95655 (15)	295,95650 (15)	.	.	0,49	6	4	X
	308	308,45516 (18)	308,45507 (17)	.	.	0,6	6	3	X
	316	316,50609 (15)	316,50618 (17)	.	.	0,46	7	4	X
	416	416,4696 (5)	416,4688 (7)	<!	>	1,2	2		X
	468	468,06875 (23)	468,06885 (26)	.	.	0,50	8	3	X
	484	484,5752 (4)	484,5751 (4)	.	.	0,9	3	2	
	588	588,5817 (5)	588,5810 (7)	<	>	0,9	5	8	X
	604	604,41120 (28)	604,41105 (25)	.	.	0,46	6	4	X
	612	612,46212 (26)	612,46215 (26)	.	.	0,43	6	4	X
	884	884,5372 (6)	884,5365 (7)	<!	.	0,6	1	6	X
	411	411,80198 (17)	411,80205 (17)	.	.	0,40	137	2	X
198-Au	675	675,8836 (7)	675,8836 (7)	.	.	1,1	2	2	X
	1087	1087,6841 (8)	1087,6842 (7)	.	.	0,7	5		X
	49	49,82634 (11)	49,82635 (12)	.	.	2,2	1		X
199-Au	158	158,37848 (10)	158,37851 (10)	.	.	0,6	1	1	X
	208	208,20478 (12)	208,20481 (12)	.	.	0,6	1	1	X
203-Hg	279	279,1949 (10)	279,1952 (10)	.	.	3,5	2	2	X
203-Pb	401	401,3208 (27)	401,3200 (30)	.	.	7	1		X
	680	680,5151 (27)	680,5150 (30)	.	.	4,0	2		X
	569	569,7005 (15)	569,6980 (20)	<!	>	2,6	4		
207-Bi	1063	1063,6534 (24)	1063,6560 (30)	>	>	2,2	4		
	1770	1770,218 (7)	1770,228 (9)	>!	>	3,8	2		
	46	46,5394 (10)	46,5390 (10)	.	.	22	2		
228-Th	583	583,1874 (23)	583,1870 (20)	.	.	3,9	2		
	2614	2614,513 (11)	2614,511 (10)	.	.	4,1	1		
241-Am	26	26,34463 (22)	26,34460 (20)	.	.	8	2		
	59	59,54080 (12)	59,54090 (10)	.	.	2,0	3		

(a) Resultados usando o procedimento desenvolvido neste trabalho

(b) Indicador de que as diferenças nos valores recomendados é superior à menor das incertezas, ou que a maior das incertezas (quando acompanhado do ponto de exclamação).

(c) Indicador de que as incertezas atribuídas diferem de mais de 25% da menor das incertezas. O ponto de exclamação indica diferenças nas incertezas atribuídas superior a menor delas.

(d) Número de informações experimentais de medidas baseadas em difração.

(e) Número de informações experimentais de medidas em detectores semicondutores

(f) Indica se o gama está envolvido em relações baseadas nos esquemas de decaimento.

**Tabela A.2 - Principais correlações entre energias de raios gama quando considerando as constantes fundamentais do CODATA 86.**

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho_{1,2}$	Mesmo nuclídeo	Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho_{1,2}$	Mesmo nuclídeo
78 keV (44-Ti)	67 keV (44-Ti)	0.43	X	2598 keV (56-Co)	1771 keV (56-Co)	0.36	X
896 keV (56-Co)	733 keV (56-Co)	0.35	X	2598 keV (56-Co)	1810 keV (56-Co)	0.79	X
1140 keV (56-Co)	896 keV (56-Co)	0.72	X	2598 keV (56-Co)	1963 keV (56-Co)	0.35	X
1140 keV (56-Co)	977 keV (56-Co)	0.49	X	2598 keV (56-Co)	2113 keV (56-Co)	0.36	X
1159 keV (56-Co)	896 keV (56-Co)	0.64	X	2598 keV (56-Co)	2212 keV (56-Co)	0.47	X
1159 keV (56-Co)	996 keV (56-Co)	0.53	X	3009 keV (56-Co)	733 keV (56-Co)	0.63	X
1159 keV (56-Co)	1140 keV (56-Co)	0.65	X	3009 keV (56-Co)	896 keV (56-Co)	0.43	X
1238 keV (56-Co)	1175 keV (56-Co)	0.56	X	3009 keV (56-Co)	1037 keV (56-Co)	0.59	X
1640 keV (56-Co)	787 keV (56-Co)	0.47	X	3009 keV (56-Co)	1175 keV (56-Co)	0.37	X
1640 keV (56-Co)	1037 keV (56-Co)	0.37	X	3009 keV (56-Co)	1238 keV (56-Co)	0.64	X
1640 keV (56-Co)	1175 keV (56-Co)	0.55	X	3009 keV (56-Co)	1640 keV (56-Co)	0.38	X
1640 keV (56-Co)	1238 keV (56-Co)	0.41	X	3009 keV (56-Co)	1771 keV (56-Co)	0.87	X
1640 keV (56-Co)	1360 keV (56-Co)	-0.37	X	3009 keV (56-Co)	1810 keV (56-Co)	0.47	X
1771 keV (56-Co)	733 keV (56-Co)	0.73	X	3009 keV (56-Co)	1963 keV (56-Co)	0.33	X
1771 keV (56-Co)	896 keV (56-Co)	0.41	X	3009 keV (56-Co)	2015 keV (56-Co)	0.46	X
1771 keV (56-Co)	1037 keV (56-Co)	0.68	X	3009 keV (56-Co)	2034 keV (56-Co)	0.37	X
1771 keV (56-Co)	1360 keV (56-Co)	0.33	X	3009 keV (56-Co)	2113 keV (56-Co)	0.41	X
1810 keV (56-Co)	787 keV (56-Co)	-0.36	X	3009 keV (56-Co)	2212 keV (56-Co)	0.65	X
1810 keV (56-Co)	1175 keV (56-Co)	0.31	X	3009 keV (56-Co)	2598 keV (56-Co)	0.58	X
1810 keV (56-Co)	1238 keV (56-Co)	0.47	X	3201 keV (56-Co)	1037 keV (56-Co)	0.30	X
1810 keV (56-Co)	1360 keV (56-Co)	0.66	X	3201 keV (56-Co)	1175 keV (56-Co)	0.33	X
1810 keV (56-Co)	1640 keV (56-Co)	-0.37	X	3201 keV (56-Co)	1238 keV (56-Co)	0.53	X
1963 keV (56-Co)	1360 keV (56-Co)	0.32	X	3201 keV (56-Co)	1771 keV (56-Co)	0.34	X
1963 keV (56-Co)	1771 keV (56-Co)	0.31	X	3201 keV (56-Co)	1810 keV (56-Co)	0.41	X
2015 keV (56-Co)	977 keV (56-Co)	0.85	X	3201 keV (56-Co)	1963 keV (56-Co)	0.92	X
2015 keV (56-Co)	1037 keV (56-Co)	0.63	X	3201 keV (56-Co)	2015 keV (56-Co)	0.37	X
2015 keV (56-Co)	1140 keV (56-Co)	0.54	X	3201 keV (56-Co)	2034 keV (56-Co)	0.37	X
2015 keV (56-Co)	1771 keV (56-Co)	0.49	X	3201 keV (56-Co)	2113 keV (56-Co)	0.53	X
2015 keV (56-Co)	1963 keV (56-Co)	0.36	X	3201 keV (56-Co)	2212 keV (56-Co)	0.43	X
2034 keV (56-Co)	977 keV (56-Co)	0.31	X	3201 keV (56-Co)	2598 keV (56-Co)	0.53	X
2034 keV (56-Co)	996 keV (56-Co)	0.86	X	3201 keV (56-Co)	3009 keV (56-Co)	0.53	X
2034 keV (56-Co)	1037 keV (56-Co)	0.42	X	3253 keV (56-Co)	977 keV (56-Co)	0.77	X
2034 keV (56-Co)	1159 keV (56-Co)	0.55	X	3253 keV (56-Co)	1037 keV (56-Co)	0.58	X
2034 keV (56-Co)	1771 keV (56-Co)	0.37	X	3253 keV (56-Co)	1140 keV (56-Co)	0.54	X
2034 keV (56-Co)	1963 keV (56-Co)	0.36	X	3253 keV (56-Co)	1175 keV (56-Co)	0.32	X
2034 keV (56-Co)	2015 keV (56-Co)	0.46	X	3253 keV (56-Co)	1238 keV (56-Co)	0.55	X
2113 keV (56-Co)	896 keV (56-Co)	-0.65	X	3253 keV (56-Co)	1640 keV (56-Co)	0.37	X
2113 keV (56-Co)	1140 keV (56-Co)	-0.53	X	3253 keV (56-Co)	1771 keV (56-Co)	0.49	X
2113 keV (56-Co)	1159 keV (56-Co)	-0.49	X	3253 keV (56-Co)	1810 keV (56-Co)	0.39	X
2113 keV (56-Co)	1238 keV (56-Co)	0.33	X	3253 keV (56-Co)	1963 keV (56-Co)	0.37	X
2113 keV (56-Co)	1771 keV (56-Co)	0.31	X	3253 keV (56-Co)	2015 keV (56-Co)	0.91	X
2113 keV (56-Co)	1963 keV (56-Co)	0.47	X	3253 keV (56-Co)	2034 keV (56-Co)	0.46	X
2113 keV (56-Co)	2015 keV (56-Co)	0.34	X	3253 keV (56-Co)	2113 keV (56-Co)	0.43	X
2113 keV (56-Co)	2034 keV (56-Co)	0.36	X	3253 keV (56-Co)	2212 keV (56-Co)	0.61	X
2212 keV (56-Co)	1037 keV (56-Co)	0.69	X	3253 keV (56-Co)	2598 keV (56-Co)	0.49	X
2212 keV (56-Co)	1175 keV (56-Co)	0.75	X	3253 keV (56-Co)	3009 keV (56-Co)	0.66	X
2212 keV (56-Co)	1238 keV (56-Co)	0.48	X	3253 keV (56-Co)	3201 keV (56-Co)	0.53	X
2212 keV (56-Co)	1640 keV (56-Co)	0.64	X	3272 keV (56-Co)	977 keV (56-Co)	0.30	X
2212 keV (56-Co)	1771 keV (56-Co)	0.53	X	3272 keV (56-Co)	996 keV (56-Co)	0.78	X
2212 keV (56-Co)	1810 keV (56-Co)	0.38	X	3272 keV (56-Co)	1037 keV (56-Co)	0.41	X
2212 keV (56-Co)	2015 keV (56-Co)	0.48	X	3272 keV (56-Co)	1159 keV (56-Co)	0.56	X
2212 keV (56-Co)	2034 keV (56-Co)	0.37	X	3272 keV (56-Co)	1175 keV (56-Co)	0.33	X
2212 keV (56-Co)	2113 keV (56-Co)	0.33	X	3272 keV (56-Co)	1238 keV (56-Co)	0.54	X
2598 keV (56-Co)	1175 keV (56-Co)	0.40	X	3272 keV (56-Co)	1640 keV (56-Co)	0.31	X
2598 keV (56-Co)	1238 keV (56-Co)	0.59	X	3272 keV (56-Co)	1771 keV (56-Co)	0.39	X
2598 keV (56-Co)	1360 keV (56-Co)	0.84	X	3272 keV (56-Co)	1810 keV (56-Co)	0.37	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho_{1,2}$	Mesmo nuclídeo	Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho_{1,2}$	Mesmo nuclídeo
3272 keV (56-Co)	1963 keV (56-Co)	0.37	X	2751 keV (66-Ga)	1898 keV (66-Ga)	0.52	X
3272 keV (56-Co)	2015 keV (56-Co)	0.45	X	2751 keV (66-Ga)	1918 keV (66-Ga)	0.93	X
3272 keV (56-Co)	2034 keV (56-Co)	0.92	X	2751 keV (66-Ga)	2066 keV (66-Ga)	0.59	X
3272 keV (56-Co)	2113 keV (56-Co)	0.44	X	2751 keV (66-Ga)	2189 keV (66-Ga)	0.55	X
3272 keV (56-Co)	2212 keV (56-Co)	0.51	X	2751 keV (66-Ga)	2213 keV (66-Ga)	0.32	X
3272 keV (56-Co)	2598 keV (56-Co)	0.48	X	2751 keV (66-Ga)	2423 keV (66-Ga)	0.35	X
3272 keV (56-Co)	3009 keV (56-Co)	0.58	X	2780 keV (66-Ga)	1741 keV (66-Ga)	0.99	X
3272 keV (56-Co)	3201 keV (56-Co)	0.53	X	3047 keV (66-Ga)	1148 keV (66-Ga)	0.73	X
3272 keV (56-Co)	3253 keV (56-Co)	0.61	X	3047 keV (66-Ga)	1898 keV (66-Ga)	0.40	X
3451 keV (56-Co)	1037 keV (56-Co)	0.55	X	3047 keV (66-Ga)	1918 keV (66-Ga)	0.33	X
3451 keV (56-Co)	1175 keV (56-Co)	0.78	X	3047 keV (66-Ga)	2189 keV (66-Ga)	0.53	X
3451 keV (56-Co)	1238 keV (56-Co)	0.78	X	3047 keV (66-Ga)	2213 keV (66-Ga)	0.98	X
3451 keV (56-Co)	1640 keV (56-Co)	0.64	X	3047 keV (66-Ga)	2751 keV (66-Ga)	0.38	X
3451 keV (56-Co)	1771 keV (56-Co)	0.45	X	3228 keV (66-Ga)	1963 keV (56-Co)	0.80	
3451 keV (56-Co)	1810 keV (56-Co)	0.48	X	3228 keV (66-Ga)	3201 keV (56-Co)	0.87	
3451 keV (56-Co)	2015 keV (56-Co)	0.41	X	3228 keV (66-Ga)	1418 keV (66-Ga)	0.38	
3451 keV (56-Co)	2034 keV (56-Co)	0.33	X	3228 keV (66-Ga)	1898 keV (66-Ga)	0.54	
3451 keV (56-Co)	2113 keV (56-Co)	0.38	X	3228 keV (66-Ga)	1918 keV (66-Ga)	0.61	
3451 keV (56-Co)	2212 keV (56-Co)	0.92	X	3228 keV (66-Ga)	2066 keV (66-Ga)	0.36	
3451 keV (56-Co)	2598 keV (56-Co)	0.59	X	3228 keV (66-Ga)	2189 keV (66-Ga)	0.88	
3451 keV (56-Co)	3009 keV (56-Co)	0.75	X	3228 keV (66-Ga)	2213 keV (66-Ga)	0.49	
3451 keV (56-Co)	3201 keV (56-Co)	0.54	X	3228 keV (66-Ga)	2751 keV (66-Ga)	0.62	
3451 keV (56-Co)	3253 keV (56-Co)	0.67	X	3228 keV (66-Ga)	3047 keV (66-Ga)	0.50	
3451 keV (56-Co)	3272 keV (56-Co)	0.60	X	3380 keV (66-Ga)	1508 keV (66-Ga)	0.87	
1291 keV (59-Fe)	1274 keV (22-Na)	0.78		3380 keV (66-Ga)	2393 keV (66-Ga)	0.33	
1291 keV (59-Fe)	192 keV (59-Fe)	0.65	X	3380 keV (66-Ga)	3228 keV (66-Ga)	0.34	
1291 keV (59-Fe)	1099 keV (59-Fe)	0.65	X	3422 keV (66-Ga)	3380 keV (66-Ga)	0.38	
1148 keV (66-Ga)	853 keV (66-Ga)	0.38	X	3432 keV (66-Ga)	2393 keV (66-Ga)	0.93	
1190 keV (66-Ga)	686 keV (66-Ga)	0.39	X	3432 keV (66-Ga)	3228 keV (66-Ga)	0.33	
1418 keV (66-Ga)	1333 keV (66-Ga)	-0.45	X	3432 keV (66-Ga)	3380 keV (66-Ga)	0.39	
1898 keV (66-Ga)	853 keV (66-Ga)	-0.71	X	3432 keV (66-Ga)	3422 keV (66-Ga)	0.32	
1898 keV (66-Ga)	1148 keV (66-Ga)	-0.34	X	3766 keV (66-Ga)	2933 keV (66-Ga)	0.98	
1898 keV (66-Ga)	1418 keV (66-Ga)	0.33	X	4085 keV (66-Ga)	1148 keV (66-Ga)	0.67	
1918 keV (66-Ga)	1963 keV (56-Co)	0.72		4085 keV (66-Ga)	1898 keV (66-Ga)	0.42	
1918 keV (66-Ga)	3201 keV (56-Co)	0.70		4085 keV (66-Ga)	1918 keV (66-Ga)	0.36	
1918 keV (66-Ga)	1333 keV (66-Ga)	0.36	X	4085 keV (66-Ga)	2189 keV (66-Ga)	0.46	
1918 keV (66-Ga)	1418 keV (66-Ga)	0.60	X	4085 keV (66-Ga)	2213 keV (66-Ga)	0.94	
1918 keV (66-Ga)	1898 keV (66-Ga)	0.52	X	4085 keV (66-Ga)	2751 keV (66-Ga)	0.42	
2066 keV (66-Ga)	686 keV (66-Ga)	-0.70	X	4085 keV (66-Ga)	3047 keV (66-Ga)	0.96	
2066 keV (66-Ga)	1190 keV (66-Ga)	-0.40	X	4085 keV (66-Ga)	3228 keV (66-Ga)	0.57	
2066 keV (66-Ga)	1418 keV (66-Ga)	0.40	X	4461 keV (66-Ga)	1039 keV (66-Ga)	0.41	
2066 keV (66-Ga)	1918 keV (66-Ga)	0.53	X	4461 keV (66-Ga)	3228 keV (66-Ga)	0.34	
2189 keV (66-Ga)	1963 keV (56-Co)	0.72		4461 keV (66-Ga)	3380 keV (66-Ga)	0.40	
2189 keV (66-Ga)	3201 keV (56-Co)	0.77		4461 keV (66-Ga)	3422 keV (66-Ga)	0.96	
2189 keV (66-Ga)	1418 keV (66-Ga)	0.34	X	4461 keV (66-Ga)	3432 keV (66-Ga)	0.36	
2189 keV (66-Ga)	1508 keV (66-Ga)	0.33	X	4806 keV (66-Ga)	1039 keV (66-Ga)	0.36	
2189 keV (66-Ga)	1898 keV (66-Ga)	0.50	X	4806 keV (66-Ga)	2933 keV (66-Ga)	0.94	
2189 keV (66-Ga)	1918 keV (66-Ga)	0.55	X	4806 keV (66-Ga)	3766 keV (66-Ga)	0.96	
2189 keV (66-Ga)	2066 keV (66-Ga)	0.32	X	4806 keV (66-Ga)	4461 keV (66-Ga)	0.32	
2213 keV (66-Ga)	1148 keV (66-Ga)	0.71	X	198 keV (75-Se)	66 keV (75-Se)	-0.66	X
2213 keV (66-Ga)	1898 keV (66-Ga)	0.40	X	198 keV (75-Se)	136 keV (75-Se)	-0.38	X
2213 keV (66-Ga)	1918 keV (66-Ga)	0.35	X	264 keV (75-Se)	121 keV (75-Se)	0.31	X
2213 keV (66-Ga)	2189 keV (66-Ga)	0.53	X	264 keV (75-Se)	136 keV (75-Se)	-0.51	X
2393 keV (66-Ga)	1508 keV (66-Ga)	0.35	X	264 keV (75-Se)	198 keV (75-Se)	0.73	X
2423 keV (66-Ga)	1190 keV (66-Ga)	0.59	X	279 keV (75-Se)	121 keV (75-Se)	-0.75	X
2423 keV (66-Ga)	1918 keV (66-Ga)	0.34	X	303 keV (75-Se)	96 keV (75-Se)	-0.68	X
2423 keV (66-Ga)	2066 keV (66-Ga)	0.47	X	303 keV (75-Se)	198 keV (75-Se)	0.32	X
2751 keV (66-Ga)	3201 keV (56-Co)	0.70		303 keV (75-Se)	264 keV (75-Se)	0.43	X
2751 keV (66-Ga)	833 keV (66-Ga)	0.31	X	400 keV (75-Se)	121 keV (75-Se)	0.41	X
2751 keV (66-Ga)	1333 keV (66-Ga)	0.39	X	400 keV (75-Se)	198 keV (75-Se)	0.56	X
2751 keV (66-Ga)	1418 keV (66-Ga)	0.64	X	400 keV (75-Se)	264 keV (75-Se)	0.76	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho_{1,2}$	Mesmo nuclídeo
400 keV (75-Se)	303 keV (75-Se)	0.57	X
827 keV (82-Br)	554 keV (82-Br)	0.32	X
1044 keV (82-Br)	554 keV (82-Br)	0.42	X
1044 keV (82-Br)	619 keV (82-Br)	0.33	X
1044 keV (82-Br)	698 keV (82-Br)	0.37	X
1044 keV (82-Br)	827 keV (82-Br)	-0.31	X
1317 keV (82-Br)	619 keV (82-Br)	0.68	X
1317 keV (82-Br)	698 keV (82-Br)	0.69	X
1317 keV (82-Br)	827 keV (82-Br)	0.39	X
1317 keV (82-Br)	1044 keV (82-Br)	0.51	X
1474 keV (82-Br)	698 keV (82-Br)	0.64	X
1474 keV (82-Br)	776 keV (82-Br)	0.83	X
1474 keV (82-Br)	1317 keV (82-Br)	0.51	X
1650 keV (82-Br)	221 keV (82-Br)	-0.60	X
1650 keV (82-Br)	554 keV (82-Br)	0.50	X
1650 keV (82-Br)	619 keV (82-Br)	0.39	X
1650 keV (82-Br)	698 keV (82-Br)	0.43	X
1650 keV (82-Br)	827 keV (82-Br)	0.43	X
1650 keV (82-Br)	1044 keV (82-Br)	0.49	X
1650 keV (82-Br)	1317 keV (82-Br)	0.60	X
1650 keV (82-Br)	1474 keV (82-Br)	0.31	X
881 keV (84-Rb)	889 keV (46-Sc)	0.80	
1897 keV (84-Rb)	881 keV (84-Rb)	0.36	X
1897 keV (84-Rb)	1016 keV (84-Rb)	0.92	X
871 keV (94-Nb)	889 keV (46-Sc)	0.72	
871 keV (94-Nb)	881 keV (84-Rb)	0.80	
582 keV (95-Tc)	253 keV (95-Tc)	-0.45	X
786 keV (95-Tc)	204 keV (95-Tc)	0.57	X
786 keV (95-Tc)	253 keV (95-Tc)	-0.41	X
786 keV (95-Tc)	582 keV (95-Tc)	0.68	X
820 keV (95-Tc)	253 keV (95-Tc)	0.43	X
835 keV (95-Tc)	253 keV (95-Tc)	0.63	X
835 keV (95-Tc)	582 keV (95-Tc)	0.41	X
835 keV (95-Tc)	820 keV (95-Tc)	0.68	X
1039 keV (95-Tc)	204 keV (95-Tc)	0.48	X
1039 keV (95-Tc)	253 keV (95-Tc)	0.54	X
1039 keV (95-Tc)	786 keV (95-Tc)	0.55	X
1039 keV (95-Tc)	820 keV (95-Tc)	0.49	X
1039 keV (95-Tc)	835 keV (95-Tc)	0.73	X
657 keV (110-Ag)	620 keV (110-Ag)	0.38	X
677 keV (110-Ag)	620 keV (110-Ag)	0.48	X
677 keV (110-Ag)	657 keV (110-Ag)	0.66	X
687 keV (110-Ag)	620 keV (110-Ag)	0.62	X
706 keV (110-Ag)	446 keV (110-Ag)	0.31	X
706 keV (110-Ag)	620 keV (110-Ag)	0.44	X
706 keV (110-Ag)	687 keV (110-Ag)	0.58	X
744 keV (110-Ag)	657 keV (110-Ag)	0.44	X
744 keV (110-Ag)	677 keV (110-Ag)	0.57	X
744 keV (110-Ag)	687 keV (110-Ag)	0.59	X
763 keV (110-Ag)	657 keV (110-Ag)	0.37	X
763 keV (110-Ag)	677 keV (110-Ag)	0.47	X
763 keV (110-Ag)	706 keV (110-Ag)	0.53	X
763 keV (110-Ag)	744 keV (110-Ag)	0.65	X
818 keV (110-Ag)	620 keV (110-Ag)	0.33	X
818 keV (110-Ag)	677 keV (110-Ag)	0.40	X
884 keV (110-Ag)	889 keV (46-Sc)	0.72	
884 keV (110-Ag)	687 keV (110-Ag)	0.31	X
884 keV (110-Ag)	706 keV (110-Ag)	0.32	X
884 keV (110-Ag)	744 keV (110-Ag)	0.46	X
884 keV (110-Ag)	763 keV (110-Ag)	0.40	X
884 keV (110-Ag)	818 keV (110-Ag)	0.66	X

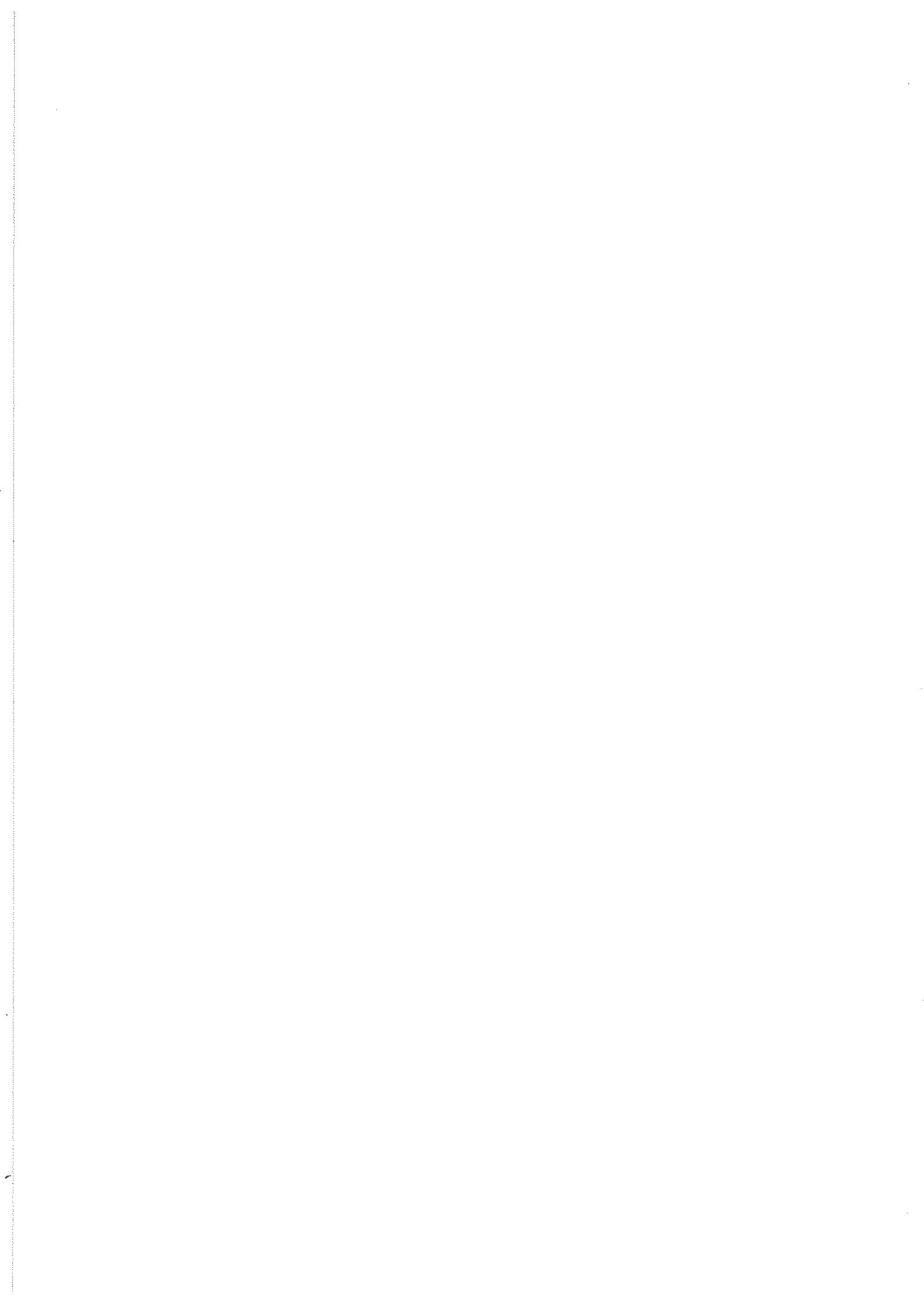
Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho_{1,2}$	Mesmo nuclídeo
937 keV (110-Ag)	446 keV (110-Ag)	-0.61	X
937 keV (110-Ag)	657 keV (110-Ag)	0.33	X
937 keV (110-Ag)	677 keV (110-Ag)	0.40	X
937 keV (110-Ag)	706 keV (110-Ag)	0.38	X
937 keV (110-Ag)	744 keV (110-Ag)	0.33	X
937 keV (110-Ag)	763 keV (110-Ag)	0.36	X
1384 keV (110-Ag)	446 keV (110-Ag)	0.38	X
1384 keV (110-Ag)	620 keV (110-Ag)	0.60	X
1384 keV (110-Ag)	657 keV (110-Ag)	0.60	X
1384 keV (110-Ag)	677 keV (110-Ag)	0.76	X
1384 keV (110-Ag)	687 keV (110-Ag)	0.54	X
1384 keV (110-Ag)	706 keV (110-Ag)	0.78	X
1384 keV (110-Ag)	744 keV (110-Ag)	0.56	X
1384 keV (110-Ag)	763 keV (110-Ag)	0.65	X
1384 keV (110-Ag)	818 keV (110-Ag)	0.36	X
1384 keV (110-Ag)	884 keV (110-Ag)	0.34	X
1384 keV (110-Ag)	937 keV (110-Ag)	0.50	X
1475 keV (110-Ag)	620 keV (110-Ag)	0.44	X
1475 keV (110-Ag)	657 keV (110-Ag)	0.71	X
1475 keV (110-Ag)	677 keV (110-Ag)	0.63	X
1475 keV (110-Ag)	818 keV (110-Ag)	0.87	X
1475 keV (110-Ag)	884 keV (110-Ag)	0.59	X
1475 keV (110-Ag)	937 keV (110-Ag)	0.36	X
1475 keV (110-Ag)	1384 keV (110-Ag)	0.57	X
1505 keV (110-Ag)	620 keV (110-Ag)	0.70	X
1505 keV (110-Ag)	657 keV (110-Ag)	0.41	X
1505 keV (110-Ag)	677 keV (110-Ag)	0.48	X
1505 keV (110-Ag)	706 keV (110-Ag)	0.65	X
1505 keV (110-Ag)	744 keV (110-Ag)	0.35	X
1505 keV (110-Ag)	818 keV (110-Ag)	0.70	X
1505 keV (110-Ag)	884 keV (110-Ag)	0.72	X
1505 keV (110-Ag)	937 keV (110-Ag)	0.40	X
1505 keV (110-Ag)	1384 keV (110-Ag)	0.66	X
1505 keV (110-Ag)	1475 keV (110-Ag)	0.72	X
1562 keV (110-Ag)	657 keV (110-Ag)	0.53	X
1562 keV (110-Ag)	677 keV (110-Ag)	0.71	X
1562 keV (110-Ag)	687 keV (110-Ag)	0.36	X
1562 keV (110-Ag)	706 keV (110-Ag)	0.33	X
1562 keV (110-Ag)	744 keV (110-Ag)	0.65	X
1562 keV (110-Ag)	763 keV (110-Ag)	0.56	X
1562 keV (110-Ag)	818 keV (110-Ag)	0.70	X
1562 keV (110-Ag)	884 keV (110-Ag)	0.83	X
1562 keV (110-Ag)	937 keV (110-Ag)	0.44	X
1562 keV (110-Ag)	1384 keV (110-Ag)	0.67	X
1562 keV (110-Ag)	1475 keV (110-Ag)	0.78	X
1562 keV (110-Ag)	1505 keV (110-Ag)	0.79	X
602 keV (124-Sb)	582 keV (95-Tc)	0.84	
722 keV (124-Sb)	702 keV (94-Nb)	0.73	
722 keV (124-Sb)	645 keV (124-Sb)	0.39	X
722 keV (124-Sb)	713 keV (124-Sb)	0.57	X
790 keV (124-Sb)	713 keV (124-Sb)	0.90	X
790 keV (124-Sb)	722 keV (124-Sb)	0.71	X
1045 keV (124-Sb)	722 keV (124-Sb)	0.34	X
1045 keV (124-Sb)	790 keV (124-Sb)	0.31	X
1045 keV (124-Sb)	968 keV (124-Sb)	0.79	X
1325 keV (124-Sb)	582 keV (95-Tc)	0.70	
1325 keV (124-Sb)	602 keV (124-Sb)	0.81	X
1325 keV (124-Sb)	713 keV (124-Sb)	0.36	X
1325 keV (124-Sb)	722 keV (124-Sb)	0.63	X
1325 keV (124-Sb)	790 keV (124-Sb)	0.43	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho_{1,2}$	Mesmo nuclídeo	Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho_{1,2}$	Mesmo nuclídeo
1436 keV (124-Sb)	645 keV (124-Sb)	0.32	X	841 keV (152-Eu)	566 keV (152-Eu)	-0.81	X
1436 keV (124-Sb)	713 keV (124-Sb)	0.94	X	867 keV (152-Eu)	295 keV (152-Eu)	-0.30	X
1436 keV (124-Sb)	722 keV (124-Sb)	0.82	X	867 keV (152-Eu)	841 keV (152-Eu)	0.34	X
1436 keV (124-Sb)	790 keV (124-Sb)	0.93	X	919 keV (152-Eu)	488 keV (152-Eu)	-0.51	X
1436 keV (124-Sb)	1325 keV (124-Sb)	0.52	X	919 keV (152-Eu)	841 keV (152-Eu)	0.34	X
1690 keV (124-Sb)	645 keV (124-Sb)	0.45	X	919 keV (152-Eu)	867 keV (152-Eu)	0.70	X
1690 keV (124-Sb)	722 keV (124-Sb)	0.49	X	1089 keV (152-Eu)	503 keV (152-Eu)	0.86	X
1690 keV (124-Sb)	968 keV (124-Sb)	0.84	X	1089 keV (152-Eu)	678 keV (152-Eu)	0.96	X
1690 keV (124-Sb)	1045 keV (124-Sb)	0.88	X	1112 keV (152-Eu)	295 keV (152-Eu)	-0.31	X
1690 keV (124-Sb)	1325 keV (124-Sb)	0.38	X	1112 keV (152-Eu)	841 keV (152-Eu)	0.35	X
1690 keV (124-Sb)	1436 keV (124-Sb)	0.41	X	1112 keV (152-Eu)	867 keV (152-Eu)	0.97	X
2090 keV (124-Sb)	722 keV (124-Sb)	0.40	X	1112 keV (152-Eu)	919 keV (152-Eu)	0.73	X
2090 keV (124-Sb)	1368 keV (124-Sb)	0.96	X	1408 keV (152-Eu)	841 keV (152-Eu)	0.40	X
2090 keV (124-Sb)	1436 keV (124-Sb)	0.32	X	1408 keV (152-Eu)	867 keV (152-Eu)	0.83	X
208 keV (125-Sb)	433 keV (108-Ag)	-0.89		1408 keV (152-Eu)	919 keV (152-Eu)	0.84	X
208 keV (125-Sb)	204 keV (125-Sb)	0.34	X	1408 keV (152-Eu)	1112 keV (152-Eu)	0.86	X
427 keV (125-Sb)	433 keV (108-Ag)	0.95		1457 keV (152-Eu)	1212 keV (152-Eu)	1.00	X
427 keV (125-Sb)	204 keV (125-Sb)	-0.31	X	89 keV (153-Gd)	83 keV (153-Gd)	-0.58	X
427 keV (125-Sb)	208 keV (125-Sb)	-0.93	X	97 keV (153-Gd)	75 keV (153-Gd)	-0.62	X
443 keV (125-Sb)	208 keV (125-Sb)	-0.31	X	103 keV (153-Gd)	75 keV (153-Gd)	0.39	X
443 keV (125-Sb)	427 keV (125-Sb)	0.33	X	103 keV (153-Gd)	83 keV (153-Gd)	0.31	X
463 keV (125-Sb)	433 keV (108-Ag)	0.95		103 keV (153-Gd)	89 keV (153-Gd)	0.38	X
463 keV (125-Sb)	208 keV (125-Sb)	-0.86	X	172 keV (153-Gd)	69 keV (153-Gd)	0.48	X
463 keV (125-Sb)	427 keV (125-Sb)	0.91	X	172 keV (153-Gd)	75 keV (153-Gd)	0.52	X
463 keV (125-Sb)	443 keV (125-Sb)	0.34	X	172 keV (153-Gd)	83 keV (153-Gd)	0.41	X
600 keV (125-Sb)	614 keV (108-Ag)	0.75		172 keV (153-Gd)	89 keV (153-Gd)	0.51	X
606 keV (125-Sb)	600 keV (125-Sb)	0.52	X	172 keV (153-Gd)	97 keV (153-Gd)	0.35	X
635 keV (125-Sb)	614 keV (108-Ag)	0.72		172 keV (153-Gd)	103 keV (153-Gd)	0.75	X
635 keV (125-Sb)	600 keV (125-Sb)	0.54	X	444 keV (154-Eu)	247 keV (154-Eu)	-0.37	X
635 keV (125-Sb)	606 keV (125-Sb)	0.41	X	625 keV (154-Eu)	591 keV (154-Eu)	0.40	X
671 keV (125-Sb)	208 keV (125-Sb)	0.30	X	692 keV (154-Eu)	444 keV (154-Eu)	0.90	X
671 keV (125-Sb)	600 keV (125-Sb)	0.35	X	723 keV (154-Eu)	591 keV (154-Eu)	0.32	X
671 keV (125-Sb)	635 keV (125-Sb)	0.64	X	723 keV (154-Eu)	692 keV (154-Eu)	0.33	X
667 keV (132-Cs)	702 keV (94-Nb)	0.73		756 keV (154-Eu)	591 keV (154-Eu)	-0.45	X
1985 keV (132-Cs)	667 keV (132-Cs)	0.39	X	756 keV (154-Eu)	625 keV (154-Eu)	0.33	X
1985 keV (132-Cs)	1317 keV (132-Cs)	0.97	X	756 keV (154-Eu)	723 keV (154-Eu)	0.32	X
80 keV (133-Ba)	78 keV (44-Ti)	0.76		873 keV (154-Eu)	591 keV (154-Eu)	0.37	X
160 keV (133-Ba)	79 keV (133-Ba)	0.80	X	873 keV (154-Eu)	625 keV (154-Eu)	0.92	X
160 keV (133-Ba)	80 keV (133-Ba)	0.56	X	873 keV (154-Eu)	756 keV (154-Eu)	0.32	X
223 keV (133-Ba)	53 keV (133-Ba)	-0.33	X	904 keV (154-Eu)	591 keV (154-Eu)	0.41	X
223 keV (133-Ba)	79 keV (133-Ba)	-0.91	X	904 keV (154-Eu)	625 keV (154-Eu)	0.53	X
223 keV (133-Ba)	160 keV (133-Ba)	-0.76	X	904 keV (154-Eu)	723 keV (154-Eu)	0.44	X
276 keV (133-Ba)	79 keV (133-Ba)	-0.86	X	904 keV (154-Eu)	756 keV (154-Eu)	0.37	X
276 keV (133-Ba)	160 keV (133-Ba)	-0.69	X	904 keV (154-Eu)	873 keV (154-Eu)	0.58	X
276 keV (133-Ba)	223 keV (133-Ba)	0.87	X	996 keV (154-Eu)	123 keV (154-Eu)	0.34	X
302 keV (133-Ba)	53 keV (133-Ba)	-0.41	X	996 keV (154-Eu)	591 keV (154-Eu)	0.33	X
356 keV (133-Ba)	53 keV (133-Ba)	0.64	X	996 keV (154-Eu)	625 keV (154-Eu)	0.83	X
356 keV (133-Ba)	302 keV (133-Ba)	0.43	X	996 keV (154-Eu)	873 keV (154-Eu)	0.90	X
383 keV (133-Ba)	80 keV (133-Ba)	0.84	X	996 keV (154-Eu)	904 keV (154-Eu)	0.54	X
383 keV (133-Ba)	160 keV (133-Ba)	0.53	X	1140 keV (154-Eu)	892 keV (154-Eu)	0.99	X
383 keV (133-Ba)	302 keV (133-Ba)	0.43	X	1494 keV (154-Eu)	1246 keV (154-Eu)	0.99	X
661 keV (137-Cs)	667 keV (132-Cs)	0.71		1596 keV (154-Eu)	444 keV (154-Eu)	0.32	X
696 keV (144-Ce)	702 keV (94-Nb)	0.74		1596 keV (154-Eu)	591 keV (154-Eu)	0.52	X
696 keV (144-Ce)	661 keV (137-Cs)	0.71		1596 keV (154-Eu)	625 keV (154-Eu)	0.62	X
2185 keV (144-Ce)	696 keV (144-Ce)	0.58	X	1596 keV (154-Eu)	692 keV (154-Eu)	0.41	X
2185 keV (144-Ce)	1489 keV (144-Ce)	0.93	X	1596 keV (154-Eu)	723 keV (154-Eu)	0.63	X
586 keV (152-Eu)	503 keV (152-Eu)	-0.42	X	1596 keV (154-Eu)	756 keV (154-Eu)	0.48	X
678 keV (152-Eu)	503 keV (152-Eu)	0.83	X	1596 keV (154-Eu)	873 keV (154-Eu)	0.70	X
778 keV (152-Eu)	367 keV (152-Eu)	0.86	X	1596 keV (154-Eu)	904 keV (154-Eu)	0.77	X
778 keV (152-Eu)	411 keV (152-Eu)	0.52	X	1596 keV (154-Eu)	996 keV (154-Eu)	0.64	X
810 keV (152-Eu)	688 keV (152-Eu)	1.00	X	962 keV (160-Tb)	215 keV (160-Tb)	-0.49	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho_{1,2}$	Mesmo nuclídeo
962 keV (160-Tb)	298 keV (160-Tb)	0.57	X
962 keV (160-Tb)	879 keV (160-Tb)	0.49	X
966 keV (160-Tb)	879 keV (160-Tb)	0.97	X
966 keV (160-Tb)	962 keV (160-Tb)	0.48	X
1177 keV (160-Tb)	298 keV (160-Tb)	0.67	X
1177 keV (160-Tb)	879 keV (160-Tb)	0.57	X
1177 keV (160-Tb)	962 keV (160-Tb)	0.86	X
1177 keV (160-Tb)	966 keV (160-Tb)	0.56	X
1271 keV (160-Tb)	1291 keV (59-Fe)	0.75	
1271 keV (160-Tb)	93 keV (160-Tb)	0.91	X
48 keV (161-Tb)	25 keV (161-Tb)	0.90	X
74 keV (161-Tb)	25 keV (161-Tb)	0.96	X
74 keV (161-Tb)	48 keV (161-Tb)	0.99	X
93 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0.33	X
109 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0.49	X
109 keV (169-Yb)	93 keV (169-Yb)	0.39	X
130 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0.53	X
130 keV (169-Yb)	93 keV (169-Yb)	0.44	X
130 keV (169-Yb)	109 keV (169-Yb)	0.73	X
130 keV (169-Yb)	118 keV (169-Yb)	0.33	X
177 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0.54	X
177 keV (169-Yb)	93 keV (169-Yb)	0.45	X
177 keV (169-Yb)	109 keV (169-Yb)	0.77	X
177 keV (169-Yb)	118 keV (169-Yb)	0.33	X
177 keV (169-Yb)	130 keV (169-Yb)	0.68	X
197 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0.54	X
197 keV (169-Yb)	93 keV (169-Yb)	0.45	X
197 keV (169-Yb)	109 keV (169-Yb)	0.55	X
197 keV (169-Yb)	118 keV (169-Yb)	0.33	X
197 keV (169-Yb)	130 keV (169-Yb)	0.83	X
197 keV (169-Yb)	177 keV (169-Yb)	0.88	X
261 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0.77	X
261 keV (169-Yb)	93 keV (169-Yb)	0.46	X
261 keV (169-Yb)	109 keV (169-Yb)	0.60	X
261 keV (169-Yb)	118 keV (169-Yb)	0.33	X
261 keV (169-Yb)	130 keV (169-Yb)	0.82	X
261 keV (169-Yb)	177 keV (169-Yb)	0.86	X
261 keV (169-Yb)	197 keV (169-Yb)	0.95	X
307 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0.59	X
307 keV (169-Yb)	93 keV (169-Yb)	0.48	X
307 keV (169-Yb)	109 keV (169-Yb)	0.82	X
307 keV (169-Yb)	118 keV (169-Yb)	0.36	X
307 keV (169-Yb)	130 keV (169-Yb)	0.89	X
307 keV (169-Yb)	177 keV (169-Yb)	0.94	X
307 keV (169-Yb)	197 keV (169-Yb)	0.93	X
307 keV (169-Yb)	261 keV (169-Yb)	0.92	X
67 keV (182-Ta)	25 keV (161-Tb)	0.87	
67 keV (182-Ta)	48 keV (161-Tb)	0.93	
67 keV (182-Ta)	74 keV (161-Tb)	0.93	
113 keV (182-Ta)	42 keV (182-Ta)	-0.49	X
116 keV (182-Ta)	31 keV (182-Ta)	0.88	X
116 keV (182-Ta)	84 keV (182-Ta)	0.45	X
152 keV (182-Ta)	84 keV (182-Ta)	0.96	X
152 keV (182-Ta)	116 keV (182-Ta)	0.44	X
156 keV (182-Ta)	42 keV (182-Ta)	0.77	X
179 keV (182-Ta)	42 keV (182-Ta)	-0.45	X
179 keV (182-Ta)	65 keV (182-Ta)	0.48	X
179 keV (182-Ta)	113 keV (182-Ta)	0.83	X
198 keV (182-Ta)	84 keV (182-Ta)	0.67	X
198 keV (182-Ta)	113 keV (182-Ta)	0.54	X
198 keV (182-Ta)	116 keV (182-Ta)	0.31	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho_{1,2}$	Mesmo nuclídeo
198 keV (182-Ta)	152 keV (182-Ta)	0.66	X
198 keV (182-Ta)	179 keV (182-Ta)	0.44	X
222 keV (182-Ta)	42 keV (182-Ta)	0.72	X
222 keV (182-Ta)	65 keV (182-Ta)	0.35	X
222 keV (182-Ta)	156 keV (182-Ta)	0.90	X
264 keV (182-Ta)	65 keV (182-Ta)	0.40	X
264 keV (182-Ta)	84 keV (182-Ta)	0.63	X
264 keV (182-Ta)	113 keV (182-Ta)	0.45	X
264 keV (182-Ta)	116 keV (182-Ta)	0.31	X
264 keV (182-Ta)	152 keV (182-Ta)	0.63	X
264 keV (182-Ta)	179 keV (182-Ta)	0.62	X
264 keV (182-Ta)	198 keV (182-Ta)	0.89	X
1121 keV (182-Ta)	1175 keV (56-Co)	0.70	
1121 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0.80	
1121 keV (182-Ta)	3451 keV (56-Co)	0.76	
1157 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0.78	
1157 keV (182-Ta)	3451 keV (56-Co)	0.75	
1157 keV (182-Ta)	1121 keV (182-Ta)	0.97	X
1189 keV (182-Ta)	1175 keV (56-Co)	0.70	
1189 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0.80	
1189 keV (182-Ta)	3451 keV (56-Co)	0.76	
1189 keV (182-Ta)	1121 keV (182-Ta)	1.00	X
1189 keV (182-Ta)	1157 keV (182-Ta)	0.97	X
1221 keV (182-Ta)	1175 keV (56-Co)	0.70	
1221 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0.80	
1221 keV (182-Ta)	3451 keV (56-Co)	0.76	
1221 keV (182-Ta)	1121 keV (182-Ta)	1.00	X
1221 keV (182-Ta)	1157 keV (182-Ta)	0.97	X
1221 keV (182-Ta)	1221 keV (182-Ta)	0.98	X
1231 keV (182-Ta)	1121 keV (182-Ta)	0.98	X
1231 keV (182-Ta)	1157 keV (182-Ta)	0.96	X
1231 keV (182-Ta)	1189 keV (182-Ta)	0.98	X
1231 keV (182-Ta)	1221 keV (182-Ta)	0.98	X
1231 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0.78	
1231 keV (182-Ta)	3451 keV (56-Co)	0.75	
1231 keV (182-Ta)	1121 keV (182-Ta)	0.97	X
1231 keV (182-Ta)	1157 keV (182-Ta)	1.00	X
1231 keV (182-Ta)	1221 keV (182-Ta)	0.97	X
1231 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0.78	
1231 keV (182-Ta)	3451 keV (56-Co)	0.75	
1231 keV (182-Ta)	1121 keV (182-Ta)	0.97	X
1231 keV (182-Ta)	1157 keV (182-Ta)	1.00	X
1231 keV (182-Ta)	1189 keV (182-Ta)	0.97	X
1231 keV (182-Ta)	1221 keV (182-Ta)	0.97	X
1231 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0.78	
1231 keV (182-Ta)	3451 keV (56-Co)	0.75	
1231 keV (182-Ta)	1121 keV (182-Ta)	0.97	X
1231 keV (182-Ta)	1157 keV (182-Ta)	1.00	X
1231 keV (182-Ta)	1189 keV (182-Ta)	0.97	X
1231 keV (182-Ta)	1221 keV (182-Ta)	0.97	X
1231 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0.78	
1231 keV (182-Ta)	3451 keV (56-Co)	0.75	
1231 keV (182-Ta)	1121 keV (182-Ta)	0.96	X
1231 keV (182-Ta)	1157 keV (182-Ta)	0.97	X
1231 keV (182-Ta)	1189 keV (182-Ta)	0.99	X
1231 keV (182-Ta)	1221 keV (182-Ta)	0.99	X
1231 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0.79	
1231 keV (182-Ta)	3451 keV (56-Co)	0.76	
1231 keV (182-Ta)	1121 keV (182-Ta)	0.98	X
1231 keV (182-Ta)	1157 keV (182-Ta)	0.96	X
1231 keV (182-Ta)	1189 keV (182-Ta)	0.98	X
1231 keV (182-Ta)	1221 keV (182-Ta)	0.98	X
1231 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0.78	
1231 keV (182-Ta)	3451 keV (56-Co)	0.75	
1231 keV (182-Ta)	1121 keV (182-Ta)	0.97	X
1231 keV (182-Ta)	1157 keV (182-Ta)	1.00	X
1231 keV (182-Ta)	1189 keV (182-Ta)	0.97	X
1231 keV (182-Ta)	1221 keV (182-Ta)	0.97	X
1231 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0.79	
1231 keV (182-Ta)	3451 keV (56-Co)	0.76	
1231 keV (182-Ta)	1121 keV (182-Ta)	0.99	X
1231 keV (182-Ta)	1157 keV (182-Ta)	0.97	X
1231 keV (182-Ta)	1189 keV (182-Ta)	0.99	X
1231 keV (182-Ta)	1221 keV (182-Ta)	0.99	X
1231 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0.79	
1231 keV (182-Ta)	3451 keV (56-Co)	0.76	
1231 keV (182-Ta)	1121 keV (182-Ta)	0.99	X
1231 keV (182-Ta)	1157 keV (182-Ta)	0.97	X
1231 keV (182-Ta)	1189 keV (182-Ta)	0.99	X
1231 keV (182-Ta)	1221 keV (182-Ta)	0.99	X
1231 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0.79	
1231 keV (182-Ta)	3451 keV (56-Co)	0.76	
1231 keV (182-Ta)	1121 keV (182-Ta)	0.99	X
1231 keV (182-Ta)	1157 keV (182-Ta)	1.00	X
1231 keV (182-Ta)	1189 keV (182-Ta)	0.97	X
1231 keV (182-Ta)	1221 keV (182-Ta)	1.00	X
1231 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0.98	X
1231 keV (182-Ta)	1257 keV (182-Ta)	0.97	X
1231 keV (182-Ta)	1273 keV (182-Ta)	0.99	X
1231 keV (182-Ta)	1289 keV (182-Ta)	0.99	X
1231 keV (182-Ta)	1373 keV (182-Ta)	0.80	

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho_{1,2}$	Mesmo nuclídeo	Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho_{1,2}$	Mesmo nuclídeo
1373 keV (182-Ta)	3451 keV (56-Co)	0.76		604 keV (192-Ir)	316 keV (192-Ir)	0.65	X
1373 keV (182-Ta)	1121 keV (182-Ta)	0.99	X	604 keV (192-Ir)	416 keV (192-Ir)	0.32	X
1373 keV (182-Ta)	1157 keV (182-Ta)	0.97	X	604 keV (192-Ir)	468 keV (192-Ir)	0.65	X
1373 keV (182-Ta)	1189 keV (182-Ta)	0.99	X	604 keV (192-Ir)	484 keV (192-Ir)	0.32	X
1373 keV (182-Ta)	1221 keV (182-Ta)	0.99	X	604 keV (192-Ir)	588 keV (192-Ir)	0.39	X
1373 keV (182-Ta)	1231 keV (182-Ta)	0.99	X	612 keV (192-Ir)	130 keV (169-Yb)	0.76	
1373 keV (182-Ta)	1257 keV (182-Ta)	0.97	X	612 keV (192-Ir)	177 keV (169-Yb)	0.75	
1373 keV (182-Ta)	1273 keV (182-Ta)	1.00	X	612 keV (192-Ir)	197 keV (169-Yb)	0.77	
1373 keV (182-Ta)	1289 keV (182-Ta)	0.99	X	612 keV (192-Ir)	261 keV (169-Yb)	0.77	
1387 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0.80		612 keV (192-Ir)	307 keV (169-Yb)	0.82	
1387 keV (182-Ta)	3451 keV (56-Co)	0.76		612 keV (192-Ir)	136 keV (192-Ir)	0.33	X
1387 keV (182-Ta)	1121 keV (182-Ta)	0.99	X	612 keV (192-Ir)	205 keV (192-Ir)	0.33	X
1387 keV (182-Ta)	1157 keV (182-Ta)	0.97	X	612 keV (192-Ir)	295 keV (192-Ir)	0.89	X
1387 keV (182-Ta)	1189 keV (182-Ta)	0.99	X	612 keV (192-Ir)	308 keV (192-Ir)	0.54	X
1387 keV (182-Ta)	1221 keV (182-Ta)	0.99	X	612 keV (192-Ir)	316 keV (192-Ir)	0.89	X
1387 keV (182-Ta)	1231 keV (182-Ta)	0.99	X	612 keV (192-Ir)	416 keV (192-Ir)	0.35	X
1387 keV (182-Ta)	1257 keV (182-Ta)	0.97	X	612 keV (192-Ir)	468 keV (192-Ir)	0.66	X
1387 keV (182-Ta)	1273 keV (182-Ta)	0.99	X	612 keV (192-Ir)	484 keV (192-Ir)	0.35	X
1387 keV (182-Ta)	1289 keV (182-Ta)	0.99	X	612 keV (192-Ir)	588 keV (192-Ir)	0.40	X
1387 keV (182-Ta)	1373 keV (182-Ta)	0.99	X	612 keV (192-Ir)	604 keV (192-Ir)	0.82	X
234 keV (185-Os)	162 keV (185-Os)	0.58	X	884 keV (192-Ir)	295 keV (192-Ir)	0.57	X
592 keV (185-Os)	125 keV (185-Os)	-0.36	X	884 keV (192-Ir)	308 keV (192-Ir)	0.38	X
592 keV (185-Os)	162 keV (185-Os)	-0.45	X	884 keV (192-Ir)	316 keV (192-Ir)	0.47	X
646 keV (185-Os)	234 keV (185-Os)	-0.54	X	884 keV (192-Ir)	416 keV (192-Ir)	0.91	X
717 keV (185-Os)	162 keV (185-Os)	-0.54	X	884 keV (192-Ir)	468 keV (192-Ir)	0.44	X
717 keV (185-Os)	592 keV (185-Os)	0.84	X	884 keV (192-Ir)	588 keV (192-Ir)	0.97	X
874 keV (185-Os)	162 keV (185-Os)	0.31	X	884 keV (192-Ir)	604 keV (192-Ir)	0.55	X
874 keV (185-Os)	234 keV (185-Os)	0.35	X	884 keV (192-Ir)	612 keV (192-Ir)	0.58	X
880 keV (185-Os)	162 keV (185-Os)	0.69	X	411 keV (198-Au)	109 keV (169-Yb)	0.75	
880 keV (185-Os)	234 keV (185-Os)	0.76	X	411 keV (198-Au)	130 keV (169-Yb)	0.82	
880 keV (185-Os)	874 keV (185-Os)	0.48	X	411 keV (198-Au)	177 keV (169-Yb)	0.85	
295 keV (192-Ir)	307 keV (169-Yb)	0.71		411 keV (198-Au)	197 keV (169-Yb)	0.85	
295 keV (192-Ir)	136 keV (192-Ir)	0.41	X	411 keV (198-Au)	261 keV (169-Yb)	0.87	
308 keV (192-Ir)	136 keV (192-Ir)	0.55	X	411 keV (198-Au)	307 keV (169-Yb)	0.91	
308 keV (192-Ir)	295 keV (192-Ir)	0.44	X	411 keV (198-Au)	316 keV (192-Ir)	0.74	
316 keV (192-Ir)	197 keV (169-Yb)	0.71		411 keV (198-Au)	604 keV (192-Ir)	0.74	
316 keV (192-Ir)	261 keV (169-Yb)	0.71		411 keV (198-Au)	612 keV (192-Ir)	0.80	
316 keV (192-Ir)	307 keV (169-Yb)	0.76		675 keV (198-Au)	411 keV (198-Au)	0.31	X
316 keV (192-Ir)	205 keV (192-Ir)	0.31	X	1087 keV (198-Au)	411 keV (198-Au)	0.49	X
316 keV (192-Ir)	295 keV (192-Ir)	0.59	X	1087 keV (198-Au)	675 keV (198-Au)	0.98	X
316 keV (192-Ir)	308 keV (192-Ir)	0.52	X	158 keV (199-Au)	49 keV (199-Au)	-0.33	X
416 keV (192-Ir)	136 keV (192-Ir)	0.37	X	208 keV (199-Au)	49 keV (199-Au)	0.62	X
416 keV (192-Ir)	295 keV (192-Ir)	0.37	X	208 keV (199-Au)	158 keV (199-Au)	0.54	X
468 keV (192-Ir)	295 keV (192-Ir)	0.58	X	680 keV (203-Pb)	401 keV (203-Pb)	0.94	X
468 keV (192-Ir)	308 keV (192-Ir)	0.52	X	569 keV (207-Bi)	554 keV (82-Br)	0.78	
468 keV (192-Ir)	316 keV (192-Ir)	0.59	X	569 keV (207-Bi)	600 keV (125-Sb)	0.75	
484 keV (192-Ir)	316 keV (192-Ir)	0.32	X				
484 keV (192-Ir)	468 keV (192-Ir)	0.30	X				
588 keV (192-Ir)	295 keV (192-Ir)	0.35	X				
588 keV (192-Ir)	308 keV (192-Ir)	0.31	X				
588 keV (192-Ir)	316 keV (192-Ir)	0.36	X				
588 keV (192-Ir)	416 keV (192-Ir)	0.93	X				
588 keV (192-Ir)	468 keV (192-Ir)	0.33	X				
604 keV (192-Ir)	130 keV (169-Yb)	0.70					
604 keV (192-Ir)	197 keV (169-Yb)	0.71					
604 keV (192-Ir)	261 keV (169-Yb)	0.72					
604 keV (192-Ir)	307 keV (169-Yb)	0.76					
604 keV (192-Ir)	136 keV (192-Ir)	0.57	X				
604 keV (192-Ir)	205 keV (192-Ir)	0.31	X				
604 keV (192-Ir)	295 keV (192-Ir)	0.82	X				
604 keV (192-Ir)	308 keV (192-Ir)	0.88	X				



# Apêndice B. Resultados considerando as constantes fundamentais de 2002

Tabela B.1 - Listagem dos valores recomendados para as energias do conjunto de raios gama padrões para calibração considerando as constantes fundamentais do CODATA 2002.

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama</i> (keV)	<i>Energia</i> (keV)	$\frac{\sigma_E}{E}$ ( $\times 10^6$ )	[C] <sup>(a)</sup>	[S] <sup>(b)</sup>	[D] <sup>(c)</sup>
7-Be	477	477,6030 (22)	4,6		2	
22-Na	1274	1274,535 (5)	4,2		1	
24-Na	1368	1368,6253 (30)	2,2		2	
	2754	2754,008 (12)	4,3		1	
44-Ti	67	67,8675 (18)	26		1	
	78	78,3235 (11)	14		2	
46-Sc	889	889,2726 (15)	1,6		11	
	1120	1120,5357 (32)	2,8		5	
51-Cr	320	320,0821 (5)	1,4	1	1	
54-Mn	834	834,8392 (22)	2,7		4	
56-Co	733	733,5089 (26)	3,6		6	X
	787	787,7393 (27)	3,5		6	X
	846	846,7631 (22)	2,6		3	X
	896	896,497 (5)	6		2	X
	977	977,364 (4)	3,7		2	X
	996	996,938 (4)	4,4		2	X
	1037	1037,8345 (24)	2,3		6	X
	1140	1140,352 (6)	5		1	X
	1159	1159,925 (6)	5		1	X
	1175	1175,0853 (26)	2,2		4	X
	1238	1238,2731 (23)	1,8		3	X
	1335	1335,38 (3)	24		1	
	1360	1360,197 (3)	2,5		4	X
	1640	1640,448 (5)	3,0		1	X
	1771	1771,329 (4)	2,0		4	X
	1810	1810,726 (4)	2,4		3	X
	1963	1963,715 (5)	2,6		4	X
	2015	2015,179 (5)	2,3		2	X
	2034	2034,752 (5)	2,4		5	X
	2113	2113,099 (5)	2,5		5	X
	2212	2212,896 (4)	1,6		2	X
	2598	2598,438 (4)	1,6		6	X
	3009	3009,560 (4)	1,5		4	X
	3201	3201,942 (6)	1,8		1	X
	3253	3253,405 (5)	1,7			X
	3272	3272,977 (6)	1,7			X
	3451	3451,117 (5)	1,5		3	X
57-Co	122	122,06054 (14)	1,1	1		
	136	136,4734 (3)	2,4	1	1	

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama</i> (keV)	<i>Energia</i> (keV)	$\frac{\sigma_E}{E}$ ( $\times 10^6$ )	[C] <sup>(a)</sup>	[S] <sup>(b)</sup>	[D] <sup>(c)</sup>
58-Co	810	810,7593 (24)	3,0	9		
	863	863,9475 (19)	2,2	3		
	1674	1674,721 (7)	4,3	1		
59-Fe	142	142,6516 (26)	18	1		
	192	192,348 (3)	17	2	X	
	1099	1099,244 (3)	2,9	1	X	
	1291	1291,588 (4)	3,2	2	X	
60-Co	1173	1173,2245 (23)	2,0	1	8	
	1332	1332,4931 (25)	1,9	1	9	
65-Zn	1115	1115,5395 (22)	1,9	4		
66-Ga	686	686,082 (6)	9	1	X	
	833	833,5328 (20)	2,4	2	X	
	853	853,032 (7)	8	2	X	
	1039	1039,2198 (30)	2,9	2	X	
	1148	1147,893 (10)	9	2	X	
	1190	1190,283 (8)	7	2	X	
	1333	1333,115 (5)	3,5	1	X	
	1418	1418,756 (6)	3,9	1	X	
	1459	1458,661 (12)	8	2		
	1508	1508,156 (7)	4,9	1	X	
	1741	1740,906 (18)	11	1	X	
	1898	1898,835 (7)	3,9	1	X	
	1918	1918,334 (5)	2,7	1	X	
	2066	2065,782 (7)	3,6	1	X	
75-Se	2173	2173,326 (16)	8	1		
	2189	2189,623 (6)	2,8	2	X	
	2213	2213,189 (10)	4,5	1	X	
	2393	2393,128 (8)	3,3	1	X	
	2423	2422,525 (8)	3,3	1	X	
	2751	2751,841 (5)	1,9	1	X	
	2780	2780,096 (18)	7	1	X	
	2933	2933,359 (10)	3,4	1	X	
	2977	2977,08 (5)	16	1		
	2993	2993,21 (4)	12	1		
	3047	3046,692 (10)	3,3	1	X	
	3228	3228,806 (6)	1,9	1	X	
	3380	3380,849 (7)	2,1	1	X	
	3422	3422,038 (9)	2,7	1	X	
	3432	3432,307 (8)	2,3	1	X	
	3766	3766,852 (10)	2,7		X	
76-Se	4085	4085,860 (10)	2,6		X	
	4461	4461,200 (10)	2,3		X	
	4806	4806,008 (11)	2,3		X	
	66	66,0519 (9)	13	1	X	
	96	96,7339 (10)	10	2	X	
	121	121,1154 (12)	10	1	X	
	136	136,0000 (6)	4,7	1	X	
	198	198,6057 (13)	7	1	X	
	264	264,6574 (10)	3,7	2	X	
77-Se	279	279,5420 (12)	4,2	1	X	
	303	303,9234 (11)	3,7	1	X	
	400	400,6569 (8)	2,1	3	X	

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama (keV)</i>	<i>Energia (keV)</i>	$\frac{\sigma_E}{E}$ ( $\times 10^6$ )	[C] <sup>(a)</sup>	[S] <sup>(b)</sup>	[D] <sup>(c)</sup>
82-Br	221	221,4792 (22)	10	2	X	
	554	554,3473 (18)	3,2	1	X	
	619	619,1022 (16)	2,5	2	X	
	698	698,3714 (16)	2,3	4	X	
	776	776,5135 (22)	2,8	3	X	
	827	827,8238 (22)	2,7	4	X	
	1044	1043,9932 (25)	2,4	4	X	
	1317	1317,4679 (21)	1,6	1	X	
	1474	1474,8777 (28)	1,9	1	X	
	1650	1650,331 (3)	2,1		X	
	881	881,6060 (16)	1,8	3	X	
84-Rb	1016	1016,160 (4)	3,8	2	X	
	1897	1897,754 (4)	2,1	4	X	
	514	514,0044 (24)	4,8	1		
88-Y	898	898,0358 (27)	3,0	3		
	1836	1836,048 (5)	3,0	6		
94-Nb	702	702,6441 (12)	1,8	9		
	871	871,1155 (15)	1,7	9		
95-Tc	204	204,1172 (16)	8	5	X	
	253	253,0713 (22)	9	2	X	
	582	582,0783 (18)	3,1	4	X	
	765	765,803 (6)	8	1		
	786	786,1942 (22)	2,8	1	X	
	820	820,6244 (28)	3,5	2		
	835	835,1480 (21)	2,5	3	X	
	1039	1039,2632 (23)	2,2	3	X	
	724	724,1951 (28)	3,8	1		
	40	40,58321 (15)	3,6	1	1	
99-Mo	140	140,5104 (12)	9	1		
	511	511,8530 (26)	5,0	1		
106-Ru	433	433,939 (3)	8	5		
	614	614,2808 (14)	2,3	6		
	721 <sup>(d)</sup>	722,890 (3)	4,6	2		
	723 <sup>(d)</sup>	722,925 (3)	4,6	2		
	88	88,0336 (11)	13	1		
110-Ag	446	446,8146 (20)	4,4	2	3	X
	620	620,3561 (14)	2,2	2	4	X
	657	657,7595 (11)	1,6	2	10	X
	677	677,6206 (11)	1,7	2	12	X
	687	687,0101 (14)	2,1	1	8	X
	706	706,6775 (12)	1,7	2	15	X
	744	744,2746 (14)	1,9	1	10	X
	763	763,9420 (15)	1,9	2	7	X
	818	818,0240 (15)	1,9	1	9	X
	884	884,6779 (14)	1,6	1	16	X
	937	937,4830 (21)	2,2	2	7	X
	1384	1384,2935 (18)	1,3	2	7	X
	1475	1475,7782 (21)	1,4		4	X
	1505	1505,0286 (20)	1,3	1	2	X
113-Sn	1562	1562,2926 (20)	1,3		1	X
	391	391,698 (3)	9		1	

<i>Nuclideo</i>	<i>Gama</i> (keV)	<i>Energia</i> (keV)	$\frac{\sigma_e}{E}$ (x10 <sup>6</sup> )	[C] <sup>(a)</sup>	[S] <sup>(b)</sup>	[D] <sup>(c)</sup>
124-Sb	602	602,7265 (21)	3,5	1	X	
	645	645,8500 (14)	2,2	2	X	
	713	713,7770 (27)	3,8	1	X	
	722	722,7829 (16)	2,2	4	X	
	790	790,710 (4)	4,6		X	
	968	968,1897 (26)	2,6	2	X	
	1045	1045,1224 (26)	2,5	2	X	
	1325	1325,5056 (27)	2,0	2	X	
	1368	1368,162 (5)	4,0	2	X	
	1436	1436,555 (4)	2,7	2	X	
	1690	1690,9665 (29)	1,7	6	X	
	1720	1720,41 (7)	41	1		
	2090	2090,937 (6)	2,8		X	
125-Sb	176	176,3131 (10)	5	2		
	204	204,137 (11)	52	1		
	208	208,076 (4)	17	3	X	
	427	427,876 (4)	8	1	X	
	443	443,557 (10)	21	1		
	463	463,367 (4)	8	1	X	
	600	600,5995 (15)	2,5	3		
	606	606,7167 (23)	3,8	2		
	635	635,9507 (13)	2,1	2	X	
	671	671,4416 (19)	2,8	1	X	
125-Sn	1806	1806,686 (11)	6	1		
	1889	1889,880 (11)	6	1		
	2002	2002,155 (5)	2,4	5		
	2201	2201,006 (13)	6	1		
	2275	2275,753 (11)	4,6	1		
132-Cs	667	667,7155 (13)	2,0	2	X	
	1317	1317,922 (5)	3,6	1	X	
	1985	1985,630 (5)	2,6	1	X	
133-Ba	53	53,1621 (7)	13	3	X	
	79	79,6143 (14)	17	2	X	
	80	80,9966 (10)	12	4	X	
	160	160,6109 (17)	10	1	X	
	223	223,2368 (14)	6	1	X	
	276	276,3987 (14)	5,0	4	X	
	302	302,8510 (6)	2,0	4	X	
	356	356,0129 (7)	2,0	4	X	
	383	383,8474 (11)	2,9	4	X	
137-Cs	661	661,6566 (11)	1,6	1	16	
	165	165,8555 (9)	6	1	4	
141-Ce	145	145,4436 (13)	9	1	2	
	696	696,5092 (13)	1,8	4	X	
	1489	1489,1478 (28)	1,9	3	X	
144-Ce	2185	2185,649 (3)	1,5	8	X	

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama (keV)</i>	<i>Energia (keV)</i>	$\frac{\sigma_E}{E}$ ( $\times 10^6$ )	[C] <sup>(a)</sup>	[S] <sup>(b)</sup>	[D] <sup>(c)</sup>
152-Eu	121	121,7816 (3)	2,6	1		X
	244	244,6973 (8)	3,4	1	3	X
	251	251,633 (11)	44		1	
	295	295,9386 (19)	6		2	X
	344	344,2776 (9)	2,6	1	3	X
	367	367,7889 (18)	5,0	1	2	X
	411	411,1161 (11)	2,7	1	3	X
	488	488,6785 (22)	4,5		1	X
	503	503,472 (5)	9		1	X
	566	566,440 (6)	10		2	X
	586	586,2643 (23)	4,0		2	X
	656	656,489 (5)	7		1	
	671	671,155 (19)	28		1	
	678	678,620 (4)	6		1	X
	688	688,673 (4)	6		1	X
	778	778,9039 (21)	2,7	1		X
	810	810,454 (4)	4,8		1	X
	841	841,574 (6)	7		1	X
	867	867,379 (4)	4,2		1	X
	919	919,335 (4)	4,5		1	X
	1085	1085,834 (11)	10		1	
	1089	1089,734 (4)	3,8		1	X
	1112	1112,074 (4)	3,2		1	X
	1212	1212,945 (12)	10		1	X
	1299	1299,143 (8)	6		1	
	1408	1408,011 (4)	2,5		1	X
	1457	1457,640 (12)	9		1	X
153-Gd	69	69,67293 (14)	2,1	1		X
	75	75,42207 (26)	3,4	1		X
	83	83,36711 (23)	2,7	1		X
	89	89,48588 (24)	2,7	1		X
	97	97,43092 (23)	2,4	1		X
	103	103,18006 (19)	1,9	1	1	X
	172	172,85294 (21)	1,2	1		X
154-Eu	123	123,0702 (10)	8		2	X
	247	247,9284 (9)	3,5		2	X
	444	444,4934 (20)	4,4		2	X
	591	591,7601 (27)	4,6		1	X
	625	625,2585 (22)	3,6		2	X
	692	692,4210 (18)	2,6		4	X
	723	723,3028 (20)	2,8		2	X
	756	756,8011 (26)	3,4		2	X
	845	845,416 (8)	9		1	
	873	873,1858 (22)	2,5		2	X
	892	892,775 (6)	7		2	X
	904	904,0676 (26)	2,9		3	X
	996	996,2552 (23)	2,3		1	X
	1128	1128,549 (8)	7		3	
	1140	1140,702 (6)	6		2	X
	1246	1246,121 (5)	4,1		1	X
	1274	1274,430 (4)	3,2		2	
	1494	1494,047 (5)	3,4		2	X
	1596	1596,4842 (27)	1,7		1	X

<i>Nuclideo</i>	<i>Gama</i> (keV)	<i>Energia</i> (keV)	$\frac{\sigma_E}{E}$ ( $\times 10^6$ )	[C] <sup>(a)</sup>	[S] <sup>(b)</sup>	[D] <sup>(c)</sup>
<i>160-Tb</i>	86	86,7876 (4)	4,2	1		X
	93	93,921 (5)	49	1		X
	197	197,0340 (11)	6	1	1	
	215	215,6451 (11)	5	1	2	X
	298	298,5783 (16)	5	1		X
	879	879,3740 (14)	1,6		7	X
	962	962,3068 (22)	2,2			X
	966	966,1611 (15)	1,5			X
	1177	1177,9505 (19)	1,6		2	X
	1271	1271,871 (5)	3,6		1	X
<i>161-Tb</i>	25	25,651302 (29)	1,1	1	2	X
	48	48,91524 (5)	1,0	4	2	X
	57	57,1916 (3)	6		1	
	74	74,56654 (8)	1,1	1	4	X
<i>169-Yb</i>	63	63,12039 (3)	0,5	2		X
	93	93,61439 (6)	0,7	3		
	109	109,77915 (4)	0,34	3		X
	118	118,18931 (11)	0,9	3		X
	130	130,52284 (3)	0,25	3		X
	177	177,21290 (4)	0,25	4		X
	197	197,95658 (5)	0,23	8		X
	261	261,07689 (6)	0,23	3		X
	307	307,73559 (6)	0,18	5		X
	170-Tm	84	84,25457 (7)	0,8	4	
<i>172-Hf</i>	23	23,93290 (22)	9		2	
	81	81,7513 (5)	6		3	
<i>172-Lu</i>	78	78,7423 (5)	6		2	
	90	90,6435 (7)	7		2	
<i>182-Ta</i>	31	31,7373 (5)	14	1		X
	42	42,7146 (3)	8	1		X
	65	65,72215 (14)	2,1	2		X
	67	67,74970 (7)	1,0	5		X
	84	84,68012 (24)	2,9	1	3	X
	100	100,10586 (7)	0,7	1	2	X
	113	113,67155 (21)	1,9	2	1	X
	116	116,4174 (5)	4,3	1	1	X
	152	152,42979 (24)	1,6	2	1	X
	156	156,38616 (29)	1,9	2		X
	179	179,39365 (24)	1,3	2	1	X
	198	198,35162 (27)	1,4	2	3	X
	222	222,10825 (31)	1,4	2	1	X
	229	229,3204 (6)	2,7	2	1	
	264	264,07369 (29)	1,1	2	3	X
	1121	1121,2874 (19)	1,7		4	X
	1157	1157,2996 (20)	1,7			X
	1189	1189,0367 (19)	1,6		4	X
	1221	1221,3926 (19)	1,6		2	X
	1231	1231,0019 (20)	1,6		2	X
	1257	1257,4048 (20)	1,6		2	X
	1273	1273,7162 (19)	1,5			X
	1289	1289,1418 (19)	1,5			X
	1373	1373,8213 (19)	1,4		1	X
	1387	1387,3869 (19)	1,4			X

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama (keV)</i>	<i>Energia (keV)</i>	$\frac{\sigma_E}{E}$ ( $\times 10^6$ )	[C] <sup>a)</sup>	[S] <sup>b)</sup>	[D] <sup>c)</sup>
<i>185-Os</i>	125	125,3583 (9)	7	2	X	
	162	162,8486 (22)	13	1	X	
	234	234,1545 (22)	9	1	X	
	592	592,0743 (17)	2,8	5	X	
	646	646,1264 (14)	2,2	4	X	
	717	717,4321 (16)	2,2	5	X	
	874	874,8242 (27)	3,1	4		
	880	880,2800 (19)	2,1	6	X	
<i>192-Ir</i>	136	136,34272 (21)	1,6	2		X
	205	205,79417 (18)	0,9	4		
	295	295,95634 (10)	0,35	6	4	X
	308	308,45494 (14)	0,46	6	3	X
	316	316,50587 (10)	0,30	7	4	X
	416	416,4693 (5)	1,2	2		X
	468	468,06841 (17)	0,36	8	3	X
	484	484,5749 (4)	0,9	3	2	
	588	588,5812 (5)	0,8	5	8	X
	604	604,41077 (18)	0,30	6	4	X
	612	612,46169 (15)	0,24	6	4	X
	884	884,5366 (5)	0,5	1	6	X
<i>198-Au</i>	411	411,80169 (9)	0,21	137	2	X
	675	675,8832 (7)	1,0	2	2	X
	1087	1087,6833 (7)	0,7		5	X
<i>199-Au</i>	49	49,82630 (11)	2,2	1		X
	158	158,37837 (9)	0,5	1	1	X
	208	208,20463 (10)	0,48	1	1	X
<i>203-Hg</i>	279	279,1947 (10)	3,4	2	2	X
<i>203-Pb</i>	401	401,3206 (27)	7		1	X
	680	680,5147 (27)	4,0		2	X
<i>207-Bi</i>	569	569,7001 (15)	2,6		4	
	1063	1063,6526 (24)	2,2		4	
	1770	1770,217 (7)	3,7		2	
<i>210-Pb</i>	46	46,5394 (10)	22		2	
<i>228-Th</i>	583	583,1870 (23)	3,9		2	
	2614	2614,511 (11)	4,1		1	
<i>241-Am</i>	26	26,34461 (22)	8		2	
	59	59,54076 (12)	2,0		3	

(a) Número de informações experimentais sobre o gama obtidas por difração

(b) Número de informações experimentais sobre o gama obtidas em detectores semicondutores

(c) Envolvido em relações baseadas no esquema de decaimento

(d) Corresponde ao 722 keV da  $^{109}\text{Ag}$  analisado separadamente por inconsistência entre os resultados experimentais

**Tabela B.2 - Alterações nos valores recomendados para as energias de raios gama quando considerando as constantes fundamentais do CODATA 2002 e do CODATA 86.**

Nuclídeo	Gama (keV)	Energia MMQ2002 <sup>(a)</sup> (keV)	Energia MMQ86 <sup>(b)</sup> (keV)	Valor <sup>(c)</sup>	Incerteza <sup>(d)</sup>	[D] <sup>(e)</sup>	[S] <sup>(f)</sup>	[R] <sup>(g)</sup>
7-Be	477	477,6030 (22)	477,6034 (22)				2	
22-Na	1274	1274,535 (5)	1274,536 (5)				1	
24-Na	1368	1368,6253 (30)	1368,6263 (31)				2	
	2754	2754,008 (12)	2754,010 (12)				1	
44-Ti	67	67,8675 (18)	67,8676 (18)				1	
	78	78,3235 (11)	78,3235 (11)				2	
46-Sc	889	889,2726 (15)	889,2732 (15)				11	
	1120	1120,5357 (32)	1120,5365 (32)				5	
51-Cr	320	320,0821 (5)	320,0824 (5)			1	1	
54-Mn	834	834,8392 (22)	834,8397 (23)				4	
56-Co	733	733,5089 (26)	733,5094 (26)				6	X
	787	787,7393 (27)	787,7399 (28)				6	X
	846	846,7631 (22)	846,7637 (22)				3	X
	896	896,497 (5)	896,498 (5)				2	X
	977	977,364 (4)	977,365 (4)				2	X
	996	996,938 (4)	996,938 (4)				2	X
	1037	1037,8345 (24)	1037,8352 (24)				6	X
	1140	1140,352 (6)	1140,353 (6)				1	X
	1159	1159,925 (6)	1159,926 (6)				1	X
	1175	1175,0853 (26)	1175,0862 (27)				4	X
	1238	1238,2731 (23)	1238,2740 (23)				3	X
	1335	1335,38 (3)	1335,38 (3)				1	
	1360	1360,197 (3)	1360,198 (3)				4	X
	1640	1640,448 (5)	1640,449 (5)				1	X
	1771	1771,329 (4)	1771,330 (4)				4	X
	1810	1810,726 (4)	1810,727 (4)				3	X
	1963	1963,715 (5)	1963,717 (5)				4	X
	2015	2015,179 (5)	2015,181 (5)				2	X
	2034	2034,752 (5)	2034,754 (5)				5	X
	2113	2113,099 (5)	2113,100 (5)				5	X
	2212	2212,896 (4)	2212,898 (4)				2	X
	2598	2598,438 (4)	2598,440 (4)				6	X
	3009	3009,560 (4)	3009,562 (5)				4	X
	3201	3201,942 (6)	3201,944 (6)				1	X
	3253	3253,405 (5)	3253,407 (6)					X
	3272	3272,977 (6)	3272,979 (6)					X
	3451	3451,117 (5)	3451,119 (5)				3	X
57-Co	122	122,06054 (14)	122,06063 (14)			1		
	136	136,4734 (3)	136,4735 (3)			1	1	
58-Co	810	810,7593 (24)	810,7599 (24)				9	
	863	863,9475 (19)	863,9481 (19)				3	
	1674	1674,721 (7)	1674,722 (7)				1	
59-Fe	142	142,6516 (26)	142,6517 (26)				1	
	192	192,348 (3)	192,348 (3)				2	X
	1099	1099,244 (3)	1099,244 (3)				1	X
	1291	1291,588 (4)	1291,589 (4)				2	X
60-Co	1173	1173,2245 (23)	1173,2254 (23)			1	8	
	1332	1332,4931 (25)	1332,4941 (26)			1	9	
65-Zn	1115	1115,5395 (22)	1115,5403 (22)				4	

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama</i> (keV)	<i>Energia MMQ2002<sup>a)</sup></i> (keV)	<i>Energia MMQ86<sup>b)</sup></i> (keV)	<i>Valor<sup>c)</sup></i>	<i>Incerteza<sup>d)</sup></i>	<i>[D]<sup>f)</sup></i>	<i>[S]<sup>f)</sup></i>	<i>[R]<sup>g)</sup></i>
66-Ga	686	686,082 (6)	686,083 (6)			1	X	
	833	833,5328 (20)	833,5334 (20)			2	X	
	853	853,032 (7)	853,033 (7)			2	X	
	1039	1039,2198 (30)	1039,2205 (30)			2	X	
	1148	1147,893 (10)	1147,893 (10)			2	X	
	1190	1190,283 (8)	1190,284 (8)			2	X	
	1333	1333,115 (5)	1333,116 (5)			1	X	
	1418	1418,756 (6)	1418,757 (6)			1	X	
	1459	1458,661 (12)	1458,662 (12)			2		
	1508	1508,156 (7)	1508,157 (7)			1	X	
	1741	1740,906 (18)	1740,907 (18)			1	X	
	1898	1898,835 (7)	1898,836 (7)			1	X	
	1918	1918,334 (5)	1918,335 (5)			1	X	
	2066	2065,782 (7)	2065,783 (8)			1	X	
	2173	2173,326 (16)	2173,327 (16)			1		
	2189	2189,623 (6)	2189,624 (6)			2	X	
	2213	2213,189 (10)	2213,191 (10)			1	X	
	2393	2393,128 (8)	2393,130 (8)			1	X	
	2423	2422,525 (8)	2422,527 (8)			1	X	
	2751	2751,841 (5)	2751,843 (5)			1	X	
	2780	2780,096 (18)	2780,098 (18)			1	X	
	2933	2933,359 (10)	2933,361 (10)			1	X	
	2977	2977,08 (5)	2977,09 (5)			1		
	2993	2993,21 (4)	2993,21 (4)			1		
	3047	3046,692 (10)	3046,694 (10)			1	X	
	3228	3228,806 (6)	3228,808 (6)			1	X	
	3380	3380,849 (7)	3380,851 (7)			1	X	
	3422	3422,038 (9)	3422,040 (9)			1	X	
	3432	3432,307 (8)	3432,310 (8)			1	X	
	3766	3766,852 (10)	3766,854 (10)				X	
	4085	4085,860 (10)	4085,863 (11)				X	
	4461	4461,200 (10)	4461,203 (10)				X	
	4806	4806,008 (11)	4806,011 (11)				X	
75-Se	66	66,0519 (9)	66,0520 (9)			1	X	
	96	96,7339 (10)	96,7339 (10)			2	X	
	121	121,1154 (12)	121,1154 (12)			1	X	
	136	136,0000 (6)	136,0001 (6)			1	X	
	198	198,6057 (13)	198,6058 (13)			1	X	
	264	264,6574 (10)	264,6576 (10)			2	X	
	279	279,5420 (12)	279,5422 (12)			1	X	
	303	303,9234 (11)	303,9236 (11)			1	X	
82-Br	400	400,6569 (8)	400,6572 (8)			3	X	
	221	221,4792 (22)	221,4793 (22)			2	X	
	554	554,3473 (18)	554,3477 (18)			1	X	
	619	619,1022 (16)	619,1027 (16)			2	X	
	698	698,3714 (16)	698,3719 (16)			4	X	
	776	776,5135 (22)	776,5140 (22)			3	X	
	827	827,8238 (22)	827,8244 (22)			4	X	
	1044	1043,9932 (25)	1043,9939 (26)			4	X	
84-Rb	1317	1317,4679 (21)	1317,4689 (22)			1	X	
	1474	1474,8777 (28)	1474,8788 (28)			1	X	
	1650	1650,331 (3)	1650,332 (3)				X	
	881	881,6060 (16)	881,6066 (16)			3	X	
85-Sr	1016	1016,160 (4)	1016,160 (4)			2	X	
	1897	1897,754 (4)	1897,756 (4)			4	X	
	514	514,0044 (24)	514,0048 (24)			1		
88-Y	898	898,0358 (27)	898,0365 (27)			3		
	1836	1836,048 (5)	1836,049 (5)			6		
94-Nb	702	702,6441 (12)	702,6446 (13)			9		
	871	871,1155 (15)	871,1161 (15)			9		

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama</i> (keV)	<i>Energia MMQ2002<sup>a)</sup></i> (keV)	<i>Energia MMQ86<sup>b)</sup></i> (keV)	<i>Valor<sup>c)</sup></i>	<i>Incerteza<sup>d)</sup></i>	<i>[D]<sup>e)</sup></i>	<i>[S]<sup>f)</sup></i>	<i>[R]<sup>g)</sup></i>
95-Tc	204	204,1172 (16)	204,1173 (16)				5	X
	253	253,0713 (22)	253,0715 (22)				2	X
	582	582,0783 (18)	582,0787 (18)				4	X
	765	765,803 (6)	765,804 (6)				1	
	786	786,1942 (22)	786,1947 (22)				1	X
	820	820,6244 (28)	820,6249 (29)				2	
	835	835,1480 (21)	835,1485 (21)				3	X
	1039	1039,2632 (23)	1039,2640 (24)				3	X
95-Zr	724	724,1951 (28)	724,1956 (28)				1	
99-Mo	40	40,58321 (15)	40,58323 (15)			1	1	
	140	140,5104 (12)	140,5105 (12)				1	
106-Ru	511	511,8530 (26)	511,8534 (26)				1	
108-Ag	433	433,939 (3)	433,939 (3)				5	
	614	614,2808 (14)	614,2813 (14)				6	
	721	722,890 (3)	722,890 (3)				2	
	723	722,925 (3)	722,926 (3)				2	
109-Cd	88	88,0336 (11)	88,0336 (11)				1	
110-Ag	446	446,8146 (20)	446,8149 (20)			2	3	X
	620	620,3561 (14)	620,3566 (14)			2	4	X
	657	657,7595 (11)	657,7600 (11)			2	10	X
	677	677,6206 (11)	677,6211 (12)			2	12	X
	687	687,0101 (14)	687,0106 (15)			1	8	X
	706	706,6775 (12)	706,6780 (12)			2	15	X
	744	744,2746 (14)	744,2751 (15)			1	10	X
	763	763,9420 (15)	763,9425 (15)			2	7	X
	818	818,0240 (15)	818,0246 (16)			1	9	X
	884	884,6779 (14)	884,6785 (15)			1	16	X
	937	937,4830 (21)	937,4837 (21)			2	7	X
	1384	1384,2935 (18)	1384,2945 (18)			2	7	X
	1475	1475,7782 (21)	1475,7793 (21)				4	X
	1505	1505,0286 (20)	1505,0297 (20)			1	2	X
	1562	1562,2926 (20)	1562,2937 (21)				1	X
113-Sn	391	391,698 (3)	391,698 (3)				1	
124-Sb	602	602,7265 (21)	602,7269 (21)				1	X
	645	645,8500 (14)	645,8504 (14)				2	X
	713	713,7770 (27)	713,7776 (27)				1	X
	722	722,7829 (16)	722,7834 (16)				4	X
	790	790,710 (4)	790,710 (4)					
	968	968,1897 (26)	968,1904 (26)				2	X
	1045	1045,1224 (26)	1045,1231 (27)				2	X
	1325	1325,5056 (27)	1325,5066 (27)				2	X
	1368	1368,162 (5)	1368,163 (5)				2	X
	1436	1436,555 (4)	1436,556 (4)				2	X
	1690	1690,9665 (29)	1690,9677 (30)				6	X
	1720	1720,41 (7)	1720,41 (7)				1	
	2090	2090,937 (6)	2090,938 (6)					
125-Sb	176	176,3131 (10)	176,3132 (10)				2	
	204	204,137 (11)	204,137 (11)				1	
	208	208,076 (4)	208,076 (4)				3	X
	427	427,876 (4)	427,876 (4)				1	X
	443	443,557 (10)	443,557 (10)				1	
	463	463,367 (4)	463,367 (4)				1	X
	600	600,5995 (15)	600,5999 (15)				3	
	606	606,7167 (23)	606,7172 (23)				2	
	635	635,9507 (13)	635,9512 (13)				2	X
	671	671,4416 (19)	671,4421 (19)				1	X
125-Sn	1806	1806,686 (11)	1806,687 (11)				1	
	1889	1889,880 (11)	1889,881 (11)				1	
	2002	2002,155 (5)	2002,157 (5)				5	
	2201	2201,006 (13)	2201,008 (13)				1	
	2275	2275,753 (11)	2275,755 (11)				1	

Nuclídeo	Gama (keV)	Energia MMQ2002 <sup>(a)</sup> (keV)	Energia MMQ86 <sup>(b)</sup> (keV)	Valor <sup>(c)</sup>	Incerteza <sup>(d)</sup>	[D] <sup>(e)</sup>	[S] <sup>(f)</sup>	[R] <sup>(g)</sup>
132-Cs	667	667,7155 (13)	667,7159 (13)				2	X
	1317	1317,922 (5)	1317,923 (5)				1	X
	1985	1985,630 (5)	1985,631 (5)				1	X
133-Ba	53	53,1621 (7)	53,1621 (7)				3	X
	79	79,6143 (14)	79,6144 (14)				2	X
	80	80,9966 (10)	80,9967 (10)				4	X
	160	160,6109 (17)	160,6110 (17)				1	X
	223	223,2368 (14)	223,2369 (14)				1	X
	276	276,3987 (14)	276,3989 (14)				4	X
	302	302,8510 (6)	302,8512 (6)				4	X
	356	356,0129 (7)	356,0131 (7)				4	X
	383	383,8474 (11)	383,8476 (11)				4	X
137-Cs	661	661,6566 (11)	661,6570 (11)			1	16	
139-Ce	165	165,8555 (9)	165,8556 (9)			1	4	
141-Ce	145	145,4436 (13)	145,4437 (13)			1	2	
144-Ce	696	696,5092 (13)	696,5097 (13)				4	X
	1489	1489,1478 (28)	1489,1488 (28)				3	X
	2185	2185,649 (3)	2185,651 (3)				8	X
	121	121,7816 (3)	121,7817 (3)			1		X
	244	244,6973 (8)	244,6975 (8)			1	3	X
	251	251,633 (11)	251,633 (11)				1	
	295	295,9386 (19)	295,9388 (19)				2	X
	344	344,2776 (9)	344,2778 (9)			1	3	X
	367	367,7889 (18)	367,7892 (18)			1	2	X
152-Eu	411	411,1161 (11)	411,1164 (11)			1	3	X
	488	488,6785 (22)	488,6788 (22)				1	X
	503	503,472 (5)	503,473 (5)				1	X
	566	566,440 (6)	566,441 (6)				2	X
	586	586,2643 (23)	586,2647 (23)				2	X
	656	656,489 (5)	656,489 (5)				1	
	671	671,155 (19)	671,155 (19)				1	
	678	678,620 (4)	678,621 (4)				1	X
	688	688,673 (4)	688,674 (4)				1	X
	778	778,9039 (21)	778,9045 (21)			1		X
	810	810,454 (4)	810,455 (4)				1	X
	841	841,574 (6)	841,574 (6)				1	X
	867	867,379 (4)	867,379 (4)				1	X
	919	919,335 (4)	919,336 (4)				1	X
	1085	1085,834 (11)	1085,834 (11)				1	
	1089	1089,734 (4)	1089,735 (4)				1	X
	1112	1112,074 (4)	1112,075 (4)				1	X
	1212	1212,945 (12)	1212,946 (12)				1	X
	1299	1299,143 (8)	1299,144 (8)				1	
	1408	1408,011 (4)	1408,012 (4)				1	X
	1457	1457,640 (12)	1457,641 (12)				1	X
153-Gd	69	69,67293 (14)	69,67298 (15)			1		X
	75	75,42207 (26)	75,42213 (26)			1		X
	83	83,36711 (23)	83,36717 (23)			1		X
	89	89,48588 (24)	89,48595 (24)			1		X
	97	97,43092 (23)	97,43099 (24)			1		X
	103	103,18006 (19)	103,18013 (20)			1	1	X
	172	172,85294 (21)	172,85306 (22)			1		X

Nuclídeo	Gama (keV)	Energia MMQ2002 <sup>(a)</sup> (keV)	Energia MMQ86 <sup>(b)</sup> (keV)	Valor <sup>(c)</sup>	Incerteza <sup>(d)</sup>	[D] <sup>(e)</sup>	[S] <sup>(f)</sup>	[R] <sup>(g)</sup>
154-Eu	123	123,0702 (10)	123,0703 (10)				2	X
	247	247,9284 (9)	247,9285 (9)				2	X
	444	444,4934 (20)	444,4937 (20)				2	X
	591	591,7601 (27)	591,7606 (27)				1	X
	625	625,2585 (22)	625,2589 (22)				2	X
	692	692,4210 (18)	692,4215 (18)				4	X
	723	723,3028 (20)	723,3033 (20)				2	X
	756	756,8011 (26)	756,8017 (26)				2	X
	845	845,416 (8)	845,417 (8)				1	
	873	873,1858 (22)	873,1864 (22)				2	X
	892	892,775 (6)	892,775 (6)				2	X
	904	904,0676 (26)	904,0682 (26)				3	X
	996	996,2552 (23)	996,2560 (23)				1	X
	1128	1128,549 (8)	1128,550 (8)				3	
	1140	1140,702 (6)	1140,702 (6)				2	X
	1246	1246,121 (5)	1246,122 (5)				1	X
	1274	1274,430 (4)	1274,431 (4)				2	
	1494	1494,047 (5)	1494,048 (5)				2	X
	1596	1596,4842 (27)	1596,4853 (28)				1	X
160-Tb	86	86,7876 (4)	86,7877 (4)			1		X
	93	93,921 (5)	93,922 (5)			1		X
	197	197,0340 (11)	197,0341 (11)			1	1	
	215	215,6451 (11)	215,6452 (11)			1	2	X
	298	298,5783 (16)	298,5785 (16)			1		X
	879	879,3740 (14)	879,3746 (15)				7	X
	962	962,3068 (22)	962,3075 (22)					X
	966	966,1611 (15)	966,1618 (15)					X
	1177	1177,9505 (19)	1177,9514 (19)				2	X
	1271	1271,871 (5)	1271,872 (5)				1	X
161-Tb	25	25,651302 (29)	25,651321 (31)			1	2	X
	48	48,91524 (5)	48,91528 (5)			4	2	X
	57	57,1916 (3)	57,1917 (3)				1	
	74	74,56654 (8)	74,56659 (8)			1	4	X
169-Yb	63	63,12039 (3)	63,12043 (4)	X		2		X
	93	93,61439 (6)	93,61445 (7)	x		3		
	109	109,77915 (4)	109,77923 (5)	X	x	3		X
	118	118,18931 (11)	118,18940 (12)			3		X
	130	130,52284 (3)	130,52293 (6)	X	x	3		X
	177	177,21290 (4)	177,21303 (8)	X	x	4		X
	197	197,95658 (5)	197,95672 (8)	X	x	8		X
	261	261,07689 (6)	261,07708 (11)	X	x	3		X
	307	307,73559 (6)	307,73581 (12)	X	x	5		X
170-Tm	84	84,25457 (7)	84,25463 (7)			4		
	172-Hf	23	23,93290 (22)	23,93292 (22)			2	
	81	81,7513 (5)	81,7513 (5)				3	
172-Lu	78	78,7423 (5)	78,7424 (5)				2	
	90	90,6435 (7)	90,6436 (7)				2	

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama</i> (keV)	<i>Energia MMQ2002<sup>(a)</sup></i> (keV)	<i>Energia MMQ86<sup>(b)</sup></i> (keV)	<i>Valor<sup>(c)</sup></i>	<i>Incerteza<sup>(d)</sup></i>	<i>[D]<sup>(e)</sup></i>	<i>[S]<sup>(f)</sup></i>	<i>[R]<sup>(g)</sup></i>
182-Ta	31	31,7373 (5)	31,7373 (5)			1		X
	42	42,7146 (3)	42,7147 (3)			1		X
	65	65,72215 (14)	65,72219 (14)			2		X
	67	67,74970 (7)	67,74975 (7)			5		X
	84	84,68012 (24)	84,68018 (25)			1	3	X
	100	100,10586 (7)	100,10593 (8)			1	2	X
	113	113,67155 (21)	113,67163 (22)			2	1	X
	116	116,4174 (5)	116,4175 (5)			1	1	X
	152	152,42979 (24)	152,42990 (25)			2	1	X
	156	156,38616 (29)	156,38627 (30)			2		X
	179	179,39365 (24)	179,39378 (24)			2	1	X
	198	198,35162 (27)	198,35176 (28)			2	3	X
	222	222,10825 (31)	222,10840 (31)			2	1	X
	229	229,3204 (6)	229,3205 (6)			2	1	X
	264	264,07369 (29)	264,07388 (30)			2	3	X
	1121	1121,2874 (19)	1121,2882 (20)			4		X
	1157	1157,2996 (20)	1157,3005 (20)					X
	1189	1189,0367 (19)	1189,0375 (20)			4		X
	1221	1221,3926 (19)	1221,3935 (20)			2		X
	1231	1231,0019 (20)	1231,0028 (20)			2		X
	1257	1257,4048 (20)	1257,4057 (20)			2		X
	1273	1273,7162 (19)	1273,7171 (20)					X
	1289	1289,1418 (19)	1289,1428 (20)					X
	1373	1373,8213 (19)	1373,8223 (20)			1		X
	1387	1387,3869 (19)	1387,3879 (20)					X
185-Os	125	125,3583 (9)	125,3584 (9)			2		X
	162	162,8486 (22)	162,8487 (22)			1		X
	234	234,1545 (22)	234,1547 (22)			1		X
	592	592,0743 (17)	592,0747 (17)			5		X
	646	646,1264 (14)	646,1268 (14)			4		X
	717	717,4321 (16)	717,4326 (16)			5		X
	874	874,8242 (27)	874,8248 (27)			4		
	880	880,2800 (19)	880,2806 (19)			6		X
192-Ir	136	136,34272 (21)	136,34281 (22)			2		X
	205	205,79417 (18)	205,79432 (20)			4		
	295	295,95634 (10)	295,95655 (15)	X	x	6	4	X
	308	308,45494 (14)	308,45516 (18)	X	x	6	3	X
	316	316,50587 (10)	316,50609 (15)	X	x	7	4	X
	416	416,4693 (5)	416,4696 (5)			2		X
	468	468,06841 (17)	468,06875 (23)	X	x	8	3	X
	484	484,5749 (4)	484,5752 (4)			3	2	
	588	588,5812 (5)	588,5817 (5)			5	8	X
	604	604,41077 (18)	604,41120 (28)	X	x	6	4	X
	612	612,46169 (15)	612,46212 (26)	X	x	6	4	X
	884	884,5366 (5)	884,5372 (6)	X		1	6	X

<i>Nuclídeo</i>	<i>Gama (keV)</i>	<i>Energia MMQ2002<sup>(a)</sup> (keV)</i>	<i>Energia MMQ86<sup>(b)</sup> (keV)</i>	<i>Valor<sup>(c)</sup></i>	<i>Incerteza<sup>(d)</sup></i>	<i>[D]<sup>(e)</sup></i>	<i>[S]<sup>(f)</sup></i>	<i>[R]<sup>(g)</sup></i>
198-Au	411	411,80169 (9)	411,80198 (17)	X	x	137	2	X
	675	675,8832 (7)	675,8836 (7)			2	2	X
	1087	1087,6833 (7)	1087,6841 (8)	x			5	X
199-Au	49	49,82630 (11)	49,82634 (11)			1		X
	158	158,37837 (9)	158,37848 (10)	X		1	1	X
	208	208,20463 (10)	208,20478 (12)	X		1	1	X
203-Hg	279	279,1947 (10)	279,1949 (10)			2	2	X
203-Pb	401	401,3206 (27)	401,3208 (27)				1	X
	680	680,5147 (27)	680,5151 (27)				2	X
207-Bi	569	569,7001 (15)	569,7005 (15)				4	
	1063	1063,6526 (24)	1063,6534 (24)				4	
	1770	1770,217 (7)	1770,218 (7)				2	
210-Pb	46	46,5394 (10)	46,5394 (10)				2	
228-Th	583	583,1870 (23)	583,1874 (23)				2	
	2614	2614,511 (11)	2614,513 (11)				1	
241-Am	26	26,34461 (22)	26,34463 (22)				2	
	59	59,54076 (12)	59,54080 (12)				3	

(a) Resultados usando o procedimento desenvolvido neste trabalho adotando as constantes fundamentais do CODATA 2002.

(b) Resultados usando o procedimento desenvolvido neste trabalho quando adotando as constantes fundamentais do CODATA 86

(c) Indicador de que as diferenças nos valores recomendados é superior à menor das incertezas.

(d) Indicador de que as incertezas atribuídas diferem de mais de 25% da menor das incertezas.

(e) Número de informações experimentais de medidas baseadas em difração.

(f) Número de informações experimentais de medidas em detectores semicondutores

(g) Indica se o gama está envolvido em relações baseadas nos esquemas de decaimento.

**Tabela B.3 - Comparaçāo das correlaçāes entre as energias gama quando considerando as constantes fundamentais do CODATA 2002 e do CODATA 86.**

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{2002}^{(a)}$	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(b)}$	Mesmo nuclídeo
78 keV (44-Ti)	67 keV (44-Ti)	0,43	0,43	X
896 keV (56-Co)	733 keV (56-Co)	0,35	0,35	X
1140 keV (56-Co)	896 keV (56-Co)	0,72	0,72	X
	977 keV (56-Co)	0,49	0,49	X
1159 keV (56-Co)	896 keV (56-Co)	0,64	0,64	X
	996 keV (56-Co)	0,52	0,53	X
	1140 keV (56-Co)	0,64	0,65	X
1238 keV (56-Co)	1175 keV (56-Co)	0,54	0,56	X
1640 keV (56-Co)	787 keV (56-Co)	0,47	0,47	X
	1037 keV (56-Co)	0,36	0,37	X
	1175 keV (56-Co)	0,54	0,55	X
	1238 keV (56-Co)	0,40	0,41	X
	1360 keV (56-Co)	-0,39	-0,37	X
1771 keV (56-Co)	733 keV (56-Co)	0,72	0,73	X
	896 keV (56-Co)	0,41	0,41	X
	1037 keV (56-Co)	0,67	0,68	X
	1360 keV (56-Co)	0,31	0,33	X
1810 keV (56-Co)	787 keV (56-Co)	-0,39	-0,36	X
	1175 keV (56-Co)	0,30	0,31	X
	1238 keV (56-Co)	0,46	0,47	X
	1360 keV (56-Co)	0,65	0,66	X
	1640 keV (56-Co)	-0,39	-0,37	X
1963 keV (56-Co)	1360 keV (56-Co)	0,31	0,32	X
	1771 keV (56-Co)	0,30	0,31	X
2015 keV (56-Co)	977 keV (56-Co)	0,85	0,85	X
	1037 keV (56-Co)	0,62	0,63	X
	1140 keV (56-Co)	0,54	0,54	X
	1771 keV (56-Co)	0,48	0,49	X
	1963 keV (56-Co)	0,35	0,36	X
2034 keV (56-Co)	977 keV (56-Co)	0,30	0,31	X
	996 keV (56-Co)	0,86	0,86	X
	1037 keV (56-Co)	0,41	0,42	X
	1159 keV (56-Co)	0,55	0,55	X
	1771 keV (56-Co)	0,36	0,37	X
	1963 keV (56-Co)	0,35	0,36	X
	2015 keV (56-Co)	0,45	0,46	X
2113 keV (56-Co)	896 keV (56-Co)	-0,66	-0,65	X
	1140 keV (56-Co)	-0,54	-0,53	X
	1159 keV (56-Co)	-0,51	-0,49	X
	1238 keV (56-Co)	0,32	0,33	X
	1771 keV (56-Co)	0,30	0,31	X
	1963 keV (56-Co)	0,46	0,47	X
	2015 keV (56-Co)	0,33	0,34	X
	2034 keV (56-Co)	0,35	0,36	X
2212 keV (56-Co)	1037 keV (56-Co)	0,69	0,69	X
	1175 keV (56-Co)	0,75	0,75	X
	1238 keV (56-Co)	0,46	0,48	X
	1640 keV (56-Co)	0,63	0,64	X
	1771 keV (56-Co)	0,51	0,53	X
	1810 keV (56-Co)	0,37	0,38	X
	2015 keV (56-Co)	0,47	0,48	X
	2034 keV (56-Co)	0,35	0,37	X
	2113 keV (56-Co)	0,31	0,33	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{2002}^{(a)}$	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(b)}$	Mesmo nuclídeo
2598 keV (56-Co)	1175 keV (56-Co)	0,38	0,40	X
	1238 keV (56-Co)	0,57	0,59	X
	1360 keV (56-Co)	0,83	0,84	X
	1771 keV (56-Co)	0,34	0,36	X
	1810 keV (56-Co)	0,79	0,79	X
	1963 keV (56-Co)	0,33	0,35	X
	2113 keV (56-Co)	0,34	0,36	X
	2212 keV (56-Co)	0,44	0,47	X
	733 keV (56-Co)	0,63	0,63	X
	896 keV (56-Co)	0,43	0,43	X
	1037 keV (56-Co)	0,57	0,59	X
	1175 keV (56-Co)	0,35	0,37	X
	1238 keV (56-Co)	0,63	0,64	X
	1640 keV (56-Co)	0,37	0,38	X
3009 keV (56-Co)	1771 keV (56-Co)	0,86	0,87	X
	1810 keV (56-Co)	0,45	0,47	X
	1963 keV (56-Co)	0,31	0,33	X
	2015 keV (56-Co)	0,44	0,46	X
	2034 keV (56-Co)	0,35	0,37	X
	2113 keV (56-Co)	0,39	0,41	X
	2212 keV (56-Co)	0,64	0,65	X
	2598 keV (56-Co)	0,56	0,58	X
	1037 keV (56-Co)	0,28	0,30	X
	1175 keV (56-Co)	0,31	0,33	X
	1238 keV (56-Co)	0,51	0,53	X
	1771 keV (56-Co)	0,31	0,34	X
	1810 keV (56-Co)	0,39	0,41	X
	1963 keV (56-Co)	0,92	0,92	X
3201 keV (56-Co)	2015 keV (56-Co)	0,35	0,37	X
	2034 keV (56-Co)	0,36	0,37	X
	2113 keV (56-Co)	0,52	0,53	X
	2212 keV (56-Co)	0,41	0,43	X
	2598 keV (56-Co)	0,51	0,53	X
	3009 keV (56-Co)	0,51	0,53	X
	977 keV (56-Co)	0,77	0,77	X
	1037 keV (56-Co)	0,57	0,58	X
	1140 keV (56-Co)	0,54	0,54	X
	1175 keV (56-Co)	0,29	0,32	X
	1238 keV (56-Co)	0,53	0,55	X
	1640 keV (56-Co)	0,36	0,37	X
	1771 keV (56-Co)	0,47	0,49	X
	1810 keV (56-Co)	0,37	0,39	X
3253 keV (56-Co)	1963 keV (56-Co)	0,36	0,37	X
	2015 keV (56-Co)	0,91	0,91	X
	2034 keV (56-Co)	0,44	0,46	X
	2113 keV (56-Co)	0,41	0,43	X
	2212 keV (56-Co)	0,59	0,61	X
	2598 keV (56-Co)	0,47	0,49	X
	3009 keV (56-Co)	0,64	0,66	X
	3201 keV (56-Co)	0,51	0,53	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{2002}^{(a)}$	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(b)}$	Mesmo nuclídeo
3272 keV (56-Co)	977 keV (56-Co)	0,29	0,30	X
	996 keV (56-Co)	0,78	0,78	X
	1037 keV (56-Co)	0,39	0,41	X
	1159 keV (56-Co)	0,56	0,56	X
	1175 keV (56-Co)	0,31	0,33	X
	1238 keV (56-Co)	0,53	0,54	X
	1640 keV (56-Co)	0,29	0,31	X
	1771 keV (56-Co)	0,37	0,39	X
	1810 keV (56-Co)	0,36	0,37	X
	1963 keV (56-Co)	0,36	0,37	X
	2015 keV (56-Co)	0,44	0,45	X
	2034 keV (56-Co)	0,92	0,92	X
	2113 keV (56-Co)	0,43	0,44	X
	2212 keV (56-Co)	0,49	0,51	X
	2598 keV (56-Co)	0,46	0,48	X
	3009 keV (56-Co)	0,56	0,58	X
	3201 keV (56-Co)	0,51	0,53	X
	3253 keV (56-Co)	0,60	0,61	X
3451 keV (56-Co)	1037 keV (56-Co)	0,53	0,55	X
	1175 keV (56-Co)	0,77	0,78	X
	1238 keV (56-Co)	0,77	0,78	X
	1640 keV (56-Co)	0,63	0,64	X
	1771 keV (56-Co)	0,43	0,45	X
	1810 keV (56-Co)	0,47	0,48	X
	2015 keV (56-Co)	0,39	0,41	X
	2034 keV (56-Co)	0,31	0,33	X
	2113 keV (56-Co)	0,36	0,38	X
	2212 keV (56-Co)	0,92	0,92	X
	2598 keV (56-Co)	0,57	0,59	X
	3009 keV (56-Co)	0,73	0,75	X
	3201 keV (56-Co)	0,52	0,54	X
	3253 keV (56-Co)	0,66	0,67	X
	3272 keV (56-Co)	0,58	0,60	X
1291 keV (59-Fe)	1274 keV (22-Na)	0,78	0,78	
	192 keV (59-Fe)	0,65	0,65	X
	1099 keV (59-Fe)	0,64	0,65	X
	1148 keV (66-Ga)	0,38	0,38	X
	1190 keV (66-Ga)	0,38	0,39	X
1418 keV (66-Ga)	1333 keV (66-Ga)	-0,47	-0,45	X
	853 keV (66-Ga)	-0,71	-0,71	X
	1148 keV (66-Ga)	-0,34	-0,34	X
	1418 keV (66-Ga)	0,32	0,33	X
	1963 keV (56-Co)	0,72	0,72	
1918 keV (66-Ga)	3201 keV (56-Co)	0,70	0,70	
	1333 keV (66-Ga)	0,35	0,36	X
	1418 keV (66-Ga)	0,60	0,60	X
	1898 keV (66-Ga)	0,52	0,52	X
	686 keV (66-Ga)	-0,71	-0,70	X
2066 keV (66-Ga)	1190 keV (66-Ga)	-0,41	-0,40	X
	1418 keV (66-Ga)	0,40	0,40	X
	1918 keV (66-Ga)	0,52	0,53	X
	1963 keV (56-Co)	0,71	0,72	
2189 keV (66-Ga)	3201 keV (56-Co)	0,77	0,77	
	1418 keV (66-Ga)	0,33	0,34	X
	1508 keV (66-Ga)	0,32	0,33	X
	1898 keV (66-Ga)	0,49	0,50	X
	1918 keV (66-Ga)	0,55	0,55	X
	2066 keV (66-Ga)	0,31	0,32	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{2002}^{(a)}$	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(b)}$	Mesmo nuclídeo
2213 keV (66-Ga)	1148 keV (66-Ga)	0,71	0,71	X
	1898 keV (66-Ga)	0,40	0,40	X
	1918 keV (66-Ga)	0,34	0,35	X
	2189 keV (66-Ga)	0,52	0,53	X
2393 keV (66-Ga)	1508 keV (66-Ga)	0,35	0,35	X
2423 keV (66-Ga)	1190 keV (66-Ga)	0,59	0,59	X
	1918 keV (66-Ga)	0,34	0,34	X
	2066 keV (66-Ga)	0,47	0,47	X
2751 keV (66-Ga)	3201 keV (56-Co)	0,69	0,70	
	833 keV (66-Ga)	0,30	0,31	X
	1333 keV (66-Ga)	0,38	0,39	X
	1418 keV (66-Ga)	0,64	0,64	X
	1898 keV (66-Ga)	0,51	0,52	X
	1918 keV (66-Ga)	0,93	0,93	X
	2066 keV (66-Ga)	0,58	0,59	X
	2189 keV (66-Ga)	0,54	0,55	X
	2213 keV (66-Ga)	0,32	0,32	X
	2423 keV (66-Ga)	0,34	0,35	X
2780 keV (66-Ga)	1741 keV (66-Ga)	0,99	0,99	X
3047 keV (66-Ga)	1148 keV (66-Ga)	0,73	0,73	X
	1898 keV (66-Ga)	0,40	0,40	X
	1918 keV (66-Ga)	0,32	0,33	X
	2189 keV (66-Ga)	0,52	0,53	X
	2213 keV (66-Ga)	0,98	0,98	X
	2751 keV (66-Ga)	0,37	0,38	X
3228 keV (66-Ga)	1963 keV (56-Co)	0,80	0,80	
	3201 keV (56-Co)	0,86	0,87	
	1418 keV (66-Ga)	0,38	0,38	X
	1898 keV (66-Ga)	0,53	0,54	X
	1918 keV (66-Ga)	0,61	0,61	X
	2066 keV (66-Ga)	0,35	0,36	X
	2189 keV (66-Ga)	0,88	0,88	X
	2213 keV (66-Ga)	0,49	0,49	X
	2751 keV (66-Ga)	0,60	0,62	X
	3047 keV (66-Ga)	0,49	0,50	X
3380 keV (66-Ga)	1508 keV (66-Ga)	0,87	0,87	X
	2393 keV (66-Ga)	0,32	0,33	X
	3228 keV (66-Ga)	0,32	0,34	X
3422 keV (66-Ga)	3380 keV (66-Ga)	0,37	0,38	X
3432 keV (66-Ga)	2393 keV (66-Ga)	0,93	0,93	X
	3228 keV (66-Ga)	0,31	0,33	X
	3380 keV (66-Ga)	0,38	0,39	X
	3422 keV (66-Ga)	0,30	0,32	X
3766 keV (66-Ga)	2933 keV (66-Ga)	0,98	0,98	X
4085 keV (66-Ga)	1148 keV (66-Ga)	0,67	0,67	X
	1898 keV (66-Ga)	0,41	0,42	X
	1918 keV (66-Ga)	0,35	0,36	X
	2189 keV (66-Ga)	0,45	0,46	X
	2213 keV (66-Ga)	0,94	0,94	X
	2751 keV (66-Ga)	0,40	0,42	X
	3047 keV (66-Ga)	0,96	0,96	X
	3228 keV (66-Ga)	0,56	0,57	X
4461 keV (66-Ga)	1039 keV (66-Ga)	0,40	0,41	X
	3228 keV (66-Ga)	0,32	0,34	X
	3380 keV (66-Ga)	0,39	0,40	X
	3422 keV (66-Ga)	0,96	0,96	X
	3432 keV (66-Ga)	0,34	0,36	X
4806 keV (66-Ga)	1039 keV (66-Ga)	0,35	0,36	X
	2933 keV (66-Ga)	0,94	0,94	X
	3766 keV (66-Ga)	0,96	0,96	X
	4461 keV (66-Ga)	0,30	0,32	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{2002}^{(a)}$	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(b)}$	Mesmo nuclídeo
198 keV (75-Se)	66 keV (75-Se)	-0,67	-0,66	X
	136 keV (75-Se)	-0,38	-0,38	X
264 keV (75-Se)	121 keV (75-Se)	0,31	0,31	X
	136 keV (75-Se)	-0,52	-0,51	X
279 keV (75-Se)	198 keV (75-Se)	0,73	0,73	X
	121 keV (75-Se)	-0,76	-0,75	X
303 keV (75-Se)	96 keV (75-Se)	-0,69	-0,68	X
	198 keV (75-Se)	0,31	0,32	X
400 keV (75-Se)	264 keV (75-Se)	0,43	0,43	X
	121 keV (75-Se)	0,41	0,41	X
827 keV (82-Br)	198 keV (75-Se)	0,56	0,56	X
	264 keV (75-Se)	0,76	0,76	X
1044 keV (82-Br)	303 keV (75-Se)	0,56	0,57	X
	554 keV (82-Br)	0,31	0,32	X
1317 keV (82-Br)	554 keV (82-Br)	0,41	0,42	X
	619 keV (82-Br)	0,32	0,33	X
1474 keV (82-Br)	698 keV (82-Br)	0,35	0,37	X
	827 keV (82-Br)	-0,34	-0,31	X
1650 keV (82-Br)	619 keV (82-Br)	0,67	0,68	X
	698 keV (82-Br)	0,68	0,69	X
881 keV (84-Rb)	827 keV (82-Br)	0,37	0,39	X
	1044 keV (82-Br)	0,50	0,51	X
1897 keV (84-Rb)	1317 keV (82-Br)	0,63	0,64	X
	776 keV (82-Br)	0,82	0,83	X
871 keV (94-Nb)	1474 keV (82-Br)	0,49	0,51	X
	221 keV (82-Br)	-0,61	-0,60	X
582 keV (95-Tc)	554 keV (82-Br)	0,49	0,50	X
	619 keV (82-Br)	0,37	0,39	X
786 keV (95-Tc)	698 keV (82-Br)	0,42	0,43	X
	827 keV (82-Br)	0,41	0,43	X
820 keV (95-Tc)	1044 keV (82-Br)	0,48	0,49	X
	1317 keV (82-Br)	0,59	0,60	X
835 keV (95-Tc)	1474 keV (82-Br)	0,29	0,31	X
	889 keV (46-Sc)	0,79	0,80	
1039 keV (95-Tc)	881 keV (84-Rb)	0,34	0,36	X
	1016 keV (84-Rb)	0,92	0,92	X
657 keV (110-Ag)	889 keV (46-Sc)	0,71	0,72	
	881 keV (84-Rb)	0,79	0,80	
677 keV (110-Ag)	253 keV (95-Tc)	-0,45	-0,45	X
	204 keV (95-Tc)	0,57	0,57	X
687 keV (110-Ag)	253 keV (95-Tc)	-0,42	-0,41	X
	582 keV (95-Tc)	0,67	0,68	X
706 keV (110-Ag)	253 keV (95-Tc)	0,42	0,43	X
	253 keV (95-Tc)	0,63	0,63	X
744 keV (110-Ag)	582 keV (95-Tc)	0,40	0,41	X
	820 keV (95-Tc)	0,67	0,68	X
657 keV (110-Ag)	204 keV (95-Tc)	0,48	0,48	X
	786 keV (95-Tc)	0,54	0,54	X
677 keV (110-Ag)	820 keV (95-Tc)	0,54	0,55	X
	820 keV (95-Tc)	0,49	0,49	X
687 keV (110-Ag)	835 keV (95-Tc)	0,73	0,73	X
	620 keV (110-Ag)	0,36	0,38	X
706 keV (110-Ag)	620 keV (110-Ag)	0,46	0,48	X
	657 keV (110-Ag)	0,64	0,66	X
744 keV (110-Ag)	620 keV (110-Ag)	0,61	0,62	X
	446 keV (110-Ag)	0,30	0,31	X
744 keV (110-Ag)	620 keV (110-Ag)	0,43	0,44	X
	687 keV (110-Ag)	0,56	0,58	X
744 keV (110-Ag)	657 keV (110-Ag)	0,41	0,44	X
	677 keV (110-Ag)	0,56	0,57	X
744 keV (110-Ag)	687 keV (110-Ag)	0,58	0,59	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{2002}^{(a)}$	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(b)}$	Mesmo nuclídeo
763 keV (110-Ag)	657 keV (110-Ag)	0,35	0,37	X
	677 keV (110-Ag)	0,46	0,47	X
	706 keV (110-Ag)	0,51	0,53	X
	744 keV (110-Ag)	0,64	0,65	X
818 keV (110-Ag)	620 keV (110-Ag)	0,31	0,33	X
	677 keV (110-Ag)	0,38	0,40	X
884 keV (110-Ag)	889 keV (46-Sc)	0,71	0,72	
	687 keV (110-Ag)	0,28	0,31	X
	706 keV (110-Ag)	0,29	0,32	X
	744 keV (110-Ag)	0,44	0,46	X
	763 keV (110-Ag)	0,38	0,40	X
	818 keV (110-Ag)	0,65	0,66	X
937 keV (110-Ag)	446 keV (110-Ag)	-0,63	-0,61	X
	657 keV (110-Ag)	0,31	0,33	X
	677 keV (110-Ag)	0,38	0,40	X
	706 keV (110-Ag)	0,36	0,38	X
	744 keV (110-Ag)	0,31	0,33	X
	763 keV (110-Ag)	0,34	0,36	X
1384 keV (110-Ag)	446 keV (110-Ag)	0,37	0,38	X
	620 keV (110-Ag)	0,59	0,60	X
	657 keV (110-Ag)	0,57	0,60	X
	677 keV (110-Ag)	0,75	0,76	X
	687 keV (110-Ag)	0,52	0,54	X
	706 keV (110-Ag)	0,77	0,78	X
	744 keV (110-Ag)	0,54	0,56	X
	763 keV (110-Ag)	0,64	0,65	X
	818 keV (110-Ag)	0,33	0,36	X
	884 keV (110-Ag)	0,30	0,34	X
	937 keV (110-Ag)	0,49	0,50	X
1475 keV (110-Ag)	620 keV (110-Ag)	0,42	0,44	X
	657 keV (110-Ag)	0,70	0,71	X
	677 keV (110-Ag)	0,61	0,63	X
	818 keV (110-Ag)	0,87	0,87	X
	884 keV (110-Ag)	0,57	0,59	X
	937 keV (110-Ag)	0,34	0,36	X
	1384 keV (110-Ag)	0,54	0,57	X
1505 keV (110-Ag)	620 keV (110-Ag)	0,69	0,70	X
	657 keV (110-Ag)	0,38	0,41	X
	677 keV (110-Ag)	0,45	0,48	X
	687 keV (110-Ag)	0,64	0,65	X
	706 keV (110-Ag)	0,51	0,53	X
	744 keV (110-Ag)	0,32	0,35	X
	818 keV (110-Ag)	0,69	0,70	X
	884 keV (110-Ag)	0,71	0,72	X
	937 keV (110-Ag)	0,37	0,40	X
	1384 keV (110-Ag)	0,63	0,66	X
	1475 keV (110-Ag)	0,71	0,72	X
1562 keV (110-Ag)	657 keV (110-Ag)	0,50	0,53	X
	677 keV (110-Ag)	0,70	0,71	X
	687 keV (110-Ag)	0,33	0,36	X
	706 keV (110-Ag)	0,29	0,33	X
	744 keV (110-Ag)	0,64	0,65	X
	763 keV (110-Ag)	0,54	0,56	X
	818 keV (110-Ag)	0,69	0,70	X
	884 keV (110-Ag)	0,82	0,83	X
	937 keV (110-Ag)	0,42	0,44	X
	1384 keV (110-Ag)	0,65	0,67	X
	1475 keV (110-Ag)	0,76	0,78	X
	1505 keV (110-Ag)	0,77	0,79	X
602 keV (124-Sb)	582 keV (95-Tc)	0,84	0,84	

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{2002}^{(a)}$	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(b)}$	Mesmo nuclídeo
722 keV (124-Sb)	702 keV (94-Nb)	0,73	0,73	
	645 keV (124-Sb)	0,37	0,39	X
	713 keV (124-Sb)	0,57	0,57	X
790 keV (124-Sb)	713 keV (124-Sb)	0,90	0,90	X
	722 keV (124-Sb)	0,71	0,71	X
1045 keV (124-Sb)	722 keV (124-Sb)	0,33	0,34	X
	790 keV (124-Sb)	0,30	0,31	X
	968 keV (124-Sb)	0,79	0,79	X
1325 keV (124-Sb)	582 keV (95-Tc)	0,70	0,70	
	602 keV (124-Sb)	0,81	0,81	X
	713 keV (124-Sb)	0,35	0,36	X
	722 keV (124-Sb)	0,62	0,63	X
	790 keV (124-Sb)	0,43	0,43	X
1436 keV (124-Sb)	645 keV (124-Sb)	0,31	0,32	X
	713 keV (124-Sb)	0,94	0,94	X
	722 keV (124-Sb)	0,82	0,82	X
	790 keV (124-Sb)	0,93	0,93	X
	1325 keV (124-Sb)	0,51	0,52	X
1690 keV (124-Sb)	645 keV (124-Sb)	0,43	0,45	X
	722 keV (124-Sb)	0,48	0,49	X
	968 keV (124-Sb)	0,84	0,84	X
	1045 keV (124-Sb)	0,88	0,88	X
	1325 keV (124-Sb)	0,36	0,38	X
2090 keV (124-Sb)	1436 keV (124-Sb)	0,39	0,41	X
	722 keV (124-Sb)	0,38	0,40	X
	1368 keV (124-Sb)	0,96	0,96	X
208 keV (125-Sb)	1436 keV (124-Sb)	0,31	0,32	X
	433 keV (108-Ag)	-0,89	-0,89	
	204 keV (125-Sb)	0,34	0,34	X
427 keV (125-Sb)	433 keV (108-Ag)	0,95	0,95	
	204 keV (125-Sb)	-0,32	-0,31	X
	208 keV (125-Sb)	-0,93	-0,93	X
443 keV (125-Sb)	208 keV (125-Sb)	-0,31	-0,31	X
	427 keV (125-Sb)	0,33	0,33	X
	433 keV (108-Ag)	0,95	0,95	
463 keV (125-Sb)	208 keV (125-Sb)	-0,86	-0,86	X
	427 keV (125-Sb)	0,91	0,91	X
	443 keV (125-Sb)	0,33	0,34	X
600 keV (125-Sb)	614 keV (108-Ag)	0,75	0,75	
	606 keV (125-Sb)	0,52	0,52	X
	635 keV (125-Sb)	0,71	0,72	
671 keV (125-Sb)	600 keV (125-Sb)	0,53	0,54	X
	606 keV (125-Sb)	0,41	0,41	X
	208 keV (125-Sb)	0,30	0,30	X
667 keV (132-Cs)	600 keV (125-Sb)	0,34	0,35	X
	635 keV (125-Sb)	0,63	0,64	X
	702 keV (94-Nb)	0,73	0,73	
1985 keV (132-Cs)	667 keV (132-Cs)	0,37	0,39	X
	1317 keV (132-Cs)	0,97	0,97	X
	80 keV (133-Ba)	0,76	0,76	
223 keV (133-Ba)	79 keV (133-Ba)	0,80	0,80	X
	80 keV (133-Ba)	0,56	0,56	X
	53 keV (133-Ba)	-0,34	-0,33	X
276 keV (133-Ba)	79 keV (133-Ba)	-0,91	-0,91	X
	160 keV (133-Ba)	-0,76	-0,76	X
	160 keV (133-Ba)	-0,87	-0,86	X
302 keV (133-Ba)	160 keV (133-Ba)	-0,69	-0,69	X
	223 keV (133-Ba)	0,87	0,87	X
	53 keV (133-Ba)	-0,42	-0,41	X
356 keV (133-Ba)	53 keV (133-Ba)	0,65	0,64	X
	302 keV (133-Ba)	0,42	0,43	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{2002}^{(a)}$	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(b)}$	Mesmo nuclídeo
383 keV (133-Ba)	80 keV (133-Ba)	0,84	0,84	X
	160 keV (133-Ba)	0,53	0,53	X
	302 keV (133-Ba)	0,42	0,43	X
661 keV (137-Cs)	667 keV (132-Cs)	0,70	0,71	
696 keV (144-Ce)	702 keV (94-Nb)	0,73	0,74	
	661 keV (137-Cs)	0,70	0,71	
2185 keV (144-Ce)	696 keV (144-Ce)	0,57	0,58	X
	1489 keV (144-Ce)	0,93	0,93	X
586 keV (152-Eu)	503 keV (152-Eu)	-0,43	-0,42	X
678 keV (152-Eu)	503 keV (152-Eu)	0,83	0,83	X
778 keV (152-Eu)	367 keV (152-Eu)	0,85	0,86	X
	411 keV (152-Eu)	0,51	0,52	X
810 keV (152-Eu)	688 keV (152-Eu)	1,00	1,00	X
841 keV (152-Eu)	566 keV (152-Eu)	-0,81	-0,81	X
867 keV (152-Eu)	295 keV (152-Eu)	-0,31	-0,30	X
	841 keV (152-Eu)	0,33	0,34	X
919 keV (152-Eu)	488 keV (152-Eu)	-0,52	-0,51	X
	841 keV (152-Eu)	0,34	0,34	X
	867 keV (152-Eu)	0,70	0,70	X
1089 keV (152-Eu)	503 keV (152-Eu)	0,86	0,86	X
	678 keV (152-Eu)	0,96	0,96	X
1112 keV (152-Eu)	295 keV (152-Eu)	-0,31	-0,31	X
	841 keV (152-Eu)	0,34	0,35	X
	867 keV (152-Eu)	0,97	0,97	X
	919 keV (152-Eu)	0,72	0,73	X
1408 keV (152-Eu)	841 keV (152-Eu)	0,40	0,40	X
	867 keV (152-Eu)	0,83	0,83	X
	919 keV (152-Eu)	0,84	0,84	X
	1112 keV (152-Eu)	0,86	0,86	X
1457 keV (152-Eu)	1212 keV (152-Eu)	1,00	1,00	X
89 keV (153-Gd)	83 keV (153-Gd)	-0,60	-0,58	X
97 keV (153-Gd)	75 keV (153-Gd)	-0,64	-0,62	X
103 keV (153-Gd)	75 keV (153-Gd)	0,38	0,39	X
	83 keV (153-Gd)	0,29	0,31	X
	89 keV (153-Gd)	0,37	0,38	X
172 keV (153-Gd)	69 keV (153-Gd)	0,46	0,48	X
	75 keV (153-Gd)	0,51	0,52	X
	83 keV (153-Gd)	0,39	0,41	X
	89 keV (153-Gd)	0,50	0,51	X
	97 keV (153-Gd)	0,33	0,35	X
	103 keV (153-Gd)	0,74	0,75	X
444 keV (154-Eu)	247 keV (154-Eu)	-0,38	-0,37	X
625 keV (154-Eu)	591 keV (154-Eu)	0,40	0,40	X
692 keV (154-Eu)	444 keV (154-Eu)	0,90	0,90	X
723 keV (154-Eu)	591 keV (154-Eu)	0,31	0,32	X
	692 keV (154-Eu)	0,32	0,33	X
756 keV (154-Eu)	591 keV (154-Eu)	-0,46	-0,45	X
	625 keV (154-Eu)	0,32	0,33	X
	723 keV (154-Eu)	0,32	0,32	X
873 keV (154-Eu)	591 keV (154-Eu)	0,36	0,37	X
	625 keV (154-Eu)	0,92	0,92	X
	756 keV (154-Eu)	0,31	0,32	X
904 keV (154-Eu)	591 keV (154-Eu)	0,40	0,41	X
	625 keV (154-Eu)	0,53	0,53	X
	723 keV (154-Eu)	0,43	0,44	X
	756 keV (154-Eu)	0,37	0,37	X
	873 keV (154-Eu)	0,58	0,58	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{2002}^{(a)}$	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(b)}$	Mesmo nuclídeo
996 keV (154-Eu)	123 keV (154-Eu)	0,34	0,34	X
	591 keV (154-Eu)	0,33	0,33	X
	625 keV (154-Eu)	0,82	0,83	X
	873 keV (154-Eu)	0,90	0,90	X
	904 keV (154-Eu)	0,53	0,54	X
1140 keV (154-Eu)	892 keV (154-Eu)	0,99	0,99	X
1494 keV (154-Eu)	1246 keV (154-Eu)	0,99	0,99	X
1596 keV (154-Eu)	444 keV (154-Eu)	0,32	0,32	X
	591 keV (154-Eu)	0,52	0,52	X
	625 keV (154-Eu)	0,62	0,62	X
	692 keV (154-Eu)	0,40	0,41	X
	723 keV (154-Eu)	0,62	0,63	X
	756 keV (154-Eu)	0,47	0,48	X
	873 keV (154-Eu)	0,69	0,70	X
	904 keV (154-Eu)	0,77	0,77	X
	996 keV (154-Eu)	0,63	0,64	X
962 keV (160-Tb)	215 keV (160-Tb)	-0,51	-0,49	X
	298 keV (160-Tb)	0,57	0,57	X
	879 keV (160-Tb)	0,48	0,49	X
966 keV (160-Tb)	879 keV (160-Tb)	0,97	0,97	X
	962 keV (160-Tb)	0,46	0,48	X
1177 keV (160-Tb)	298 keV (160-Tb)	0,67	0,67	X
	879 keV (160-Tb)	0,55	0,57	X
	962 keV (160-Tb)	0,86	0,86	X
	966 keV (160-Tb)	0,54	0,56	X
1271 keV (160-Tb)	1291 keV (59-Fe)	0,75	0,75	
	93 keV (160-Tb)	0,92	0,91	X
48 keV (161-Tb)	25 keV (161-Tb)	0,89	0,90	X
74 keV (161-Tb)	25 keV (161-Tb)	0,96	0,96	X
	48 keV (161-Tb)	0,99	0,99	X
93 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0,10	0,33	X
109 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0,15	0,49	X
	93 keV (169-Yb)	0,10	0,39	X
130 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0,16	0,53	X
	93 keV (169-Yb)	0,12	0,44	X
	109 keV (169-Yb)	0,35	0,73	X
	118 keV (169-Yb)	0,07	0,33	X
177 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0,18	0,54	X
	93 keV (169-Yb)	0,14	0,45	X
	109 keV (169-Yb)	0,47	0,77	X
	118 keV (169-Yb)	0,07	0,33	X
	130 keV (169-Yb)	0,05	0,68	X
197 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0,16	0,54	X
	93 keV (169-Yb)	0,13	0,45	X
	109 keV (169-Yb)	-0,11	0,55	X
	118 keV (169-Yb)	0,08	0,33	X
	130 keV (169-Yb)	0,45	0,83	X
	177 keV (169-Yb)	0,61	0,88	X
261 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0,66	0,77	X
	93 keV (169-Yb)	0,15	0,46	X
	109 keV (169-Yb)	-0,00	0,60	X
	118 keV (169-Yb)	0,08	0,33	X
	130 keV (169-Yb)	0,43	0,82	X
	177 keV (169-Yb)	0,56	0,86	X
	197 keV (169-Yb)	0,85	0,95	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{2002}^{(a)}$	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(b)}$	Mesmo nuclídeo
307 keV (169-Yb)	63 keV (169-Yb)	0,23	0,59	X
	93 keV (169-Yb)	0,18	0,48	X
	109 keV (169-Yb)	0,58	0,82	X
	118 keV (169-Yb)	0,10	0,36	X
	130 keV (169-Yb)	0,61	0,89	X
	177 keV (169-Yb)	0,82	0,94	X
	197 keV (169-Yb)	0,75	0,93	X
	261 keV (169-Yb)	0,69	0,92	X
67 keV (182-Ta)	25 keV (161-Tb)	0,86	0,87	
	48 keV (161-Tb)	0,93	0,93	
	74 keV (161-Tb)	0,93	0,93	
113 keV (182-Ta)	42 keV (182-Ta)	-0,51	-0,49	X
116 keV (182-Ta)	31 keV (182-Ta)	0,88	0,88	X
	84 keV (182-Ta)	0,45	0,45	X
152 keV (182-Ta)	84 keV (182-Ta)	0,96	0,96	X
	116 keV (182-Ta)	0,44	0,44	X
156 keV (182-Ta)	42 keV (182-Ta)	0,78	0,77	X
179 keV (182-Ta)	42 keV (182-Ta)	-0,47	-0,45	X
	65 keV (182-Ta)	0,45	0,48	X
	113 keV (182-Ta)	0,82	0,83	X
198 keV (182-Ta)	84 keV (182-Ta)	0,67	0,67	X
	113 keV (182-Ta)	0,52	0,54	X
	116 keV (182-Ta)	0,31	0,31	X
	152 keV (182-Ta)	0,64	0,66	X
222 keV (182-Ta)	179 keV (182-Ta)	0,40	0,44	X
	42 keV (182-Ta)	0,73	0,72	X
	65 keV (182-Ta)	0,32	0,35	X
	156 keV (182-Ta)	0,90	0,90	X
264 keV (182-Ta)	65 keV (182-Ta)	0,37	0,40	X
	84 keV (182-Ta)	0,62	0,63	X
	113 keV (182-Ta)	0,42	0,45	X
	116 keV (182-Ta)	0,30	0,31	X
	152 keV (182-Ta)	0,61	0,63	X
	179 keV (182-Ta)	0,59	0,62	X
	198 keV (182-Ta)	0,88	0,89	X
1121 keV (182-Ta)	1175 keV (56-Co)	0,69	0,70	
	1238 keV (56-Co)	0,79	0,80	
	3451 keV (56-Co)	0,75	0,76	
1157 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0,78	0,78	
	3451 keV (56-Co)	0,74	0,75	
	1121 keV (182-Ta)	0,97	0,97	X
1189 keV (182-Ta)	1175 keV (56-Co)	0,69	0,70	
	1238 keV (56-Co)	0,79	0,80	
	3451 keV (56-Co)	0,75	0,76	
	1121 keV (182-Ta)	1,00	1,00	X
	1157 keV (182-Ta)	0,97	0,97	X
1221 keV (182-Ta)	1175 keV (56-Co)	0,69	0,70	
	1238 keV (56-Co)	0,79	0,80	
	3451 keV (56-Co)	0,75	0,76	
	1121 keV (182-Ta)	1,00	1,00	X
	1157 keV (182-Ta)	0,97	0,97	X
	1189 keV (182-Ta)	1,00	1,00	X
1231 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0,79	0,79	
	3451 keV (56-Co)	0,74	0,76	
	1121 keV (182-Ta)	0,98	0,98	X
	1157 keV (182-Ta)	0,96	0,96	X
	1189 keV (182-Ta)	0,98	0,98	X
	1221 keV (182-Ta)	0,98	0,98	X

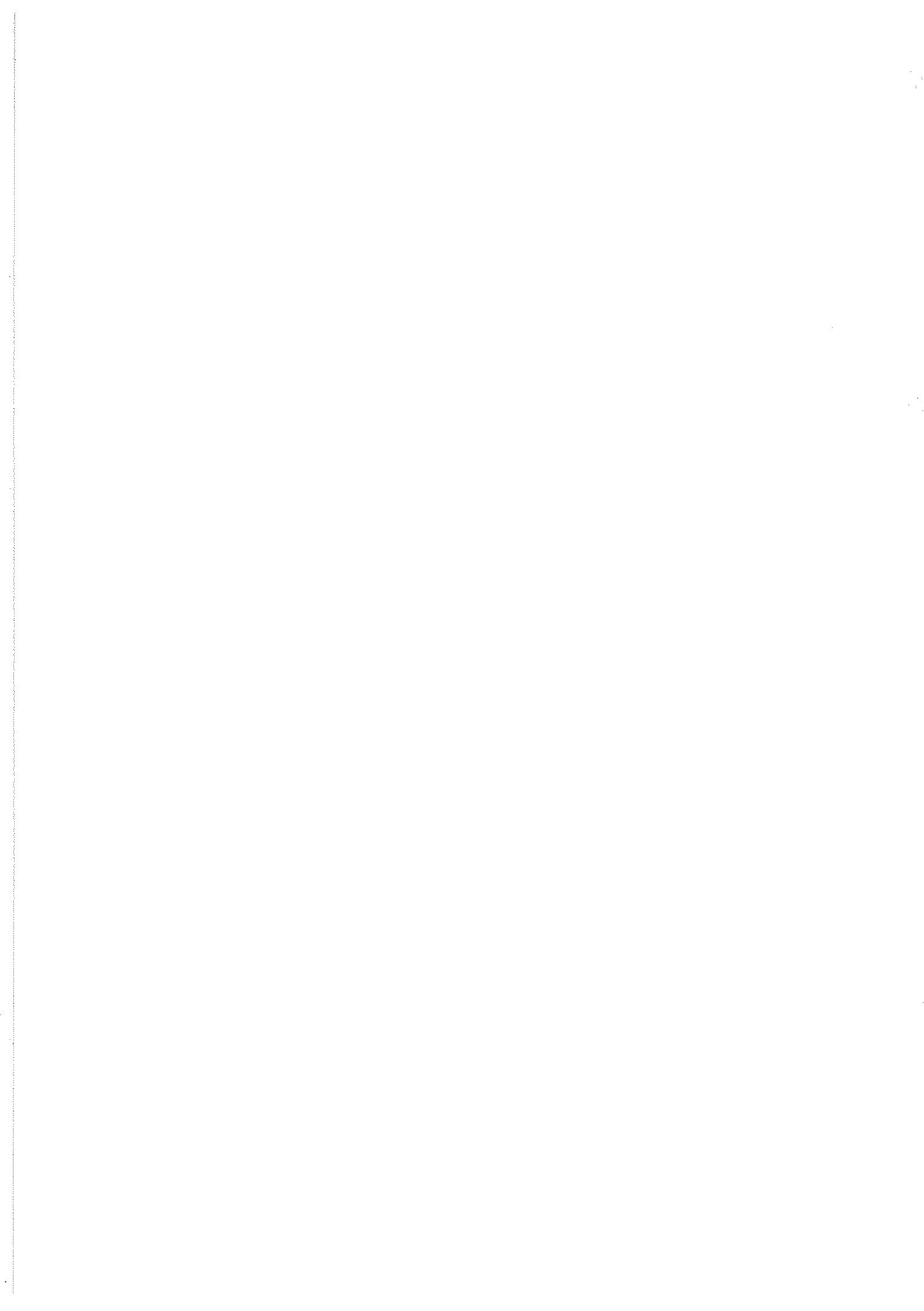
Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{2002}^{(a)}$	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(b)}$	Mesmo nuclídeo
1257 keV (182-Ta)	1238 keV (56-Co)	0,78	0,78	
	3451 keV (56-Co)	0,74	0,75	
	1121 keV (182-Ta)	0,97	0,97	X
	1157 keV (182-Ta)	1,00	1,00	X
	1189 keV (182-Ta)	0,97	0,97	X
	1221 keV (182-Ta)	0,97	0,97	X
	1231 keV (182-Ta)	0,96	0,96	X
	1238 keV (182-Ta)	0,79	0,79	
	3451 keV (182-Ta)	0,75	0,76	
	1121 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
1273 keV (182-Ta)	1157 keV (182-Ta)	0,97	0,97	X
	1189 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1221 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1231 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1257 keV (182-Ta)	0,97	0,97	X
	1175 keV (56-Co)	0,69	0,70	
	1238 keV (56-Co)	0,79	0,80	
	3451 keV (56-Co)	0,75	0,77	
	1121 keV (182-Ta)	1,00	1,00	X
	1157 keV (182-Ta)	0,97	0,97	X
1289 keV (182-Ta)	1189 keV (182-Ta)	1,00	1,00	X
	1221 keV (182-Ta)	1,00	1,00	X
	1231 keV (182-Ta)	0,98	0,98	X
	1257 keV (182-Ta)	0,97	0,97	X
	1273 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1238 keV (182-Ta)	0,79	0,80	
	3451 keV (182-Ta)	0,75	0,76	
	1121 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1157 keV (182-Ta)	0,97	0,97	X
	1189 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
1373 keV (182-Ta)	1221 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1231 keV (182-Ta)	0,98	0,99	X
	1257 keV (182-Ta)	0,97	0,97	X
	1273 keV (182-Ta)	1,00	1,00	X
	1289 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1238 keV (182-Ta)	0,79	0,80	
	3451 keV (182-Ta)	0,75	0,76	
	1121 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1157 keV (182-Ta)	0,97	0,97	X
	1189 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
1387 keV (182-Ta)	1221 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1231 keV (182-Ta)	0,98	0,99	X
	1257 keV (182-Ta)	0,97	0,97	X
	1273 keV (182-Ta)	1,00	1,00	X
	1289 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1238 keV (182-Ta)	0,79	0,80	
	3451 keV (182-Ta)	0,75	0,76	
	1121 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
	1157 keV (182-Ta)	0,96	0,97	X
	1189 keV (182-Ta)	0,99	0,99	X
234 keV (185-Os)	1221 keV (185-Os)	0,99	0,99	X
	1231 keV (185-Os)	0,98	0,99	X
	1257 keV (185-Os)	0,96	0,97	X
	1273 keV (185-Os)	0,99	0,99	X
	1289 keV (185-Os)	0,99	0,99	X
	1373 keV (185-Os)	0,99	0,99	X
	162 keV (185-Os)	0,58	0,58	X
	592 keV (185-Os)	-0,37	-0,36	X
	162 keV (185-Os)	-0,46	-0,45	X
	234 keV (185-Os)	-0,55	-0,54	X
646 keV (185-Os)	162 keV (185-Os)	-0,55	-0,54	X
	592 keV (185-Os)	0,84	0,84	X
	162 keV (185-Os)	0,31	0,31	X
	234 keV (185-Os)	0,35	0,35	X
	874 keV (185-Os)	0,69	0,69	X
	234 keV (185-Os)	0,77	0,76	X
	874 keV (185-Os)	0,47	0,48	X
	162 keV (185-Os)	0,24	0,71	
	307 keV (169-Yb)	0,37	0,41	X
	136 keV (192-Ir)	0,54	0,55	X
295 keV (192-Ir)	136 keV (192-Ir)	0,03	0,44	X
	295 keV (192-Ir)			

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{2002}^{(a)}$	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(b)}$	Mesmo nuclídeo
316 keV (192-Ir)	197 keV (169-Yb)	0,22	0,71	
	261 keV (169-Yb)	0,23	0,71	
	307 keV (169-Yb)	0,29	0,76	
	205 keV (192-Ir)	0,06	0,31	X
	295 keV (192-Ir)	0,13	0,59	X
	308 keV (192-Ir)	0,13	0,52	X
	136 keV (192-Ir)	0,33	0,37	X
	295 keV (192-Ir)	0,25	0,37	X
	136 keV (192-Ir)	-0,58	-0,26	X
	295 keV (192-Ir)	0,18	0,58	X
416 keV (192-Ir)	308 keV (192-Ir)	0,18	0,52	X
	316 keV (192-Ir)	0,14	0,59	X
	316 keV (192-Ir)	0,06	0,32	X
	468 keV (192-Ir)	0,06	0,30	X
588 keV (192-Ir)	295 keV (192-Ir)	0,11	0,35	X
	308 keV (192-Ir)	0,09	0,31	X
	316 keV (192-Ir)	0,09	0,36	X
	416 keV (192-Ir)	0,93	0,93	X
	468 keV (192-Ir)	0,07	0,33	X
	130 keV (169-Yb)	0,21	0,70	
604 keV (192-Ir)	197 keV (169-Yb)	0,22	0,71	
	261 keV (169-Yb)	0,22	0,72	
	307 keV (169-Yb)	0,29	0,76	
	136 keV (192-Ir)	0,64	0,57	X
	205 keV (192-Ir)	0,06	0,31	X
	295 keV (192-Ir)	0,61	0,82	X
	308 keV (192-Ir)	0,81	0,88	X
	316 keV (192-Ir)	0,18	0,65	X
	416 keV (192-Ir)	0,17	0,32	X
	468 keV (192-Ir)	0,25	0,65	X
	484 keV (192-Ir)	0,06	0,32	X
	588 keV (192-Ir)	0,13	0,39	X
	130 keV (169-Yb)	0,26	0,76	
	177 keV (169-Yb)	0,26	0,75	
	197 keV (169-Yb)	0,27	0,77	
612 keV (192-Ir)	261 keV (169-Yb)	0,28	0,77	
	307 keV (169-Yb)	0,35	0,82	
	136 keV (192-Ir)	0,28	0,33	X
	205 keV (192-Ir)	0,07	0,33	X
	295 keV (192-Ir)	0,77	0,89	X
	308 keV (192-Ir)	0,10	0,54	X
	316 keV (192-Ir)	0,73	0,89	X
	416 keV (192-Ir)	0,21	0,35	X
	468 keV (192-Ir)	0,21	0,66	X
	484 keV (192-Ir)	0,07	0,35	X
	588 keV (192-Ir)	0,13	0,40	X
	604 keV (192-Ir)	0,53	0,82	X
884 keV (192-Ir)	295 keV (192-Ir)	0,32	0,57	X
	308 keV (192-Ir)	0,09	0,38	X
	316 keV (192-Ir)	0,12	0,47	X
	416 keV (192-Ir)	0,94	0,91	X
	468 keV (192-Ir)	0,10	0,44	X
	588 keV (192-Ir)	0,98	0,97	X
	604 keV (192-Ir)	0,26	0,55	X
	612 keV (192-Ir)	0,29	0,58	X

Gama 1 (Nuclídeo 1)	Gama 2 (Nuclídeo 2)	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{2002}^{(a)}$	$\rho(\gamma_1, \gamma_2)_{86}^{(b)}$	Mesmo nuclídeo
411 keV (198-Au)	109 keV (169-Yb)	0,38	0,75	
	130 keV (169-Yb)	0,41	0,82	
	177 keV (169-Yb)	0,50	0,85	
	197 keV (169-Yb)	0,46	0,85	
	261 keV (169-Yb)	0,55	0,87	
	307 keV (169-Yb)	0,63	0,91	
	316 keV (192-Ir)	0,28	0,74	
	604 keV (192-Ir)	0,26	0,74	
	612 keV (192-Ir)	0,33	0,80	
675 keV (198-Au)	411 keV (198-Au)	0,08	0,31	X
1087 keV (198-Au)	411 keV (198-Au)	0,20	0,49	X
	675 keV (198-Au)	0,99	0,98	X
158 keV (199-Au)	49 keV (199-Au)	-0,49	-0,33	X
208 keV (199-Au)	49 keV (199-Au)	0,66	0,62	X
	158 keV (199-Au)	0,33	0,54	X
680 keV (203-Pb)	401 keV (203-Pb)	0,94	0,94	X
569 keV (207-Bi)	554 keV (82-Br)	0,78	0,78	
	600 keV (125-Sb)	0,74	0,75	

(a) Correlação entre Gama 1 e Gama 2 quando considerando as constantes fundamentais do CODATA 2002

(b) Correlação entre Gama 1 e Gama 2 quando considerando as constantes fundamentais do CODATA 86



# Apêndice C. Conteúdo do CD-ROM

O CD-ROM anexado a este trabalho contém os seguintes arquivos:

<i>Nome do Arquivo</i>	<i>Descrição</i>
<i>vecorrel.exe<sup>(a)</sup></i>	<i>Programa para selecionar parte da matriz de correlação entre energias gama<sup>(a)</sup></i>
<i>cor2002.txt</i>	<i>Arquivo ascii contendo valores recomendados, incertezas e correlações entre energias gama determinadas neste trabalho utilizando as constantes fundamentais recomendadas de 2002</i>
<i>cor1986.txt</i>	<i>Arquivo ascii contendo valores recomendados, incertezas e correlações entre energias gama determinadas neste trabalho utilizando as constantes fundamentais recomendadas de 1986</i>
<i>Energias.xls</i>	<i>Arquivo no formato MS EXCEL 95 contendo as listagens de valores e incertezas recomendados para as energias dos raios gama padrões para calibração considerando as constantes fundamentais de 2002 e de 1986</i>

(a) Programa desenvolvido por C.O. Guimarães<sup>[114]</sup>.

## C.1 Programa vecorrel.exe<sup>[114]</sup>

O programa vecorrel.exe<sup>[114]</sup> é um arquivo executável em MS DOS para facilitar a seleção de partes da matriz de correlação entre as energias dos padrões de calibração gama.

Ao ser executado, o programa requisita ao usuário o nome do arquivo ascii onde está a matriz de correlações a ser considerada. Então, o arquivo indicado é lido e é apresentado na tela o número de raios gama nele contidos. Em seguida, vão sendo mostrados um a um os raios gama lidos no arquivo e é requisitado ao usuário que indique (com “s” ou “l” para sim; ou qualquer outra tecla para não) se deseja selecionar as informações sobre aquele raio gama. Após o término da seleção dos raios gamas o usuário é questionado se os resultados devem ser fornecidos na tela (com “s” para sim; ou “n” para não seguidos de ENTER) e, em seguida, se os resultados devem ser registrados em um arquivo ascii (com “s” para sim; ou “n” para não seguidos de ENTER). Caso seja selecionado o registro dos resultados em arquivo, o nome do arquivo é solicitado ao usuário.

A estrutura do arquivo de saída do programa vecorrel.exe<sup>[114]</sup> é um arquivo ascii com o mesmo formato dos arquivos de dados cor2002.txt e cor1986.txt, porém contendo apenas as informações sobre as transições selecionadas. Assim, os arquivos de saída gerados pelo programa também podem ser utilizados como arquivo de dados.