



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE FÍSICA

**CRONÔMETROS DE RAIOS CÓSMICOS:  
MEDIDA DO DECAIMENTO  $\beta^+$  DO  $^{102}\text{Rh}^m$**

**Patrícia Perso**

Dissertação de mestrado submetida ao  
Instituto de Física da Universidade de  
São Paulo para obtenção do grau de  
Mestre em Física

*Manoel Tiago Freitas da Cruz*

Comissão examinadora:

Prof. Dr. Manoel Tiago Freitas da Cruz (orientador) – IFUSP – São Paulo

Prof.<sup>a</sup> Dra. Ewa Wanda Cybulska – IFUSP – São Paulo

Prof.<sup>a</sup> Dra. Cibele Bugno Zamboni – IPEN – São Paulo

INSTITUTO DE FÍSICA

Serviço de Biblioteca e Informação

Tombo: 3880 ex.1

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

São Paulo  
2003

P467c

M

ex. 1

### FICHA CATALOGRÁFICA

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

Perso, Patrícia

Cronômetros de Raios Cósmicos: Medida do  
Decaimento  $\beta^+$  do  $^{102}\text{Rh}^{\text{M}}$ . São Paulo, SP.

Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo  
Instituto de Física. Departamento de Física Experimental

Orientador: Prof. Dr. Manoel Tiago Freitas da Cruz  
Área de Concentração: Física Nuclear

Unitermos: 1. Raios Cósmicos;  
2. Rutênio; 3. Meia-vida Parcial;  
4. Espectroscopia em Coincidência.

USP/IF/SBI-046/2003

## **Agradecimentos**

Agradeço em especial ao meu orientador Manoel Tiago Freitas da Cruz pela dedicação e paciência.

A minha mãe, pai, tia Helena, a minha irmã Tulipa, a minha amiga Adriana C. Terra e ao Juan Y. Zevallos.

Aos colegas Frederico A. Genezini, Ruy M. de Castro, Zwinglio Guimarães e Eduardo do Nascimento e aos Professor@s Cibele Bugno Zamboni, Nemitala Added, Marcos Nogueira Martins e a secretária Edneia A. Resende.

A todos que ajudaram de alguma forma na produção desta dissertação.

## Resumo

Foi estudada experimentalmente a possibilidade de o  $^{102}\text{Rh}^m$  ( $t_{1/2} = 2,9$  anos) ser utilizado como um cronômetro ou traçador de raios cósmicos. Tratando-se um núcleo que decai essencialmente via captura de elétrons e transição isomérica, sua meia vida parcial  $\beta^+$  foi estudada em laboratório através de três experimentos distintos de espectroscopia coincidente, com duas fontes radioativas, uma antiga de 1,6 kBq usada no segundo experimento e uma preparada e usada no primeiro, com 138 kBq, e no terceiro experimento com 136 kBq. Assim um limite mínimo foi determinado:

O limite superior da intensidade  $\beta^+$  e da transição isomérica via fóton determinado foi de  $9,3 \times 10^{-6}$  por decaimento, produzindo um limite inferior para a meia vida de  $3,14 \times 10^5$  anos, com um nível de confiança 95,5 %

Com este limite pode-se afirmar que a abundância isotópica do  $^{102}\text{Rh}$  é um parâmetro importante para o estudo da componente nuclear dos raios cósmicos na região de massa  $\sim 100$ .

## Abstract

It was studied experimentally the possibility that the  $^{102}\text{Rh}^m$  ( $t_{1/2} = 2.9$  years) be used as a chronometer or tracer of cosmic rays. Being a nucleus that decays essentially via electron capture and isomeric transition, its partial half life  $\beta^+$  was studied in the laboratory through three different experiments of coincidence spectroscopy, with two radioactive sources, an old one of 1.6 kBq used in the second experiment and a new one used in the first and in the third experiment with 138 kBq. Thus a limit was determined:

The upper limit of  $\beta^+$  and isomeric transition decays via photon is  $9.3 \times 10^{-6}$  per decay, producing a lower limit for the half life of  $3.14 \times 10^5$  years, with a confidence level of 95.5 %

With this limit can it is possible affirm that the isotopic abundance of the  $^{102}\text{Rh}$  is na important parameter for the study of the nuclear component of the cosmic rays in the mass region  $\sim 100$ .

# Índice

<b>Capítulo I</b>	1- Introdução_____	1
<b>Capítulo II</b>	2- Aspectos experimentais_____	5
	2.1- Fonte Velha e Produção da Fonte Nova_____	5
	2.2- Espectroscopia simples para a determinação das atividades das Fontes Velha e Nova de $^{102}\text{Rh}$ _____	8
	2.3- Arranjo experimental utilizado nas medidas de coincidência_____	16
	2.4- Medidas efetuadas em coincidência_____	21
	2.5- Possível interferência na medida_____	24
<b>Capítulo III</b>	3- Análise dos dados_____	27
	3.1- Primeiro grupo de medidas – tratamento da eficiência_____	27
	3.2- Primeiro grupo de medidas – redução de dados_____	38
	3.3- Segundo grupo de medidas – tratamento da eficiência_____	51
	3.4- Segundo grupo de medidas – redução de dados_____	58
	3.5- Terceiro grupo de medidas – tratamento da eficiência_____	67
	3.6- Terceiro grupo de medidas – redução de dados_____	70
<b>Capítulo IV</b>	4- Estimativa da transição isomérica_____	80
<b>Capítulo V</b>	5- Resultados e Discussões_____	82
<b>Capítulo VI</b>	6- Conclusão_____	84
<b>Apêndices</b>	A	
	Passeio: deslocamento da centróide do fotopico_____	85

B	Projeções dos espectros bidimensionais_____	86
C	Determinação da intensidade do decaimento $\beta^+$ dentro de uma faixa com 95,5% de chance_____	91
D	Cálculo do volume do fotopico com calha na diagonal _____	93
E	Determinação da meia-vida parcial do $^{102}\text{Rh}^m$ apenas por decaimento $\beta^+$ ou transição isomérica via fóton_____	97
	<b>Referências</b> _____	98

## 1-Introdução

Para um isótopo radioativo ser considerado um cronômetro ou traçador de raios cósmicos a sua meia vida ( $t_{1/2}$ ) tem que ser superior a  $10^5$  anos. Os isótopos radioativos que decaem essencialmente por captura de elétrons ( $\epsilon$ ) mas com energia disponível suficientemente grande podem sofrer também decaimento  $\beta^+$ . Dependendo da intensidade do decaimento  $\beta^+$  e da meia vida em laboratório, este isótopo pode tornar-se um traçador de raios cósmicos. Esse efeito se dá quando o núcleo em questão é sintetizado e acelerado em um evento violento como a expulsão de material por uma supernova, de forma que o núcleo é produzido sem a sua coroa eletrônica, impedindo assim decaimentos que dependam da presença dos elétrons. Assim, sua meia vida parcial para decaimentos alternativos, se houverem, será a única meia vida do isótopo, normalmente muito maior do que a meia vida em laboratório. Ao se reunir dados de abundâncias isotópicas de raios cósmicos, medidos em experimentos com balões na alta atmosfera ou em satélites artificiais, as abundâncias desses isótopos quando comparadas às de seus vizinhos podem revelar aspectos importante da propagação da componente nuclear dos raios cósmicos. Uma informação importante é, por exemplo, o tempo de propagação destes no volume galáctico.

No laboratório, os isótopos de  $^{102}\text{Rh}$  encontram-se em um dos seguintes estados:

- Fundamental,  $^{102}\text{Rh}^f$  de meia vida 207 dias, que decai para  $^{102}\text{Ru}$  via captura de elétrons ( $\epsilon$ ) +  $\beta^+$  (80%) ou para o  $^{102}\text{Pd}$  via  $\beta^-$  (20%). Os esquemas de desintegração correspondentes são mostrados nas figuras 1a e 1b.

- Metaestável  $^{102}\text{Rh}^m$ , de meia vida 2,9 anos, decaindo para o  $^{102}\text{Ru}$  por  $\epsilon$  (99,8%) ou para  $^{102}\text{Rh}^f$  por transição isomérica 0,27(3)% [1], cujos esquemas de desintegração são mostrados nas figuras 2 e 3, respectivamente. Não se observa o decaimento  $\beta^-$  do isômero metaestável devido à sua elevada proibição.

Os dois decaimentos de interesse dependem da presença da coroa eletrônica e são mostrados nas figuras 2 e 3. Sem a coroa de elétrons a intensidade desses decaimentos é alterada, elevando a meia vida do  $^{102}\text{Rh}^m$ .

O decaimento do estado isomérico (de spin e paridade  $6^+$ ) para o fundamental (de spin e paridade  $1^-, 2^-$ ) do  $^{102}\text{Rh}$  é caracterizado pela emissão dos fótons de 42 e 99 ou 141 keV em competição com a conversão eletrônica, mais intensa. Em uma medida de espectroscopia simples não foi possível visualizar os fotopicos associados a essas transições (figura 4) pois o fundo nesta faixa de energia era muito elevado. Assim, o cálculo da intensidade do decaimento do metaestável para o fundamental sem a participação da coroa eletrônica foi feito utilizando-se dados de intensidade de decaimento na literatura [1] e coeficientes de conversão eletrônica teóricos [2].

O decaimento do  $^{102}\text{Rh}^m$  tem vários estados finais possíveis no  $^{102}\text{Ru}$ , porém aquele com maior probabilidade de apresentar decaimento  $\beta^+$ , ocorre através da transição segunda proibida não única para o estado de 1106 keV, com spin e paridade  $4^+$ , figura 2. Para o estudo desse decaimento foi feito um experimento de detecção gama em coincidência. Os raios gama que pretendemos detectar em coincidência temporal são: um par 511 – 511 keV proveniente da aniquilação do (possível)  $\beta^+$  seguido do raio gama 631 keV, que desexcita o estado de 1106 keV do Ru.

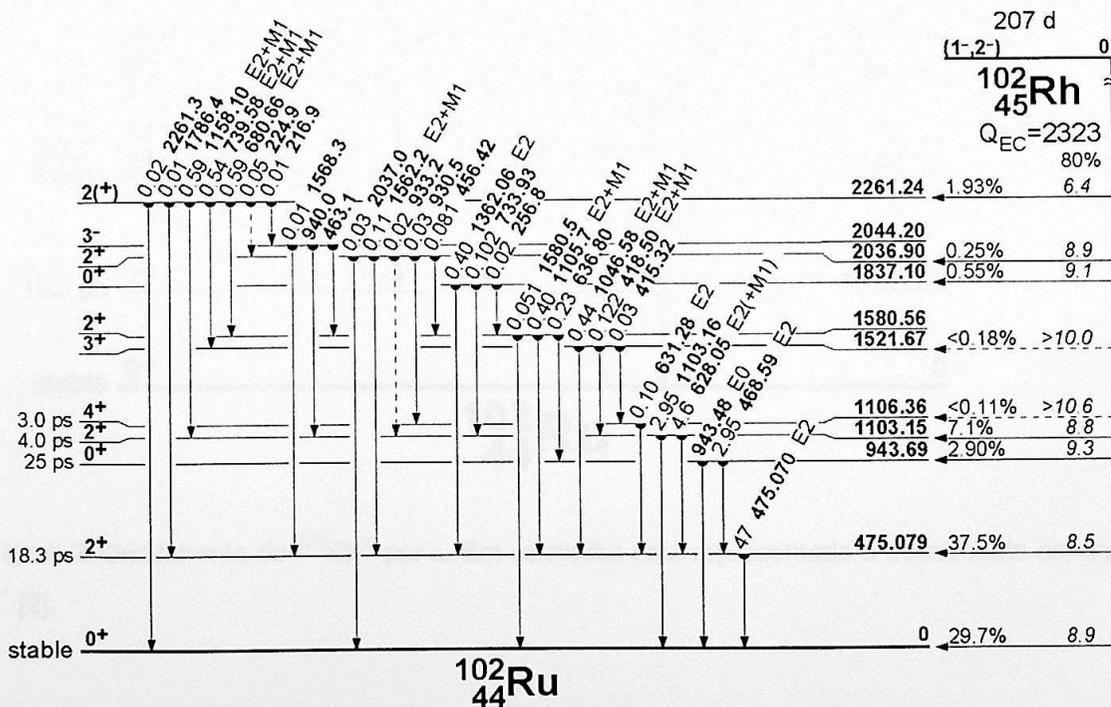


Figura 1a: Decaimento do  $^{102}\text{Rh}^f$  por  $\epsilon$  ou  $\beta^+$ , níveis de energia do  $^{102}\text{Ru}$  [2].

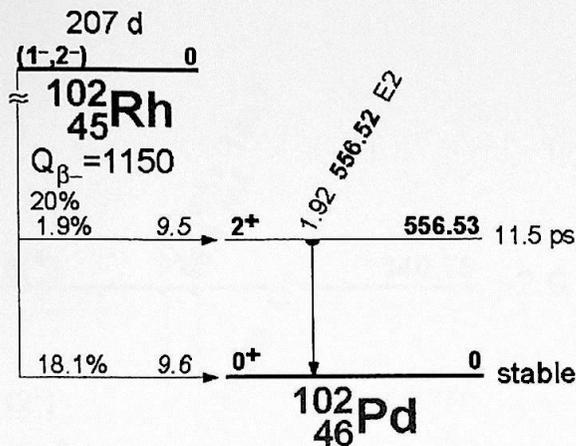


Figura 1b: Decaimento do  $^{102}\text{Rh}^f$  por  $\beta^-$ , níveis de energia do  $^{102}\text{Pd}$  [2].

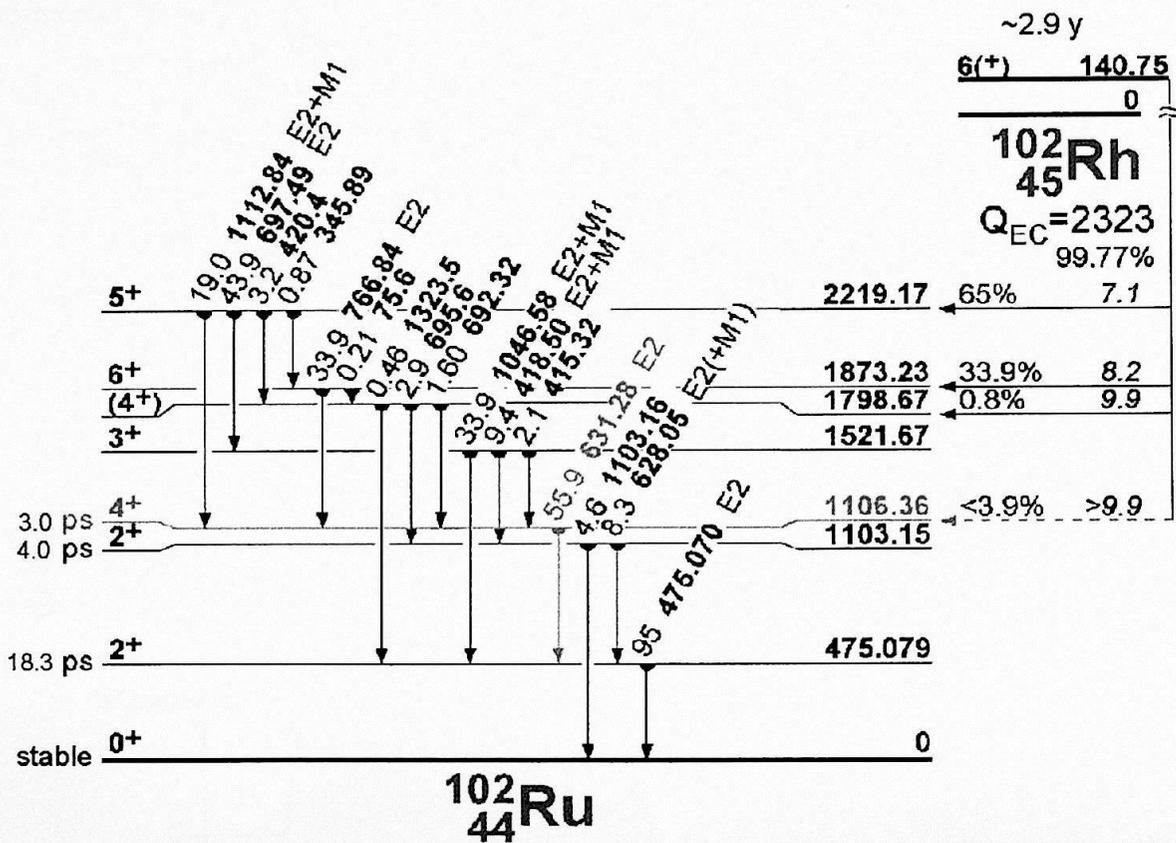


Figura 2: Decaimento do  $^{102}\text{Rh}^m$  por  $\epsilon$ . Em vermelho está representado o decaimento esperado por  $\beta^+$  [2].

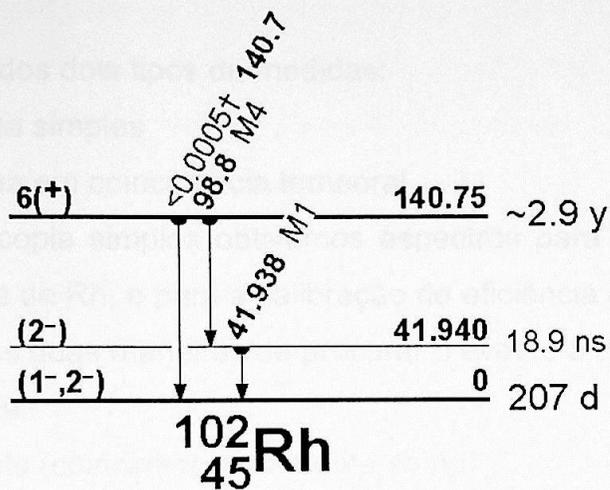


Figura 3 - Transição isomérica; decaimento do  $^{102}\text{Rh}^m$  por conversão eletrônica ou fótons para o fundamental  $^{102}\text{Rh}^f$  [2]

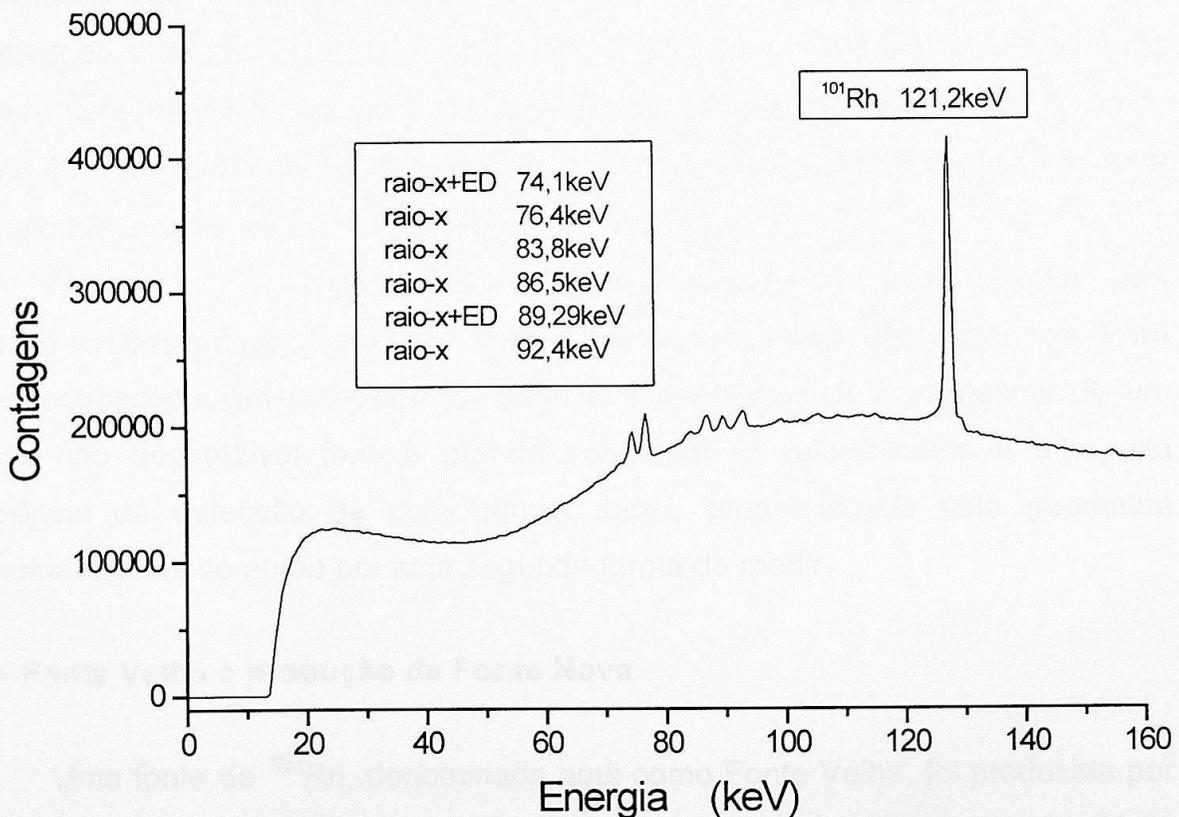


Figura 4: Região inicial do espectro isomero.esp (Fonte Nova): não foi possível observar os fotopicos da transição isomérica na espectroscopia simples (ED = escape duplo).

## 2- Aspectos experimentais

Foram realizados dois tipos de medidas:

- espectroscopia gama simples
- espectroscopia gama em coincidência temporal

Na espectroscopia simples obtivemos espectros para a determinação das atividades das fontes de Rh, e para a calibração de eficiência dos detetores.

Há pelo menos duas maneiras de procurar o evento 511 – 511 – 631 keV:

- Coincidência tripla.
- Coincidência dupla (coincidência com uma soma).

Na espectroscopia em coincidência temporal tripla o evento será considerado verdadeiro se, em um intervalo de tempo pré determinado, respectivamente, três detetores individualmente detectarem os raios gama provenientes da aniquilação do  $\beta^+$  mais o terceiro gama (631 keV) da desexcitação do nível de 1106 keV do Ru. Na coincidência dupla dois detetores individualmente devem detectar os três raios gama, mas agora um detetector detecta um dos raios gama 511 keV proveniente da aniquilação do  $\beta^+$  e o segundo detector detecta a soma do outro gama de 511 keV mais o 631 keV.

A vantagem da espectroscopia em coincidência tripla é que o fundo será mínimo e a desvantagem é o fato de que a eficiência da detecção é reduzida. Para a espectroscopia em coincidência dupla a desvantagem é a existência de um fundo não desprezível mas a grande vantagem de sua escolha é uma alta eficiência de detecção da coincidência dupla, proporcionada pela geometria próxima. Optou-se então por esta segunda forma de medir.

### 2.1- Fonte Velha e produção da Fonte Nova

Uma fonte de  $^{102}\text{Rh}$ , denominada aqui como Fonte Velha, foi produzida por Vito R. Vanin e Angelo Passaro em 1982 irradiando-se uma amostra de Ródio natural. Essa fonte foi produzida no antigo acelerador linear do IFUSP, pela reação  $^{103}\text{Rh}(\gamma, n)^{102}\text{Rh}$  [1].

Para a produção da fonte denominada Fonte Nova, foi utilizada a reação  $^{102}\text{Ru}(p,n)^{102}\text{Rh}$  com um alvo de  $^{102}\text{Ru}$  enriquecido a 99,38%. O alvo foi irradiado no acelerador PELLETRON do IFUSP por um feixe de prótons com uma corrente de aproximadamente  $0,9(1) \mu\text{A}$  por um período de aproximadamente 10 horas.

Foi confeccionado um porta alvos de Al para servir de suporte, proteção contra vazamento do pó de Ru e também para degradar a energia do feixe de prótons para atingir o alvo com 13 MeV.

Através do programa Stopx calculamos a espessura da janela de alumínio para que a energia dos prótons diminuísse de 16,0 para 13 MeV e a espessura do Ru para que o feixe de prótons ao atravessá-lo diminuísse de 13 MeV para 10 MeV. O resultado encontra-se na tabela 1. Isto foi feito com o intuito de maximizar a produção pois nesta faixa de energia a seção de choque para a reação  $^{102}\text{Ru}(p,n)^{102}\text{Rh}^{m,f}$  é máxima.

Tabela 1: Espessura necessária da amostra de Ru e da janela de Al, maximizando a produção da fonte de Rh.

Elemento	Espessura $\Delta t$
Ru	0,12mm
Al	1,67mm

A abundância isotópica do material do alvo encontra-se na tabela 2a. A necessidade do uso de isótopo enriquecido se deu porque o Ru natural contém vários isótopos com abundâncias elevadas (tabela 2b) que sofreriam outras reações, além daquela no isótopo em estudo, produzindo diversos núcleos radioativos em reações concorrentes.

Tabela 2a: Abundâncias isotópicas do rutênio enriquecido.

Número de massa do Ru	Abundância isotópica %
96	0,05
98	0,05
99	0,07
100	0,11
101	0,21
102	99,38
104	0,21

Tabela 2b: Abundâncias isotópicas do rutênio natural, a seção de choque ( $\sigma$ ) em barn para a reação  $^{*}\text{Ru}(p,n)^{*}\text{Rh}$  e a meia vida ( $T_{1/2}$ ) dos radioisótopos produzidos [2, 3].

Número de massa do Ru	Abundância isotópica %	$\sigma$ (médio) (b)	Núcleos Produzidos	$T_{1/2}$
96	5,54		$^{96}\text{Rh}$	9,6 s
98	1,86		$^{98}\text{Rh}$	8,7 s
99	12,7	0,9(1)	$^{99}\text{Rh}$	16,1 d
100	12,6	0,5(1)	$^{100}\text{Rh}$	20,8 h
101	17,1	0,9(1)	$^{101}\text{Rh}$	3,3 a
101	17,1	0,9(1)	$^{101\text{m}}\text{Rh}$	4,34 d
102	31,6	0,9(1)	$^{102\text{m}}\text{Rh}$	2,9 a
102	31,6	0,9(1)	$^{102\text{f}}\text{Rh}$	207 d
104	18,6		$^{104}\text{Rh}$	42,3 s

Os radioisótopos  $^{96}\text{Rh}$ ,  $^{98}\text{Rh}$  e  $^{104}\text{Rh}$ , por possuírem as meias vidas muito curtas não causariam problemas, mas os radioisótopos restantes tornariam a fonte muito ativa por um longo período de tempo, e por isso foi dada a preferência ao isótopo enriquecido na produção da Fonte Nova.

Foram pesados 30,130(25) mg do material, que foram colocados no porta alvo. O porta alvo foi lacrado, produzindo assim uma pastilha de Ru com raio de 2,50 mm.

## 2.2- Espectroscopia simples para a determinação das atividades das Fontes Velha e Nova de $^{102}\text{Rh}$

Foram realizadas aquisições de espectroscopia simples para cada fonte de Rh e posterior a cada aquisição, mantendo a mesma geometria e sistema do experimento, foi feita espectroscopia simples com fontes ( $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) de atividades calibradas para determinar a curva da eficiência do detetor em função da energia do gama para aquele respectivo arranjo experimental.

A eficiência absoluta do detetor no fotopico representa a razão entre os raios gama detectados e aqueles emitidos pela fonte durante o intervalo de tempo de medida. Esta razão depende de fatores, internos e externos ao detetor; um exemplo de fator interno seria o tamanho do cristal do detetor, fatores externos seriam a atividade da fonte, geometria do arranjo, a eletrônica de detecção e a energia do raio gama.

Foi utilizada a equação 2.1 abaixo para o ajuste da eficiência absoluta em função da energia do raio gama.

$$\varepsilon = p(1) \times e^{(p(2) \times E)} + p(3) \times e^{(p(4) \times E)} \quad (2.1)$$

Onde  $\varepsilon$  é a eficiência absoluta do detetor para raios gama de energia  $E$ , sendo os parâmetros,  $p(1)$ ,  $p(2)$ ,  $p(3)$  e  $p(4)$ , determinados através do ajuste da função sobre os dados experimentais (e.g. figura 5).

### a) Fonte Velha:

Foi realizada uma medida de espectroscopia simples com a Fonte Velha de Rh com detetor de germânio de  $288,3 \text{ cm}^3$  de fabricação da ORTEC, no IPEN. Foram obtidos oitenta espectros da fonte com tempo vivo de uma hora cada e depois outros 80 espectros de fundo. A aquisição foi feita pelo programa Maestro da ORTEC associado a uma placa contendo ADC e multicanal no PC.

Os espectros de Rh foram somados, após verificação se houve o passeio dos fotopicos [apêndice A], e batizados de rh80.esp através do programa Soma [4]. Os espectros de fundo também foram somados e batizados de fundo80.esp.

Após o término da aquisição da Fonte Velha foram utilizadas duas fontes calibradas para a determinação da eficiência:  $^{152}\text{Eu}$  e  $^{137}\text{Cs}$ . A aquisição de cada fonte de calibração foi realizada na mesma geometria do experimento.

Tabela 3a: Espectros obtidos na aquisição.

Espectros	Fonte Velha	Fundo
Espectros de 1 hora cada	rhv001.chn até rhv080.chn	Fundo001.chn até fundo080.chn
Espectros somados	Rh80.esp	Fundo80.esp

Tabela 3b: Os espectros, totais e o tempo vivo total.

Espectro	Fonte	Tempo vivo (h)
Rh80.esp	$^{102}\text{Rh}$ – Fonte Velha	80
Fun80.esp	Fundo	80

Os cálculos das atividades do  $^{152}\text{Eu}$  e  $^{137}\text{Cs}$  nos momentos das medidas foram efetuados com os dados da tabela 3c e da equação 2.2 e assim foi determinada a eficiência de detecção para cada gama, como mostrado na tabela 4.

Tabela 3c: Dados necessários para a determinação das atividades das fontes (calibradas) no dia de sua aquisição.

Fonte	Meia vida $T_{1/2}$	Atividade inicial	Tempo de espera $\Delta t$
$^{152}\text{Eu}$	13,542 anos	21,3(5) kBq	1692(1) dias
$^{137}\text{Cs}$	30,07 anos	10,65(20) $\mu\text{Ci}$	7047(1) dias

$$A = A_0 \times e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \times \Delta t} \quad (2.2)$$

$A_0$   $\Rightarrow$  Atividade inicial da fonte

$A$   $\Rightarrow$  Atividade da fonte após um tempo de espera  $\Delta t$

$T_{1/2}$   $\Rightarrow$  Meia vida

Tabela 4: Espectros obtidos para ajustar a curva de eficiência: atividades das fontes no momento da aquisição mais o tempo vivo de ambos.

Fonte	Espectro	Atividade (kBq)	Tempo vivo (s)
$^{152}\text{Eu}$	Crheu.chn	16,8(4)	3600
$^{137}\text{Cs}$	Crhcs.chn	252(5)	3600

As análises dos espectros foram feitas através do programa IDF\_win [5], calculando as áreas dos fotopicos; através da literatura [6] foram obtidas as intensidades dos respectivos raios gama e assim determinou-se a eficiência de detecção para este grupo de raios gama de acordo com a expressão 2.3, tabela 5.

$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{a_{\gamma}}{\Delta t \times I_{\gamma} \times A} \quad (2.3)$$

$A$   $\Rightarrow$  Atividade da fonte no momento da aquisição

$\varepsilon_{\gamma}$   $\Rightarrow$  eficiência de detecção para um determinado raio gama da fonte

$a_{\gamma}$   $\Rightarrow$  área do fotopico

$\Delta t$   $\Rightarrow$  tempo vivo

$I_{\gamma}$   $\Rightarrow$  Intensidade do raio gama [6]

Tabela 5: Eficiências absolutas para o experimento com a fonte velha. Os valores das intensidades dos raios gama de  $^{152}\text{Eu}$  e  $^{137}\text{Cs}$  foram obtidos da referência [6].

Área do fotopico	Energia (keV)	Intensidade do gama	Eficiência
124328(568)	121,8	0,2837(13)	0,00725(5)
25541(304)	244,7	0,0753(4)	0,00561(7)
72556(390)	344,3	0,2657(11)	0,00453(3)
6881(236)	411,13	0,02238(10)	0,004744(18)
8472(238)	443,96	0,03125(14)	0,00448(13)
22140(254)	778,9	0,1297(6)	0,00282(3)
7461(151)	867,39	0,04214(25)	0,00293(6)
27920(197)	964,05	0,1463(6)	0,003031(25)
15826(184)	1085,84	0,1013(5)	0,00258(3)
2471(104)	1089,77	0,01731(9)	0,00236(10)
21569(183)	1112,09	0,1354(6)	0,002634(22)
2164(104)	1299,15	0,01626(11)	0,00220(11)
28267(190)	1408,02	0,2085(9)	0,002241(15)
2971626(3182)	661,66 ( $^{137}\text{Cs}$ )	0,851(2)	0,003650(10)

Com os valores das eficiências para a detecção de seus respectivos raios gama foi ajustada uma curva de eficiência (Figura 5), pelo método dos mínimos quadrados, obedecendo a equação 2.1; com os parâmetros obtidos determinou-se as eficiências de detecção dos raios gama de desexcitação do Ru (decaimento  $\epsilon$  do  $^{102}\text{Rh}^m$ ) e foi calculada a atividade da Fonte Velha.

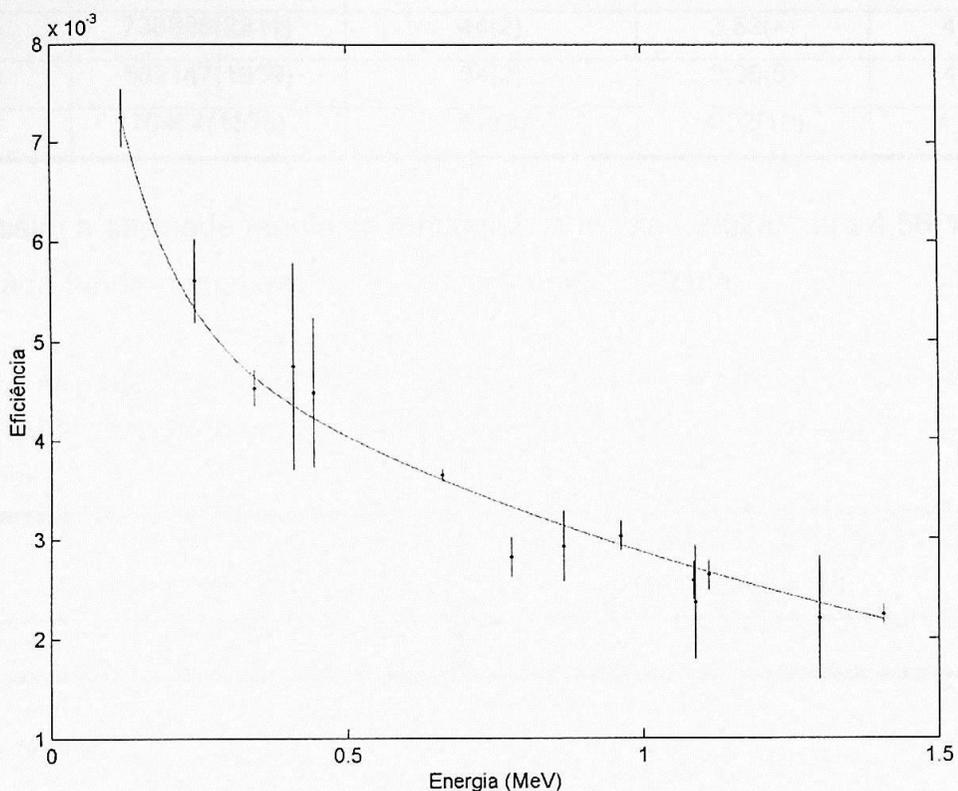


Figura 5: Curva de ajuste da eficiência para a medida com a fonte velha.

Os parâmetros da curva ajustada encontram-se na tabela 6.

Tabela 6: parâmetros ajustados da equação 2.1 para a curva da figura 5.

Parâmetros	Valor ajustado
$p(1)$	$5,6(3) \times 10^{-3}$
$p(2)$	$-6,7(6) \times 10^{-1}$
$p(3)$	$8(4) \times 10^{-3}$
$p(4)$	$-1,1(5) \times 10^{+1}$

As áreas dos fotopicos do espectro rh80.esp foram calculadas no programa IDF\_win sendo o fundo ajustado com o espectro fundo80.esp.

Tabela 7a: Análise do espectro rh80.chn para a determinação da atividade  $^{102}\text{Rh}^m$  da fonte Velha.

Energia (keV)	área do fotopico	Intensidade (x $0,9977 \times 10^{-2}$ )	Eficiência(x $10^{-3}$ )	Atividade (x $10^{-8}$ ) Ci
1112,8	254841(1331)	19(1)	2,66(10)	4,73(18)
697,5	736886(2811)	44(2)	3,52(4)	4,46(6)
766,8	562147(1639)	34(2)	3,36(5)	4,62(7)
420,4	70464(1520)	3,2(3)	4,32(10)	4,79(15)

Assim a atividade média do metaestável no dia 22/02/01 era  $4,56(15) \times 10^{-8}$  Ci; o estado fundamental encontra-se em equilíbrio secular.

Tabela 7b: Atividades da Fonte Velha; na primeira coluna encontra-se o valor da atividade calculada em 22/02/01 e na segunda coluna o valor da atividade da fonte quando foi realizado o experimento.

Atividade do metaestável na espectroscopia simples (Bq)	Atividade do metaestável na aquisição em coincidência (Bq)
1686(56)	1627(56)

## b) Fonte Nova

A aquisição em espectroscopia simples da Fonte Nova foi feita pelo programa Maestro da ORTEC associado ao multicanal no PC, com o mesmo detetor de Germânio usado na aquisição da Fonte Velha

Para a determinação da atividade da Fonte Nova foi necessário determinar a nova eficiência do detetor, num procedimento similar àquele (equações 2.1 e 2.2) para a determinação da atividade da Fonte Velha.

Tabela 8: Os espectros, somados e renomeados, e o tempo vivo.

Espectro	Fonte	Tempo vivo (h)
rh.chn	$^{102}\text{Rh}$ – Fonte Nova	10
Fun.chn	Fundo	10

Sem modificar a geometria de medida com a Fonte Nova, novamente por espectroscopia simples, foram obtidos os espectros de calibração. O tempo vivo para cada espectro foi de 3600 s (tabela 9).

Os espectros foram analisados no programa IDF\_win [5]. Este programa ajusta o fundo com o espectro fun.chn para o cálculo das áreas dos fotopicos; através da equação 2.2 determinou-se as atividades das fontes calibradas no momento da aquisição (tabela 10).

Tabela 9: Dados necessários para a determinação das atividades das fontes de calibração [6] no dia de sua aquisição.

Fonte	Meia vida $T_{1/2}$	Atividade inicial (kBq)	Tempo de espera $\Delta t$ (dias)
$^{152}\text{Eu}$	13,542 anos	404(1)	7510(1)
$^{137}\text{Cs}$	30,07 anos	406,5(10)	7510(1)
$^{60}\text{Co}$	5,2714 anos	379,2(10)	7510(1)

Tabela 10: Fontes calibradas para a determinação da eficiência da detecção dos raios gama; atividade de cada fonte no dia da aquisição.

Espectro	Fonte	Atividade (kBq)
neu.chn	$^{152}\text{Eu}$	140,9(3)
ncs.chn	$^{137}\text{Cs}$	253,0(6)
nco.chn	$^{60}\text{Co}$	25,35(7)

Analisados os espectros de calibração foi determinada a eficiência do detetor para este arranjo.

Tabela 11: Eficiência absoluta de detecção nas energias dos raios gama das fontes de calibração.

Area do fotopico	Energia (keV)	Intensidade do gama	Eficiência
162585(535)	244,7	0,0753(4)	0,004256(15)
477282(768)	344,3	0,2657(11)	0,003541(8)
36280(435)	411,13	0,02238(10)	0,00319(4)
48455(293)	443,96	0,03125(14)	0,003056(19)
146858(462)	778,9	0,1297(6)	0,002232(8)
46436(384)	867,39	0,04214(25)	0,002172(18)
149227(566)	964,05	0,1463(6)	0,002010(8)
97017(459)	1085,84	0,1013(5)	0,001888(9)
16480(198)	1089,77	0,01731(9)	0,001877(22)
129976(551)	1112,09	0,1354(6)	0,001892(8)
12411(219)	1212,97	0,01412(8)	0,00173(3)
15238(443)	1299,15	0,01626(11)	0,00185(5)
169431(556)	1408,02	0,2085(9)	0,001602(6)
1953594(1835)	661,66 ( $^{137}\text{Cs}$ )	0,851(2)	0,002521(10)
161491(564)	1173,24 ( $^{60}\text{Co}$ )	0,99857(22)	0,00177(7)
150050(533)	1332,5 ( $^{60}\text{Co}$ )	0,99983(6)	0,00164(7)

Repetindo o procedimento anterior (cálculo da atividade da Fonte Velha) para ajustar uma curva que obedeça a equação 2.1, utilizou-se o programa Ajuste [13] e se obteve os parâmetros da função (tabela 12) calculando-se em seguida as eficiências para detecção dos raios gama de interesse da desexcitação do  $^{102}\text{Rh}^{m,f}$  e finalmente a atividade da fonte (tabelas 13 e 14).

Tabela 12: Parâmetros (equação 2.1) ajustados.

Parâmetros	Valor ajustado
$p(1)$	$3,17(13) \times 10^{-3}$
$p(2)$	$-4,8(3) \times 10^{-1}$
$p(3)$	$5,0(5) \times 10^{-3}$
$p(4)$	$-5,1(5)$

Tabela13: Análise do espectro rh.chn para a determinação da atividade da Fonte Nova do  $^{102}\text{Rh}^m$ ; o fundo foi ajustado sobre o espectro fun.chn.

Energia (keV)	área do fotopico	Intensidade ( $\times 0,9977 \times 10^{-2}$ )	Eficiência ( $\times 10^{-3}$ )	Atividade (kBq)
420,0	485399(2441)	3,2(3)	3,170(18)	133,2(10)
697,5	4947627(2851)	44(2)	2,402(12)	130,3(7)
766,8	3707041(2171)	34(2)	2,284(11)	132,9(7)
1112,8	1542722(1579)	19(0,1)	1,864(9)	121,3(6)
1323,0	33999(522)	0,46(8)	1,674(11)	122,9(20)

Tabela 14: Análise do espectro rh.chn para a determinação da atividade da Fonte Nova do  $^{102}\text{Rh}^f$ ; o fundo foi ajustado sobre o espectro fun.chn

Energia (keV)	Área do fotopico	Intensidade ( $\times 0,97 \times 10^{-2}$ )	Eficiência ( $\times 10^{-3}$ )	Atividade (kBq)
636	398604(1186)	0,23(3)	2,520(13)	1969(11)
733	154828(1003)	0,10(2)	2,337(12)	1897(15)
739	846290(1606)	0,53(8)	2,329(12)	1963(10)
930	40147(1837)	0,03(2)	2,062(10)	$186(8) \times 10^1$
1105	442580(2142)	0,39(3)	1,8742(9)	1734(11)
1362	394605(992)	0,39(5)	1,642(12)	1765(13)

As atividades médias e seus desvios foram calculados de acordo com as expressões:

$$A_{med} = \sum_{n=1}^N j_n A_n \quad \sigma_{Amed} = \left( \frac{1}{\sum_{n=1}^N j_n} \right)^{0,5} \quad j_n = \frac{1}{\sigma_n^2}$$

Assim as atividades do metaestável para a Fonte Nova no período das medidas do primeiro e terceiro grupos (veja a seguir) são:

Tabela 15: Atividades médias da Fonte Nova em diferentes etapas do experimento, em kBq.

Atividade do metaestável na espectroscopia simples	Atividade do metaestável para o primeiro grupo de medida	Atividade do metaestável para o Terceiro grupo de medida
127,9(3)	138,1 (5)	135,8(4)

### 2.3- Arranjo experimental utilizado nas medidas de coincidência

O sistema utilizado para a detecção do decaimento procurado foi o Multi-Detector [7] do Laboratório do Acelerador Linear, onde foram utilizados 2 detectores de Ge em três arranjos geométricos distintos, apresentados nas Figuras, 6a, 6b e 6c e identificados como Grupo de Medidas. Para o 1º e o 3º arranjos foi usada a fonte mais ativa (Fonte Nova) e para o 2º arranjo a fonte menos intensa (Fonte Velha). Em todos os grupos de medidas com o Multi-Detector procurou-se detectar uma coincidência temporal dupla, com uma soma,  $511 - (511 + 631)$  keV, que assinalaria o evento procurado.

Os detectores usados nos arranjos foram o Eurisys modelo EGC 45-200-TR e o Phenix GEM 33190-P, respectivamente com volumes de  $196\text{cm}^3$  e  $153\text{cm}^3$  dos cristais de Germânio hiperpuro.

A eletrônica de detecção está representada na Figura 7, onde o módulo Multi-Detector padrão CAMAC construído no LAL permitiu uma simplificação importante da eletrônica, no que concerne à verificação da consistência lógica dos eventos. A cada "disparo" de qualquer detector, esse módulo abre uma janela de tempo de 200 ns, à espera de um segundo "disparo". Caso isso aconteça, fica caracterizada uma coincidência, que será registrada em um computador pessoal padrão IBM, na forma de pares energia-tempo para cada detector envolvido no evento. Esses eventos são registrados em um arquivo, em modo "fila", com uma máscara inicial (que serve como separador de eventos), contendo o número de detectores envolvidos e quais são eles.

No arranjo da eletrônica mostrada na Figura 7 vemos dois sinais, saindo de cada detector. Estes são feitos passar por uma linha rápida, apropriada para a determinação do tempo, e outra lenta, para a determinação da energia depositada no detector correspondente.

Qualquer das linhas rápidas do sistema é composta de um amplificador-filtro rápido (FF), que preserva o tempo de subida do sinal do pré-amplificador, de onde se obtém a marcação do tempo de ocorrência do evento, após a sua passagem por um discriminador rápido, que opera em modo de discriminação de

fração constante (CFD) com compensação em amplitude e tempo de subida (ARC). A saída do discriminador tem a forma de um pulso lógico rápido, que é inserido no módulo Multi-Detector já descrito. Uma cópia desse sinal é introduzida como a parada em um contador de tempo digital (TDC) cuja partida foi dada pelo pulso rápido proveniente do primeiro detector que disparou (start, fornecido pelo Multidetector).

As linhas lentas são compostas por amplificadores apropriados para espectroscopia, onde o problema principal é a determinação da energia depositada no detector. A saída do amplificador lento é introduzida num conversor analógico digital padrão CAMAC, também controlado pelo módulo Multi-Detector.

O ADC Camac interage com o multidetector recebendo um sinal de STROBE junto com os sinais lineares e enviando um sinal de DATA READY, após a conversão.

A transferência dos dados de tempo e energia para o PC está indicada na Figura 7.

Uma coincidência válida era então caracterizada pela presença dos dois sinais rápidos dos CFDs, dos sinais BUSY (ocupado) dos amplificadores espectroscópicos e a ausência dos sinais INH (empilhamento). Assim, era gerado um sinal de START para o TDC e as cópias dos sinais dos CFDs, devidamente atrasadas, geravam os STOP, produzindo-se assim os espectros de tempo.

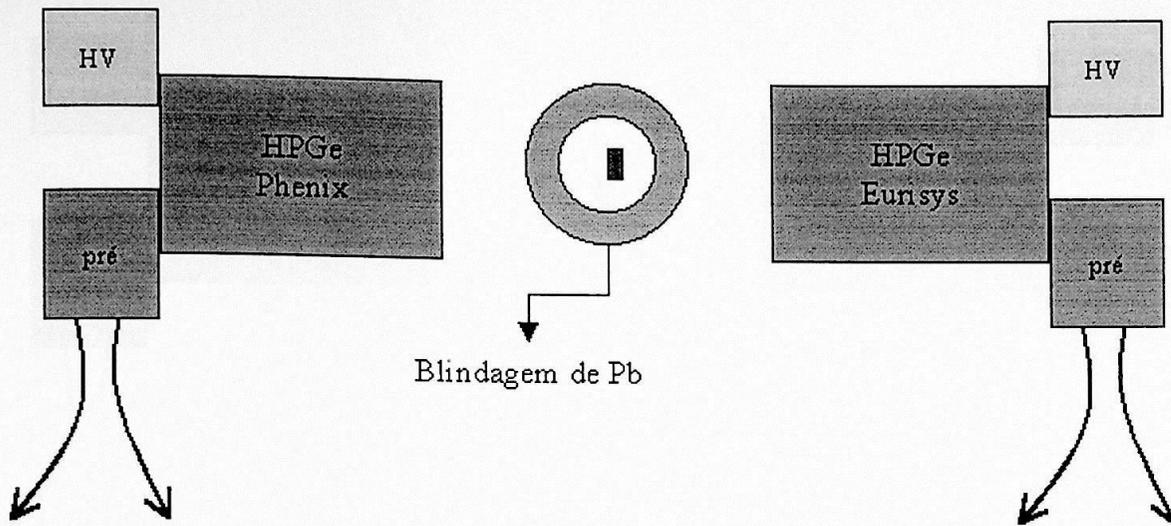


Figura 6a: Primeiro grupo de medidas. O detector Phenix encontra-se a 3,2(2) cm da fonte e o detector Eurisys a 8,1(2)cm.

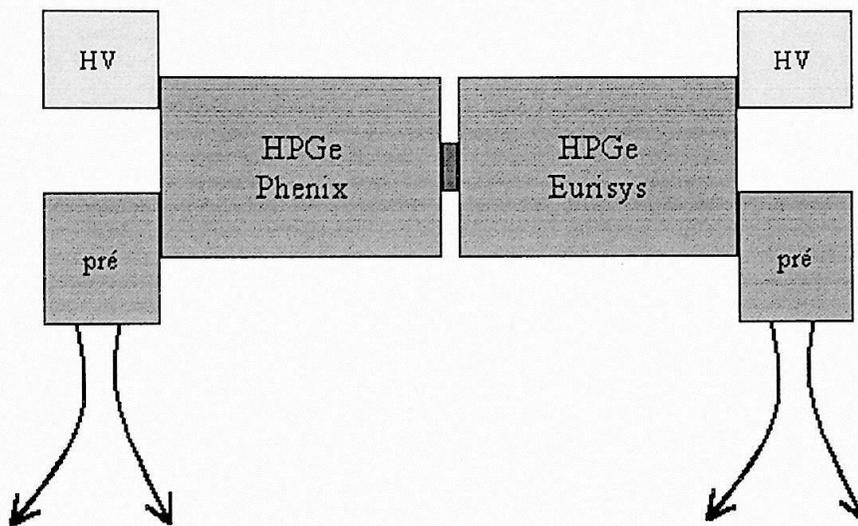


Figura 6b: Segundo grupo de medidas, os detectores estão encostados na fonte.

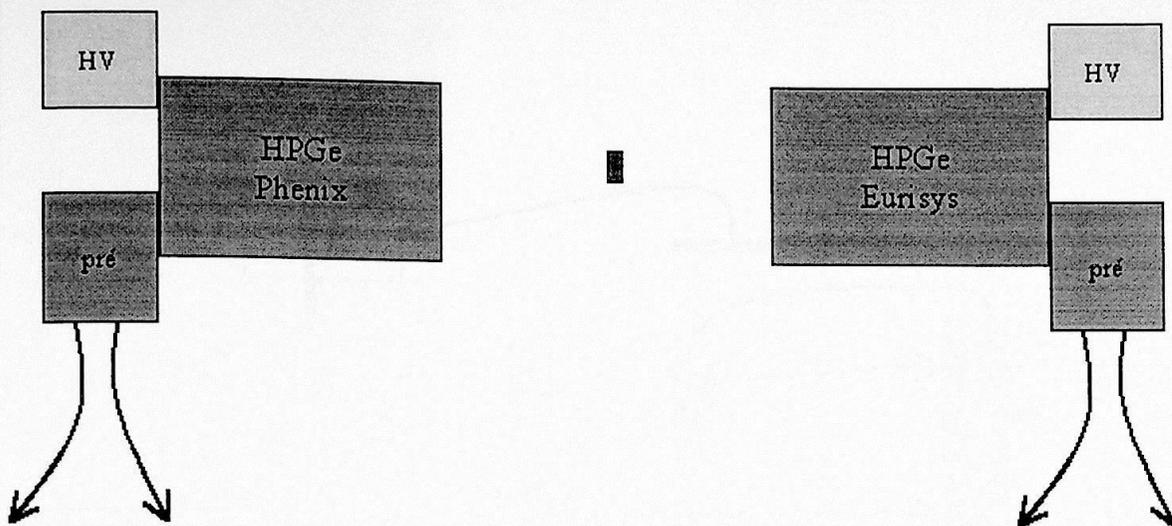
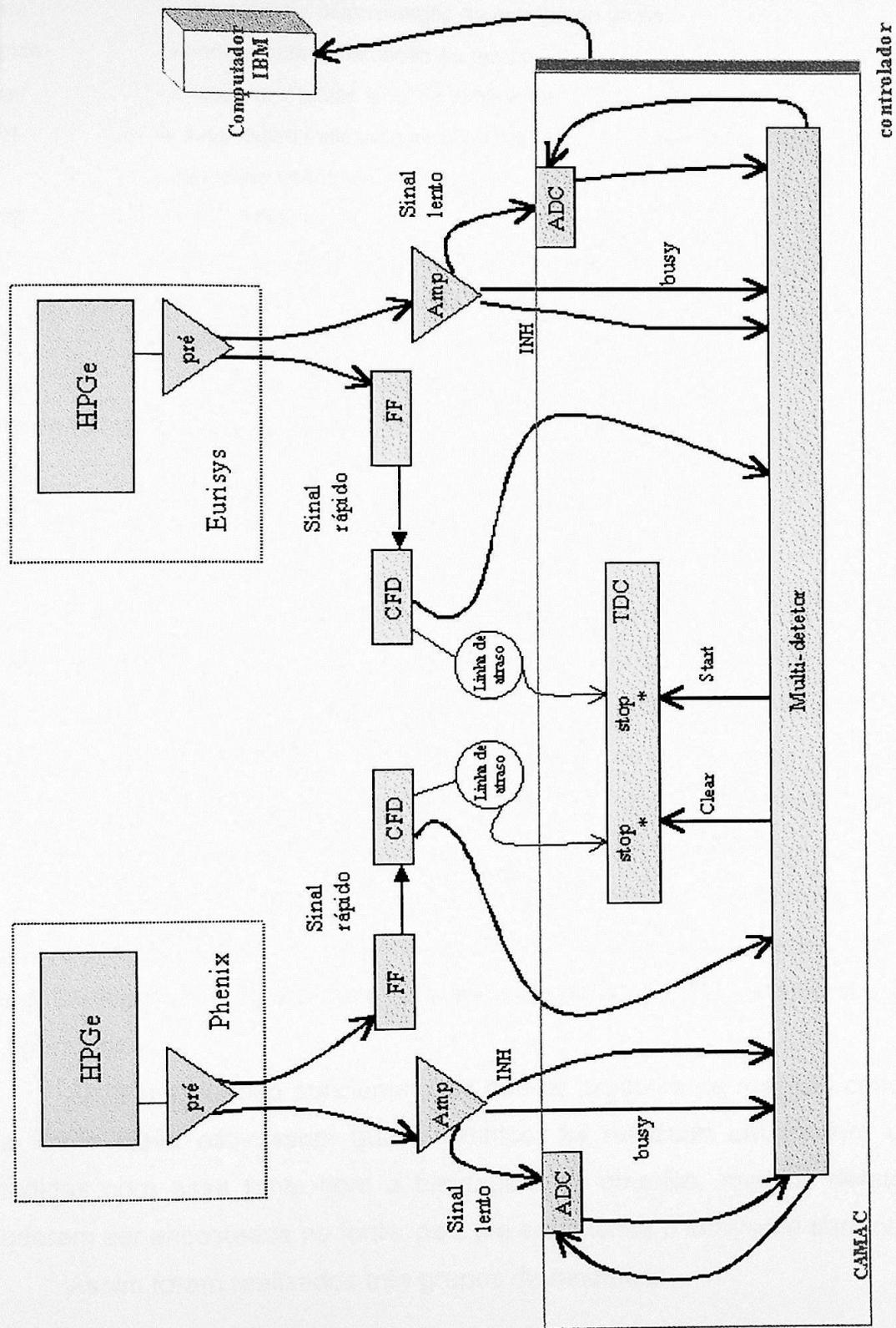


Figura 6c: Terceiro grupo de medidas. O detetor Phenix encontra-se a 3,5(1) cm da fonte e o detetor Eurisys a 3,5(1)cm.

Figura 7: Arranjo experimental e eletrônica de detecção.



Na Figura 7, os nomes significam:

pré	→ Pré - amplificador
ADC	→ AD413A - QUAD 8k ADC da Ortec
CFD	→ 584 CFD da Ortec
lenta	→ linha lenta • determinação da energia do gama
rápida	→ linha rápida • marcação de tempo
busy	→ ocupado • existe sinal na linha lenta
INH	→ sinal lógico indicando empilhamento de pulsos • dois (ou mais) sinais de eventos empilhados
Amp	→ 572 <i>Amplifier</i> da Ortec
HV	→ fonte de tensão • Eurisys 5000V, Phenix 3000V
FF	→ 579 <i>Fast Filter Amplifier</i> da Ortec
TDC	→ TDC da Lecroy
Multi	→ Multiparamétrico-II do LAL
atraso = 250ns	→ linha de atraso

## 2.4- Medidas efetuadas em coincidência

A Fonte Nova estava muito intensa por causa da meia vida de 4,3 dias do  $^{101}\text{Rh}$ ; isótopo produzido em reação concorrente (ver tabela 2). Por isso no arranjo do primeiro grupo de medidas efetuado com a Fonte Nova foi necessário colocá-la dentro de uma blindagem de chumbo, (veja a figura 6a) pois os raios gama dos isótopos concorrentes encontram-se na faixa dos 100keV a 650keV e a seção de choque de absorção de fótons no chumbo é importante nesta faixa de energia.

A Fonte Velha, pouco intensa, e tendo o  $^{102}\text{Rh}^f$  em equilíbrio secular com o metaestável, foi usada no segundo grupo de medidas sendo necessário encostar os detetores na fonte para maior eficiência de detecção do evento procurado (veja a figura 6b).

Após um período suficiente para que os produtos de reações concorrentes da Fonte Nova estivessem quase extintos, foi realizado um terceiro grupo de medidas com essa fonte sem a blindagem de chumbo, mas os detetores não puderam ser encostados na fonte, pois ela era intensa o suficiente para cegá-los.

Assim foram realizados três grupos de medidas:

- primeiro grupo de medidas; foi usada a Fonte Nova, a aquisição teve início 31/03/01 até 07/04/01 o arranjo experimental está esquematizado na figura 6a. Foram feitas medidas em coincidência: da fonte Rh, por cerca de 510.000 s; do  $^{60}\text{Co}$  por 65000 s e de  $^{22}\text{Na}$  por 49000 s para se verificar o sistema e obter a eficiência da coincidência, como explicado adiante. Foram também efetuadas medidas de espectroscopia simples de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{152}\text{Eu}$  com cada detetor, para determinação das eficiências individuais.
- segundo grupo de medidas; foi usada a Fonte Velha, a aquisição teve início 9/04/01 até 26/04/01 o arranjo experimental está esquematizado na figura 6b. Nesta etapa foram feitas medidas em coincidência: da fonte Rh por de  $1,0 \times 10^6$  s; do  $^{22}\text{Na}$  por 86000 s, para determinação da eficiência da coincidência além de espectroscopias simples de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{152}\text{Eu}$  com cada detetor.
- terceiro grupo de medidas; foi usada a Fonte Nova, a aquisição teve início 27/04/01 até 4/05/01 o arranjo experimental está esquematizado na figura 6c. No terceiro grupo foram medidas cerca de 428000 s da fonte Rh em coincidência, além de 86000 s  $^{22}\text{Na}$  para a determinação da eficiência da coincidência. Os espectros de raios gama das fontes  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{152}\text{Eu}$  foram também medidos para a determinação das eficiências individuais dos detetores.

Como mencionado anteriormente, os dados brutos foram registrados em modo fila (fila de eventos), contendo um número que indicava quais detetores participaram da coincidência e em seguida pares (energia, tempo) de cada detetor participante. Estes arquivos, também denominados de espectros, possuíam um nome e a extensão era “.fil”, de fila.

Para a análise foi necessário usar o programa separa\_4 [8] em todos os espectros \*.fil. Este programa analisa e monta para cada espectro \*.fil dois espectros simples (projeções unidimensionais das coincidências) \*\_#.esp onde # é

o número do detetor que executou a aquisição, para cada detetor; também são montados arquivos fila produzindo espectros bidimensionais \*.f47 (aquisição em coincidência temporal dos detetores 4 e 7). O detetor Phenix está representado pelo número 4 e o detetor Eurisys pelo número 7

As projeções individuais \*-4.esp ou \*-7.esp do conjunto em estudo [apêndice A] são necessárias para a verificação de possíveis passeios de fotopicos, esta verificação é feita em cada conjunto de espectros.

As tabelas 16, 17 e 18 a seguir mostram os dados aproveitáveis e seu tempo vivo de contagem.

Tabela 16: Pedacos dos conjuntos de espectros brutos aproveitados do 1º grupo de medidas.

Conjuntos de espectros brutos aproveitados	Espectros bidimensionais para análise	Tempo vivo (s)
rh000.fil até rh070.fil	1rh.f47	172800
rh071.fil até rh181.fil	2rh.f47	
rhnov081.fil até rhnov179.fil	rhnov.f47	93717
rhv000.fil até rhv181.fil	rhv.f47	172800

Tabela 17: Pedacos dos conjuntos de espectros brutos aproveitados do 2º grupo de medidas.

Conjuntos de espectros brutos aproveitados	Espectros bidimensionais para análise	Tempo vivo (s)
rhp108.fil até rhp227.fil	rhp.f47	93508,1
rhr021.fil até rhr097.fil	rhr.f47	67727,9
rhv000.fil até rhv210.fil	rhv.f47	172000
rhvv000.fil até rhvv052.fil	rhvv.f47	43200
rhw000.fil até rhw217.fil	rhw.f47	168000
rht000.fil até rht013.fil	rht.f47	12000
rhq000.fil até rhq110.fil	rhq.f47	86400
rhx000.fil até rhx083.fil	rhx.f47	64800
rha000.fil até rha259.fil	Totalmente desprezado	-

Tabela 18: Conjuntos de espectros brutos totalmente problemáticos do 3º grupo de medidas.

Conjuntos de espectros brutos aproveitados	Espectros para análise	Espectros para análise
Nrhb000.fil até nrhb056.fil	Nrhb.f47	129600
Nrhd000.fil até nrhd041.fil	Nrhd.f47	86400
Nrha000.fil até nrha037.fil	Totalmente desprezado	-
Nrhc000.fil até nrhc054.fil	Totalmente desprezado	-

Todos os espectros \*.f47 da fonte de rádio de cada grupo de medidas, foram somados e relocados [8].

Tabela 19: Espectros de coincidência temporal prontos para a análise.

Grupo de medidas	Espectros *.f47 somados	Tempo vivo total (s)
1º grupo	i1.f47	439317
2º grupo	s2.f47	707636
3º grupo	n3.f47	216000

No apêndice B encontram-se expostos: espectros de  $^{102}\text{Rh}$  dos grupos de medidas projetados e espectros de  $^{152}\text{Eu}$ , usado para calibração, do primeiro grupo de medidas.

## 2.5- Possível interferência na medida

Há no decaimento do  $^{102}\text{Rh}^m$  uma possibilidade de mímica do evento procurado: o fóton de 631 keV está em coincidência verdadeira com outro que o antecede, de 1113 keV, Figura 2. Como este último tem energia suficiente para a produção de pares, se este fenômeno ocorrer nos materiais inertes nas proximidades dos detetores pode-se também estar produzindo um evento do tipo procurado e ele será tratado como evento verdadeiro. Para verificar este problema foi feita uma medida de espectroscopia de coincidência temporal com uma fonte de  $^{60}\text{Co}$ , espectro efco.f47 para estimar o efeito através da coincidência (511 – 511 + 1173 keV) onde o par de fótons de aniquilação viria da produção de pares do fóton de 1333 keV. O efeito não foi observado na medida efetuada. Uma

estimativa da probabilidade de ocorrência de pares produzidos na janela de Al dos detectores foi feita para diversos isótopos emissores de fótons com diferentes energias.

A espessura ( $t$ ) do alumínio que protege o cristal dos detectores utilizados no experimento, modelo CFG-SH (detetor Phenix) é de 1,270(11) mm e do detetor Eurisys é  $\leq 1$  mm. O cálculo (estimado) da probabilidade do efeito de produção de pares para um determinado gama ao atravessar uma determinada espessura de Al é:

- $\mu$   $\Rightarrow$  coeficiente de atenuação do Al  
 $t = 0,10$  ou  $0,127$  cm  $\Rightarrow$  espessura do Al  
 $\sigma$   $\Rightarrow$  seção de choque para produção de pares [9]  
 $N = 6,02 \times 10^{23}$   $\Rightarrow$  número de Avogadro  
 $d = 2,7$  g/cm<sup>3</sup>  $\Rightarrow$  densidade do Al  
 $A = 26,9815$  g/mol  $\Rightarrow$  massa atômica do Al  
 $P$   $\Rightarrow$  Probabilidade para a ocorrência da produção de pares

$$\mu = \frac{\sigma \times N \times d}{A} = \sigma \times 0,06024 \left( \frac{1}{\text{cm}} \right)$$

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu \times t)$$

$$P = \left( 1 - \frac{I}{I_0} \right) \times 100\%$$

Assim a probabilidade de que um fóton ao atravessar a capa de proteção de Al do detetor, sofra uma interação que leve à produção de um par, é dada na tabela 20.

### 3 Análise dos dados

Tabela 20: A probabilidade de um raio gama causar a produção de um par ao atravessar as janelas de Al dos detetores.

Energia (keV)	$\mu$ (1/cm)	$\sigma$ (barn)	P% ( $t = 1,27\text{mm}$ )	P% ( $t = 1\text{mm}$ )
1115 - $^{65}\text{Zn}$	$4,279 \times 10^{-08}$	$7,10 \times 10^{-07}$	$5,43466 \times 10^{-07}$	$4,27926 \times 10^{-07}$
1113 - $^{102}\text{Rh}^m$	$3,255 \times 10^{-08}$	$5,40 \times 10^{-07}$	$4,13341 \times 10^{-07}$	$3,25465 \times 10^{-07}$
1274 - $^{20}\text{Na}$	$8,462 \times 10^{-05}$	$1,40 \times 10^{-03}$	$1,07468 \times 10^{-03}$	$8,46205 \times 10^{-04}$
1173 - $^{60}\text{Co}$	$3,857 \times 10^{-06}$	$6,40 \times 10^{-05}$	$4,89885 \times 10^{-05}$	$3,85736 \times 10^{-05}$
1332 - $^{60}\text{Co}$	$1,266 \times 10^{-04}$	$2,10 \times 10^{-03}$	$1,60742 \times 10^{-03}$	$1,26569 \times 10^{-03}$
1561 - $^{56}\text{Ni}$	$4,612 \times 10^{-04}$	$7,65 \times 10^{-03}$	$5,85702 \times 10^{-03}$	$4,61185 \times 10^{-03}$

Com isto pode ser descartado o efeito de interferência no caso em estudo.

### 3- Análise dos dados

#### 3.1 – Primeiro grupo de medidas – tratamento da eficiência

Devido à geometria utilizada neste grupo de medidas, para determinar a eficiência de detecção de cada raio gama para cada detector foi necessário primeiro ajustar a seção de choque de absorção do Pb, que estará incorporada à eficiência como um efeito de janela.

A eficiência neste caso tem um comportamento distinto pois deve-se considerar a absorção no chumbo e a equação que rege este comportamento é:

$$F_{abs}(E) = \exp\left(-\left(p(1) \times E^{-p(2)} + p(3) \times E^{-p(4)}\right) \times p(5)\right) \quad (3.1)$$

$$\varepsilon = F_{abs}(E) \times \left(p(6) \times e^{-p(7) \times E} + p(8) \times e^{-p(9) \times E}\right) \quad (3.2)$$

$E$  ⇒ energia do fóton,

$p(i)$  ⇒ parâmetros por ajustar

$F_{abs}(E)$  ⇒ termo de fotoabsorção  $e^{-\mu(E) \times p(5)}$

$p(5)$  ⇒ está associado à espessura de Pb

$\varepsilon$  ⇒ eficiência absoluta

Para determinar os parâmetros da eficiência primeiro foi necessário primeiramente ajustar a equação 3.3 determinando os parâmetros  $p(1)$ ,  $p(2)$ ,  $p(3)$  e  $p(4)$  da seção de choque do chumbo. Os dados para ajustar esta curva (Figura 8) são os valores  $\sigma$  (tot), extraídos da referência [9], em função da energia. Os valores estão expostos na tabela 21.

A equação 3.3 foi extraída da função 3.1 e ajustada no programa Ajuste,

$$\mu(E) = \left(p(1) \times E^{-p(2)} + p(3) \times E^{-p(4)}\right) \quad (3.3)$$

Tabela 21: Valores da energia do raio gama e sua respectiva seção de choque total no chumbo.

Energia(MeV)	$\sigma$ (tot) (cm <sup>2</sup> /g)
0,1	1900(47)
0,15	692(17)
0,2	342(9)
0,3	137(3)
0,4	79(2)
0,5	54,7(13)
0,6	42,4(11)
0,8	30,1(8)
1	24,2(6)
1,5	17,8(4)

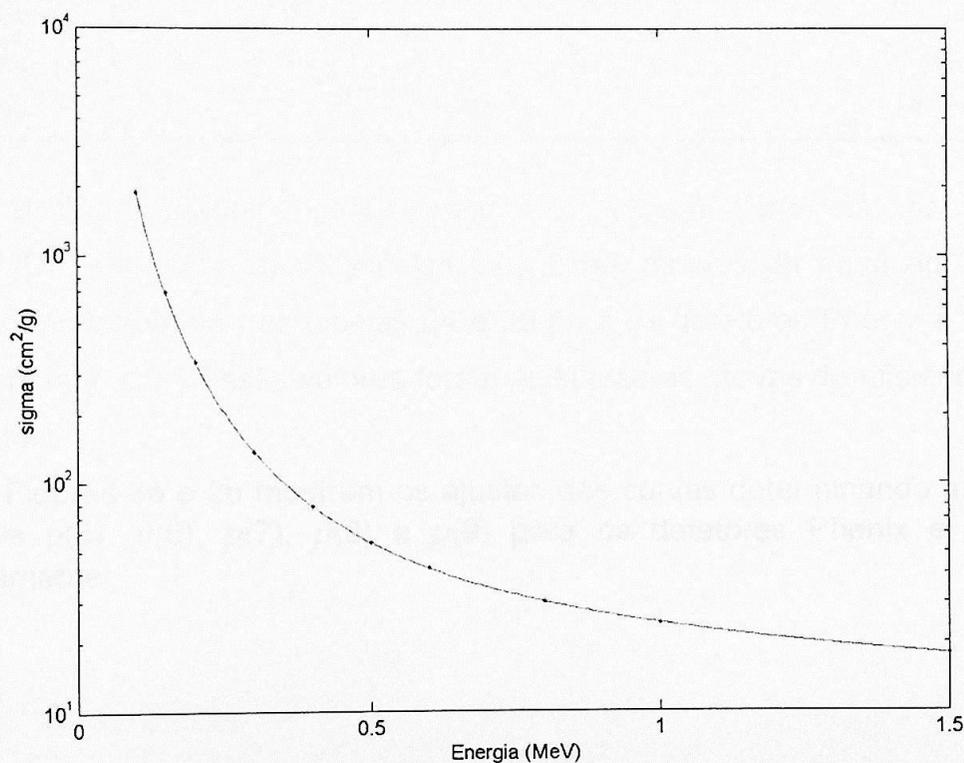


Figura 8: Curva ajustada para obter os parâmetros da seção de choque de absorção no chumbo.

Os parâmetros obtidos no ajuste da função da seção de choque encontram-se na tabela 22. Estes parâmetros  $p(1)$ ,  $p(2)$ ,  $p(3)$  e  $p(4)$  foram fixados,

considerados constantes no ajuste da curva da eficiência de ambos os detectores. Foram então ajustados  $p(5)$ ,  $p(6)$ ,  $p(7)$ ,  $p(8)$  e  $p(9)$ , função 3.2, aos dados de eficiência.

Tabela 22: Parâmetros fixados e usados para o ajuste da curva de eficiência dos detectores.

$p(1)$	20,1(7)
$p(2)$	0,50(8)
$p(3)$	4,2(5)
$p(4)$	2,64(6)

Tabela 23: Fontes calibradas e espectros usados para a determinação das eficiências dos detectores.

Fonte	Detetor Eurisys	Detetor Phenix	Atividade(kBq)
$^{152}\text{Eu}$	eupr.chn	Euver.chn	153(7)
$^{131}\text{Cs}$	cspr.chn	Csver.chn	252(3)
$^{22}\text{Na}$	naef.fil		2,20(4)

As áreas dos fotopicos dos espectros do Cs e Eu foram calculadas pelo programa IDF\_Win [5] e as eficiências calculadas através da equação 2.3. Os resultados encontram-se nas tabelas 24 e 25 para os detectores Phenix e Eurisys respectivamente. Com esses valores foram ajustadas as curvas de eficiência para cada detetor.

As Figuras 9a e 9b mostram os ajustes das curvas determinando assim os parâmetros  $p(5)$ ,  $p(6)$ ,  $p(7)$ ,  $p(8)$  e  $p(9)$  para os detectores Phenix e Eurisys respectivamente.

Tabela 24: Eficiência calculada para os raios gama das fontes calibradas para a determinação da curva de eficiência do detector Phenix; intensidade dos raios gama de  $^{152}\text{Eu}$  e  $^{137}\text{Cs}$  foram retirados do relatório IAEA [ 6].

Energia (keV)	Intensidade do raio gama	Área do fotopico	Eficiência
344,3	0,2657(11)	86943(872)	$5,93(27) \times 10^{-04}$
411,13	0,02238(10)	14534(423)	$1,18(6) \times 10^{-03}$
443,96	0,03125(14)	24407(379)	$1,41(7) \times 10^{-03}$
778,9	0,1297(6)	188241(689)	$2,63(12) \times 10^{-03}$
867,39	0,04214(25)	62018(405)	$2,67(12) \times 10^{-03}$
964,05	0,1463(6)	212080(638)	$2,63(11) \times 10^{-03}$
1085,84	0,1013(5)	145505(521)	$2,60(11) \times 10^{-03}$
1089,77	0,01731(9)	25825(234)	$2,70(12) \times 10^{-03}$
1112,09	0,1354(6)	193415(557)	$2,59(11) \times 10^{-03}$
1212,97	0,01412(8)	19644(198)	$2,52(11) \times 10^{-03}$
1299,15	0,01626(11)	22190(200)	$2,47(11) \times 10^{-03}$
1408,02	0,2085(9)	275847(672)	$2,40(10) \times 10^{-03}$
661,66	0,851(2)	1989398(1814)	$2,58(5) \times 10^{-03}$

Tabela 25: Eficiência calculada dos raios gama das fontes calibradas de  $^{152}\text{Eu}$  e  $^{137}\text{Cs}$  para a determinação da curva de eficiência do detector Eurysis.

Energia (keV)	Área do fotopico	Eficiência
344,3	56095(367)	$3,82(17) \times 10^{-04}$
411,13	9759(231)	$7,9(4) \times 10^{-04}$
443,96	16776(247)	$9,7(4) \times 10^{-04}$
778,9	124854(427)	$1,74(8) \times 10^{-03}$
867,39	41610(301)	$1,79(8) \times 10^{-03}$
964,05	144602(558)	$1,79(8) \times 10^{-03}$
1085,84	99449(496)	$1,78(8) \times 10^{-03}$
1089,77	17137(199)	$1,79(8) \times 10^{-03}$
1112,09	132883(722)	$1,78(8) \times 10^{-03}$
1212,97	13754(280)	$1,76(8) \times 10^{-03}$
1299,15	15479(208)	$1,72(8) \times 10^{-03}$
1408,02	187634(585)	$1,63(7) \times 10^{-03}$
661,66	1460222(1563)	$1,70(3) \times 10^{-03}$

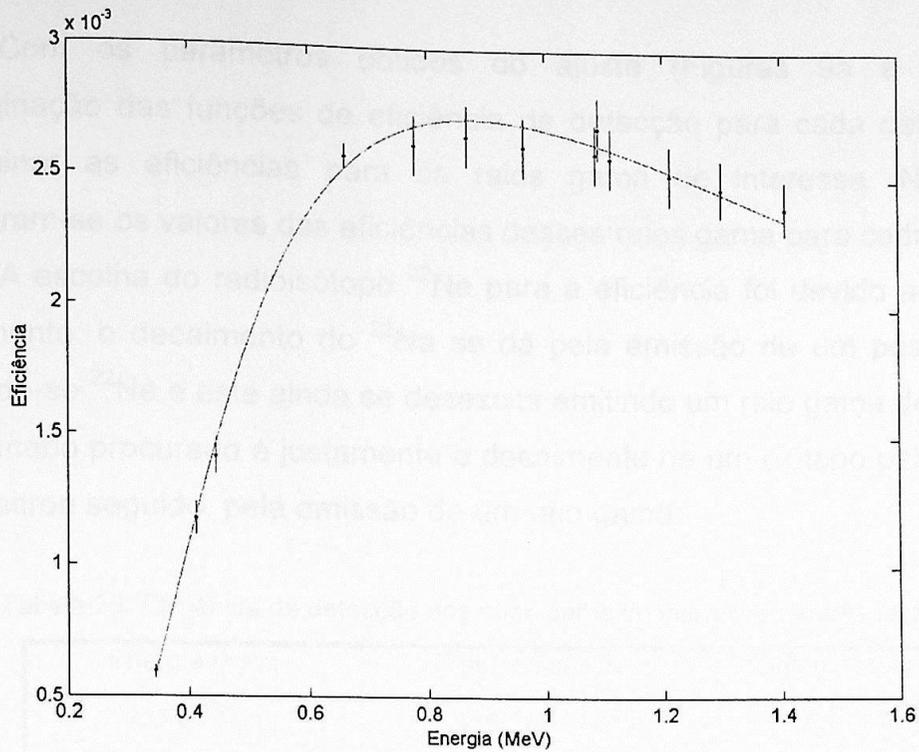


Figura 9a: Ajuste de curva de eficiência (equação 3.2) determinando os parâmetros  $p(5)$ ,  $p(6)$ ,  $p(7)$ ,  $p(8)$  e  $p(9)$  para o detector Phenix.

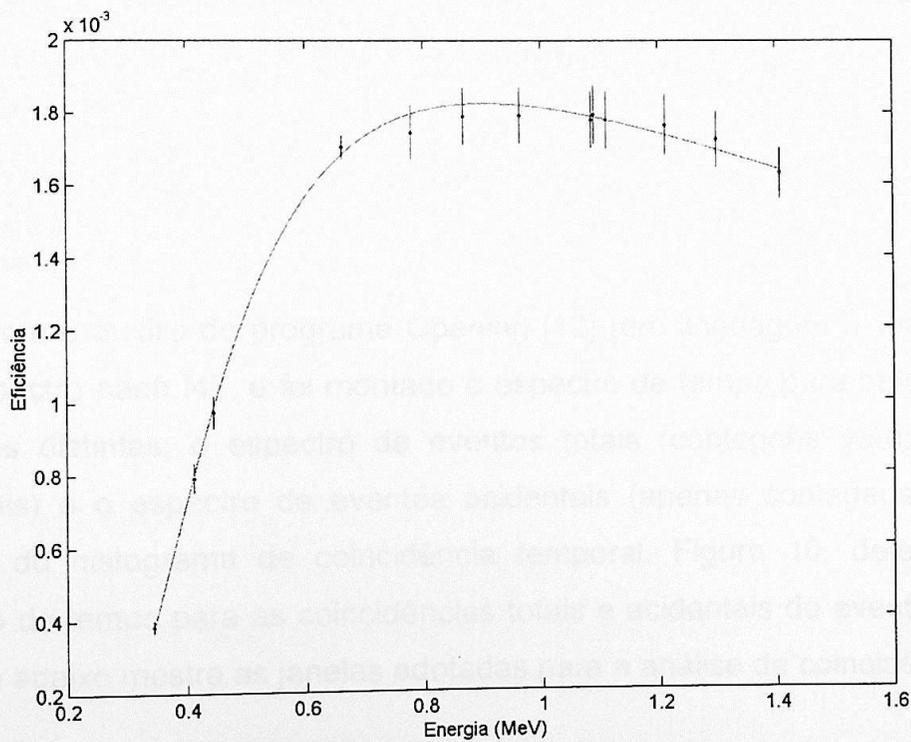


Figura 9b: Ajuste de curva de eficiência (equação 3.2) determinando os parâmetros  $p(5)$ ,  $p(6)$ ,  $p(7)$ ,  $p(8)$  e  $p(9)$  para o detector Eurisys.

Com os parâmetros obtidos do ajuste (Figuras 9a e 9b) para a determinação das funções de eficiência de detecção para cada detetor pode-se determinar as eficiências para os raios gama de interesse. Na tabela 26 encontram-se os valores das eficiências desses raios gama para cada detetor.

A escolha do radioisótopo  $^{22}\text{Na}$  para a eficiência foi devido ao seu tipo de decaimento: o decaimento do  $^{22}\text{Na}$  se dá pela emissão de um pósitron (100%), tornando-se  $^{22}\text{Ne}$  e este ainda se desexcita emitindo um raio gama de 1274,5 keV; o fenômeno procurado é justamente o decaimento de um isótopo pela emissão de um pósitron seguido, pela emissão de um raio gama.

Tabela 26: Eficiência de detecção dos raios gama de interesse para cada detetor

Energia (keV)	Detetor Eurisys	Detetor Phenix
631 ( $^{102}\text{Rh}$ )	$1,633(26) \times 10^{-3}$	$2,45(5) \times 10^{-3}$
1274 ( $^{22}\text{Na}$ )	$1,71(4) \times 10^{-3}$	$2,48(5) \times 10^{-3}$

Para se determinar a eficiência de detecção de coincidência temporal do 511 – 1274 + 511 keV analisou-se o espectro naef.f47; primeiro no programa BIDIM onde se relocou o espectro para um ganho cuja calibração em energia é dada pela equação 3.4:

$$E = 0,625000 c - 1,00 \quad (3.4)$$

$E$   $\Rightarrow$  energia

$c$   $\Rightarrow$  canal

Com o auxílio do programa Opening [10] (em linguagem Matlab) analisou-se o espectro naefr.f47, e foi montado o espectro de tempo para determinar duas situações distintas; o espectro de eventos totais (contagens verdadeiras mais acidentais) e o espectro de eventos acidentais (apenas contagens acidentais). Através do histograma de coincidência temporal, Figura 10, determinou-se o intervalo de tempo para as coincidências totais e acidentais do evento procurado. A tabela abaixo mostra as janelas adotadas para a análise da coincidência.

Tabela 27: Janelas obtidas do espectro de tempo para posterior análise e distinção dos espectros de energia coincidentes temporais totais e acidentais (1 canal = 1 ns).

Janela total (ns)	443 a 475
Janela acidental (ns)	543 a 575

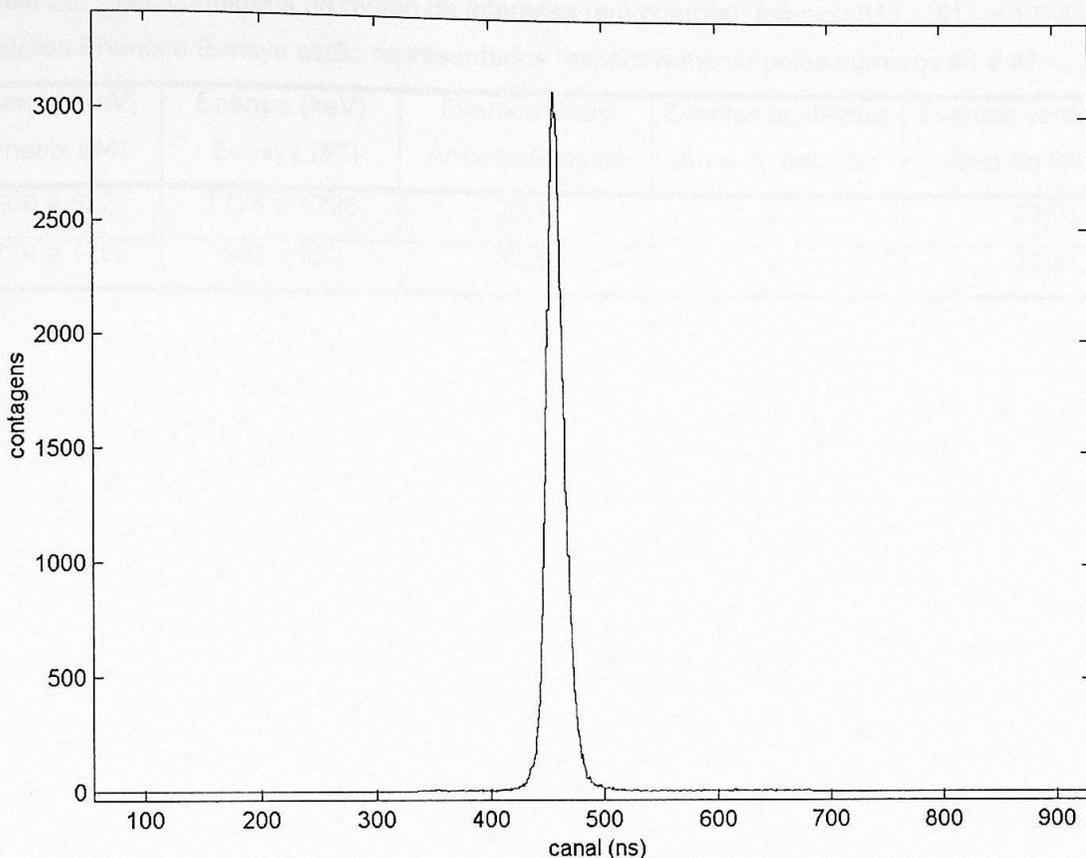


Figura 10: Espectro de tempo, ou histograma da diferença de tempo de detecção de raios gama dos detectores Phenix e Eurisy obtido do arquivo naefr.f47; 1 canal equivale a 1ns.

Após a análise do espectro de tempo e com as janelas temporais determinadas (tabela 27) usou-se novamente o programa Opening [10] para montar o histograma de eventos totais e acidentais. Com as matrizes criadas e sendo conhecida a calibração de energia do espectro naefr.f47, equação 3.4, usou-se o programa twodgates [10] para montar dois histogramas de eventos nas regiões das energias de interesse, mostradas na tabela 28, que são os espectros janelados, Figuras 11a e 11b.

Em ambos os espectros janelados de coincidências acidentais o número de contagens é nulo assim os espectros janelados de coincidências totais equivalem a coincidências verdadeiras, e os números de contagens encontram-se na tabela 28.

Tabela 28:  $^{22}\text{Na}$ : contagens na região de interesse (em energia); fotopico 511 – 511 + 1274 keV; os detetores Phenix e Eurisys estão representados respectivamente pelos números #4 e #7.

Energia (keV) Phenix (#4)	Energia (keV) Eurisys (#7)	Eventos totais Área do fotopico	Eventos acidentais Área do fotopico	Eventos verdadeiros Área do fotopico
500 a 522	1774 a 1796	22(5)	0	22(5)
1774 a 1796	500 a 522	32(5)	0	32(6)

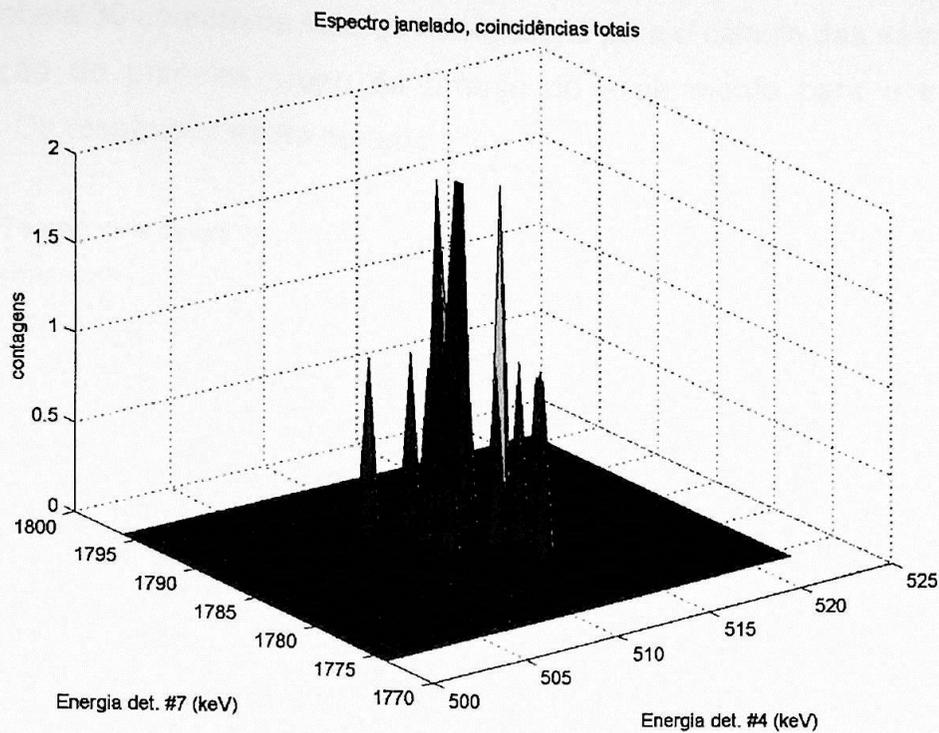


Figura11a: Espectro de eventos totais de coincidência temporal na janela de interesse; o detetor Eurisys está representado pelo número #7 e o detetor Phenix representado pelo #4.

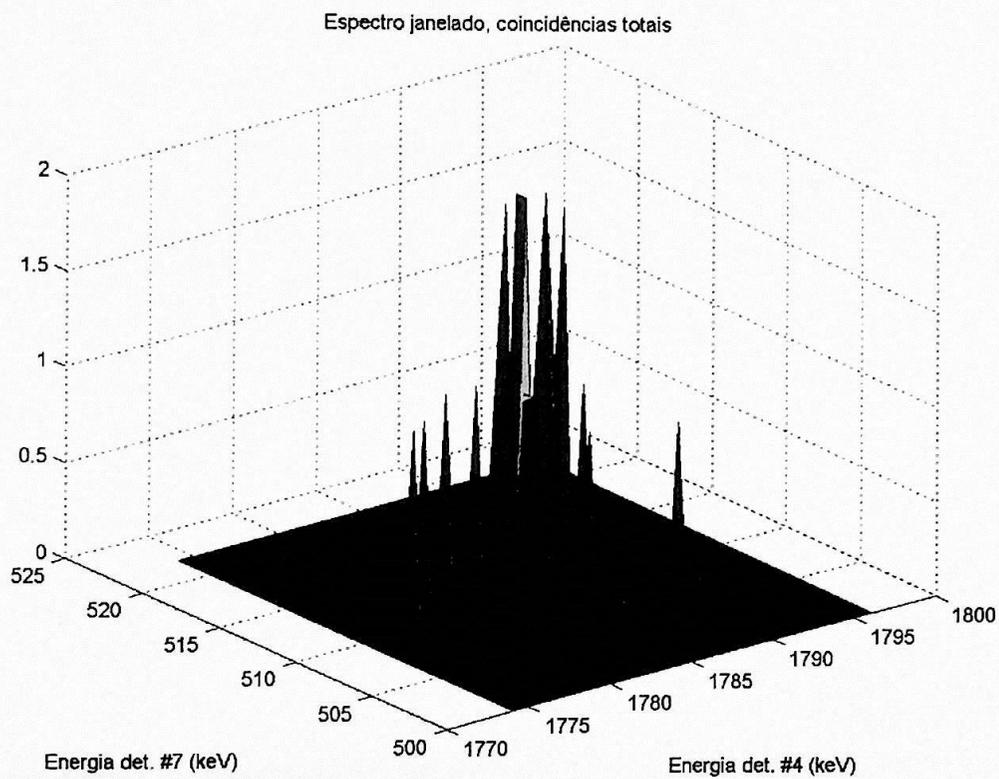


Figura11b: Espectro de eventos do tipo total na janela de interesse;

A tabela 30 contém os valores necessários para o cálculo das as eficiências de detecção do primeiro grupo de arranjo do experimento para o evento de interesse. Os resultados estão na tabela 31.

Tabela 30: Tempo vivo da aquisição com a fonte de  $^{22}\text{Na}$  e sua atividade, áreas dos fotopicos dos eventos verdadeiros (511 – 511 + 1274 keV) e das eficiências de detecções individuais de determinados raios gama; #4 representa a detecção do gama pelo Phenix e #7 pelo EurisyS.

Tempo vivo (s)	Atividade (kBq)
48600	2,19(4)
Intensidade do 1274 (keV)	99,944(14)%
Energia (keV)	Área do fotopico
511 <sub>#4</sub> – 511 + 1274 <sub>#7</sub>	22(5)
511 <sub>#7</sub> – 511 + 1274 <sub>#4</sub>	32(6)
Energia (keV)	Eficiência
631 <sub>#4</sub>	$2,45(5) \times 10^{-3}$
631 <sub>#7</sub>	$1,633(26) \times 10^{-3}$
1274 <sub>#4</sub>	$2,48(5) \times 10^{-3}$
1274 <sub>#7</sub>	$1,71(3) \times 10^{-3}$

Calculou-se então a eficiência para a coincidência com soma procurada, de acordo com

$$\mathcal{E}_{E1_{(\#a)}-E2+E3_{(\#b)}} = \mathcal{E}_{E1_{(\#a)}-E2+E4_{(\#b)}} \times \frac{\mathcal{E}_{E3_{(\#b)}}}{\mathcal{E}_{E4_{(\#b)}}}$$

onde

$\mathcal{E}_{E1_{(\#a)}-E2+E3_{(\#b)}}$   $\Rightarrow$  Eficiência de detecção em coincidência temporal dos raios gama de energia  $E1$ ,  $E2$  e  $E3$  nos detectores  $\#a$  (detectou raio gama  $E1$ ) e  $\#b$  (detectou simultaneamente raios gama de energia  $E2$  e  $E3$  sendo que a eletrônica traduz como se fosse um único raio gama de energia  $E2 + E3$ ).

$\mathcal{E}_{E3_{(\#b)}}$   $\Rightarrow$  Eficiência de detecção do raio gama de energia  $E3$  para o detector  $\#b$ .

neste caso particular tem-se

$$\mathcal{E}_{511_{(\#a)}-511+631_{(\#b)}} = \mathcal{E}_{511_{(\#a)}-511+1274_{(\#b)}} \times \frac{\mathcal{E}_{631_{(\#b)}}}{\mathcal{E}_{1274_{(\#b)}}} \quad (3.5)$$

Tabela 31: Valores das eficiências de detecção de coincidência temporal para os eventos de interesse:

Energia (keV)	Eficiência
511 <sub>#4</sub> - 511+1274 <sub>#7</sub>	2,1(4) x 10 <sup>-7</sup>
511 <sub>#7</sub> - 511+1274 <sub>#4</sub>	3,0(5) x 10 <sup>-7</sup>
511 <sub>#4</sub> - 511+ 631 <sub>#7</sub>	2,0(4) x 10 <sup>-7</sup>
511 <sub>#7</sub> - 511+ 631 <sub>#4</sub>	3,0(5) x 10 <sup>-7</sup>

Após a preparação dos espectros de ródio para a análise utilizou-se o programa Bidim para relocá-los obtendo assim uma nova calibração de energia, a equação 3.6.

$$E = 0,666667 \times c - 1,00 \quad (3.6)$$

$E$   $\Rightarrow$  energia  
 $c$   $\Rightarrow$  canal

### 3.2 Primeiro grupo de medidas – redução de dados

Os arquivos \*.f47 armazenam as informações dos eventos dos detetores 4 e 7 em modo fila, que são pares de energias de raios gama que foram detectados individualmente em cada detetor e o intervalo de tempo que indica após o sinal de entrada do primeiro raio gama quanto tempo passou até o sinal de entrada do segundo raio gama (gerando um evento).

Com o auxílio do programa Opening [10] o arquivo i1.f47 foi analisado montando-se primeiro o espectro de tempo.

Os eventos verdadeiros ocorrem em um intervalo de tempo curto e os eventos acidentais ocorrem aleatoriamente em qualquer intervalo de tempo com a mesma probabilidade, assim o número de eventos em coincidências verdadeiras mais acidentais formam o pico Figura 12, e o fundo no espectro de energia será

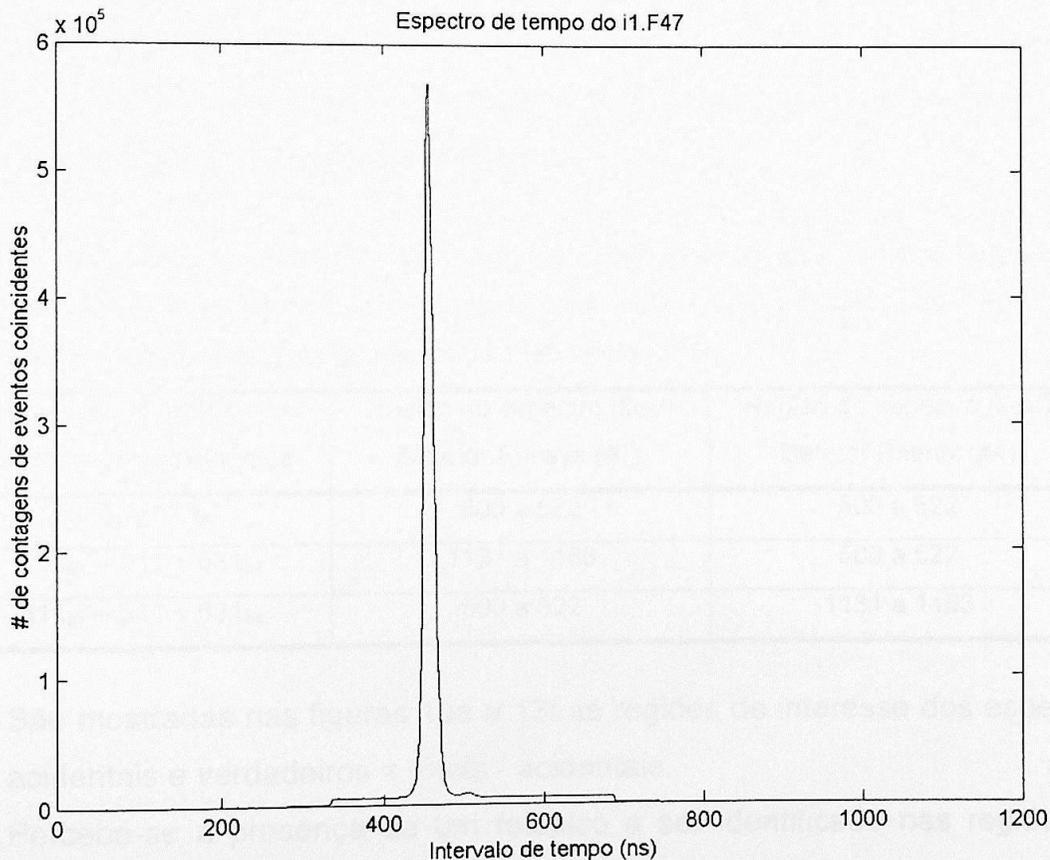


Figura 12: Espectro de tempo montado pelo programa Opening; o arquivo analisado foi i1.f47.

dados pelas coincidências verdadeiras que virão do efeito Compton, mais os eventos de coincidências acidentais.

A coincidência com o efeito Compton se dá quando num detector o primeiro fóton é totalmente absorvido e o segundo produz um efeito Compton no outro detector, deixando lá apenas parte de sua energia. Trata-se de uma coincidência verdadeira.

Tabela 32: Janelas do espectro de tempo. A primeira janela, no pico, é a região onde encontram-se os eventos de coincidências totais e a segunda janela, que é a região de fundo, onde encontram-se apenas os eventos de coincidências acidentais. (1canal = 1ns).

Janela total (ns)	435 a 480
Janela acidental (ns)	535 a 580

Com as janelas de tempo determinadas foram montados dois espectros de energia: o primeiro espectro contendo eventos de coincidências totais e o segundo espectro apenas eventos de coincidências acidentais. Com a calibração de energia conhecida (equação 3.6) os espectros de energia dos eventos foram janelados nas regiões de interesse, tabela 33.

Tabela 33: As regiões de interesse são as regiões onde se encontra o fotopico formado pela detecção em coincidência temporal dos fótons de aniquilação do decaimento  $\beta^+$  do  $^{102}\text{Rh}^m$  com o gama de 631keV de desexcitação do estado de 1106 keV do  $^{102}\text{Ru}$ .

Energia (keV) Eventos em coincidência	Região do espectro (keV) Detetor Eurisys (#7)	Região do espectro (keV) Detetor Phenix (#4)
$511_{\#4} - 511_{\#7}$	500 a 522	500 a 522
$511_{\#4} - 511 + 631_{\#7}$	1131 a 1153	500 a 522
$511_{\#7} - 511 + 631_{\#4}$	500 a 522	1131 a 1153

São mostradas nas figuras 13a a 13f as regiões de interesse dos espectros totais, acidentais e verdadeiros = totais - acidentais.

Percebe-se a presença de um fotopico a ser identificado nas regiões de interesse, Figuras 13c e 13f.

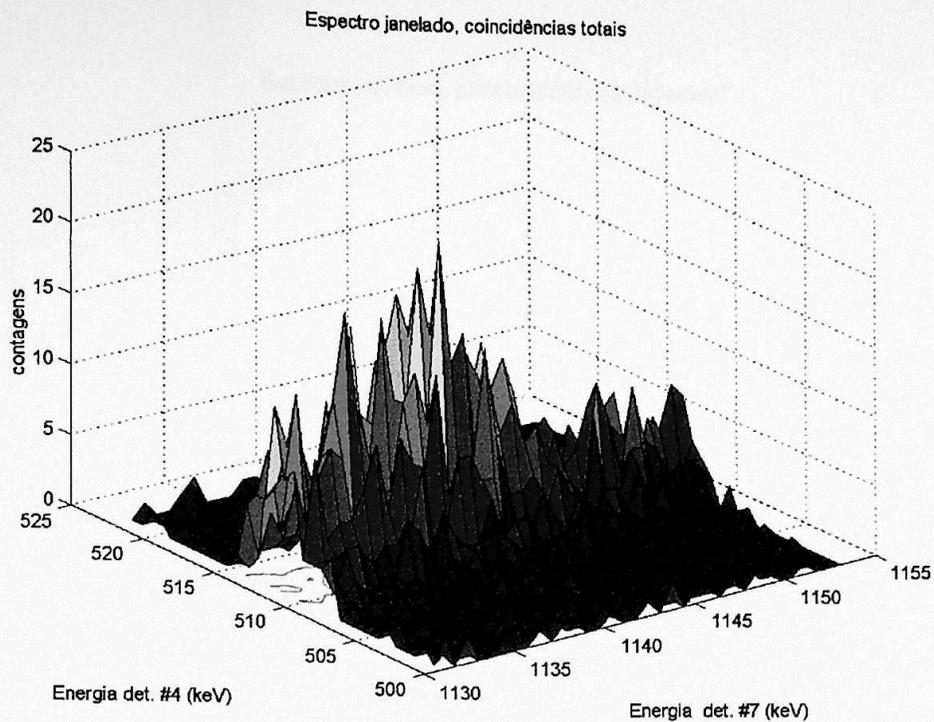


Figura13a: Espectro janelado na região de interesse, eventos de coincidências verdadeiras e acidentais.

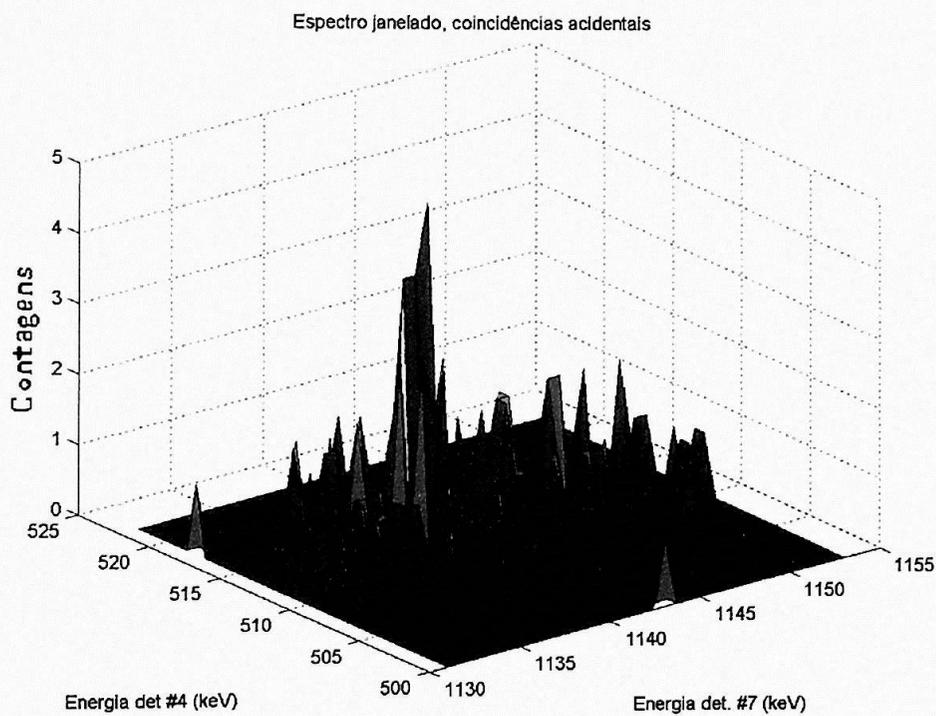


Figura 13b: Espectro janelado na região de interesse, eventos de coincidências acidentais

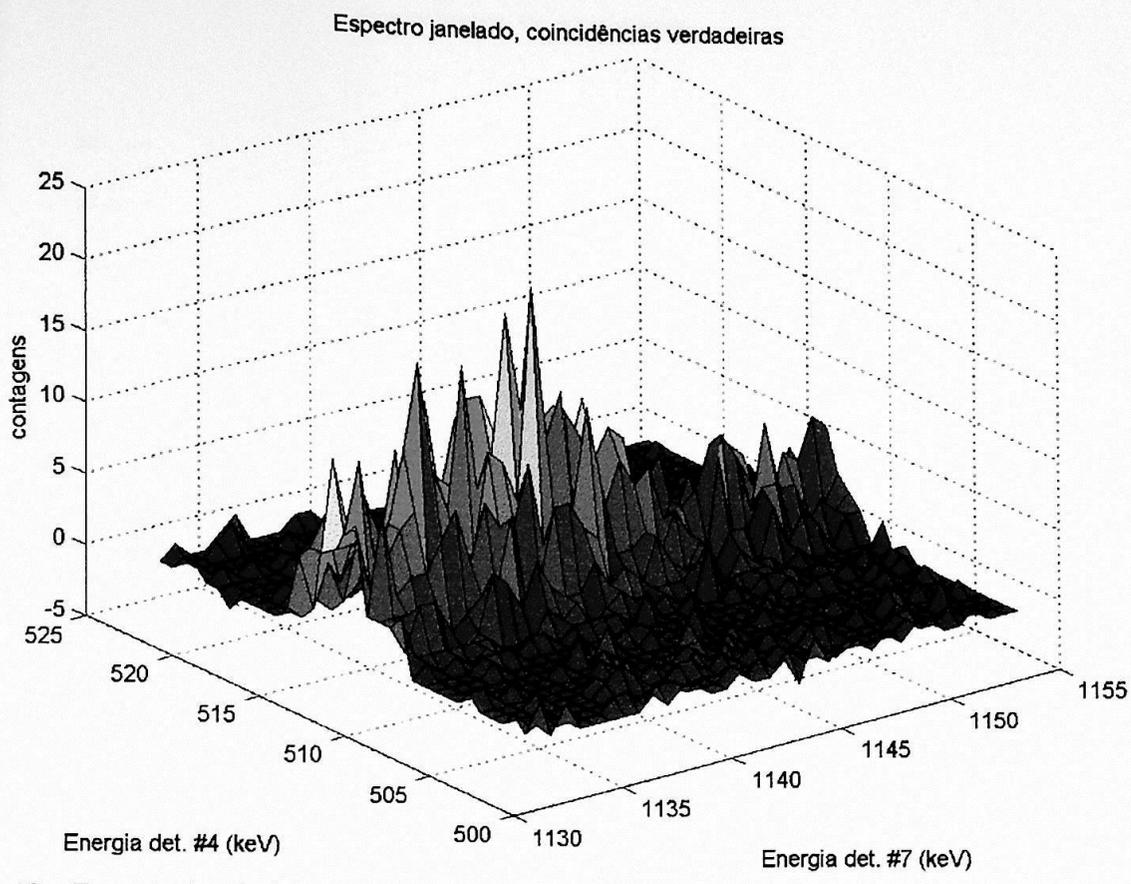


Figura 13c: Espectro janelado na região de interesse, eventos de coincidências verdadeiras.

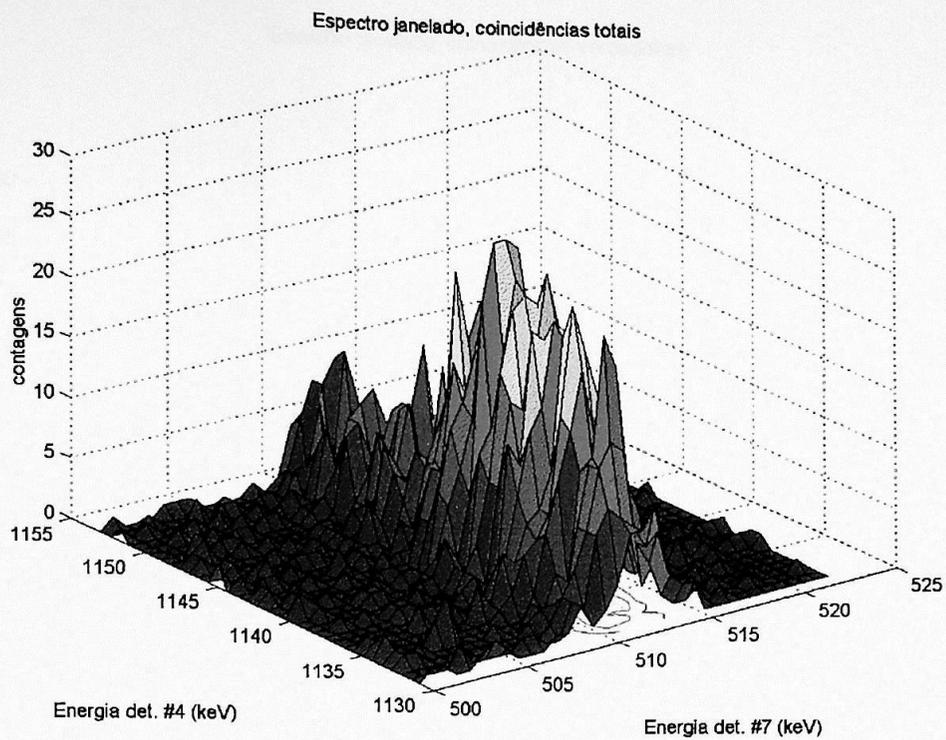


Figura13d: Espectro janelado na região de interesse, eventos de coincidências verdadeiras e acidentais.

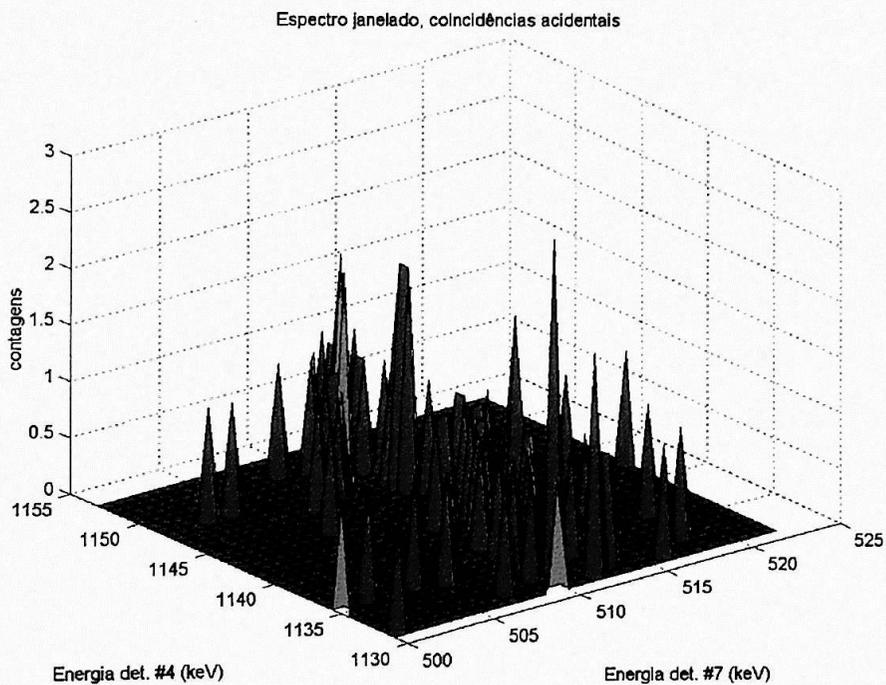


Figura 13e: Espectro janelado na região de interesse, eventos de coincidências acidentais.

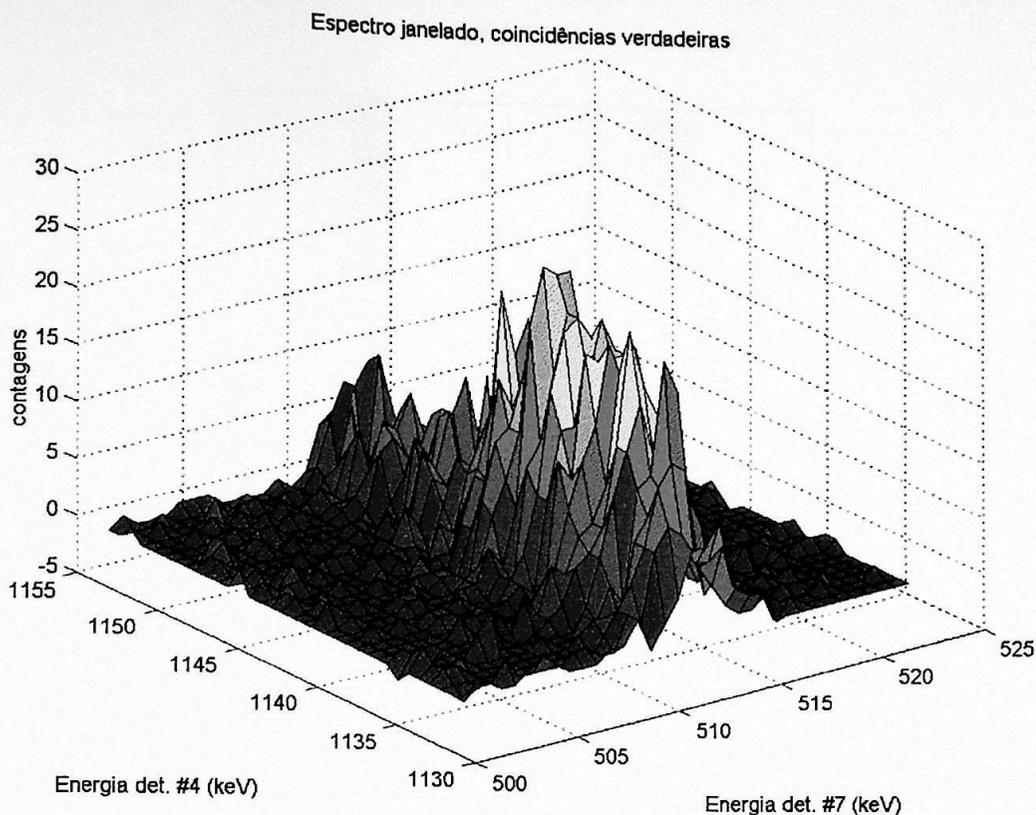


Figura 13f: Espectro janelado na região de interesse, eventos de coincidências verdadeiras.

Foram ajustadas as áreas dos fotopicos desconhecidos nas duas regiões de interesse (Figuras 14a, 14b, 14c e 14d ) e determinadas as energias das centróides destes com o auxílio do programa BIDIM [8]. Os resultados encontram-se na tabela 34. As Figuras 14 representam a saída gráfica do programa de ajuste BIDIM. Nelas, os índices (1), (2) e (3) representam respectivamente histogramas/curvas de nível de: (1) dados experimentais; (2) função ajustada, a calha vertical (ou horizontal) mais escura representa coincidências da energia de 511 keV com o efeito compton de fótons de energia mais elevada; e (3) espectro de resíduos do ajuste.

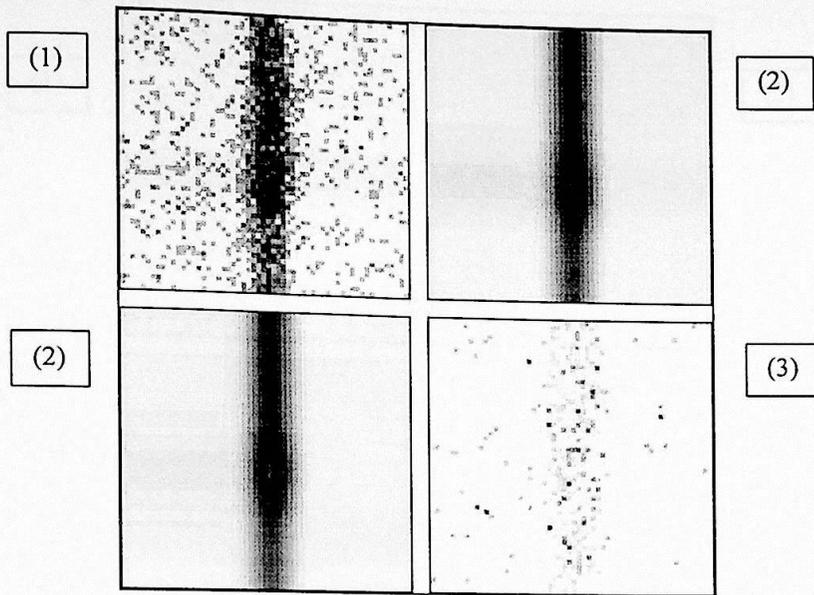


Figura 14a: Fotopico ajustado no programa Bidim;  $511_{\#4} - 511 + 628_{\#7}$  keV; eventos totais.

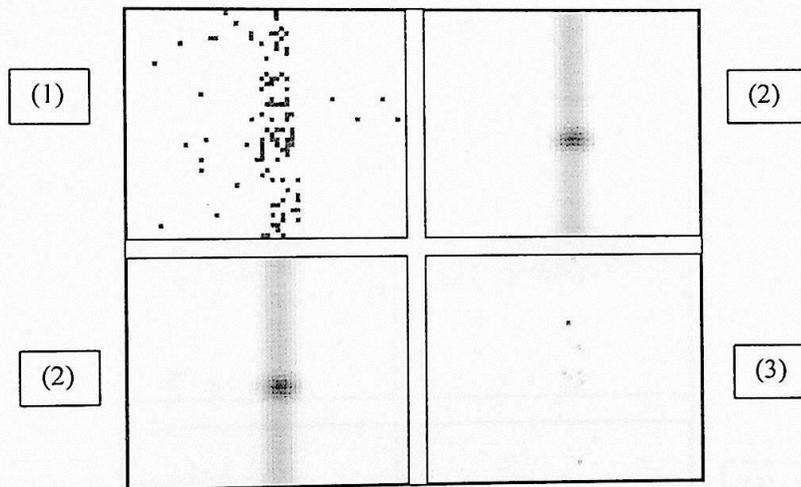


Figura 14b: Fotopico ajustado no programa Bidim;  $511_{\#4} - 511 + 628_{\#7}$  keV; eventos acidentais

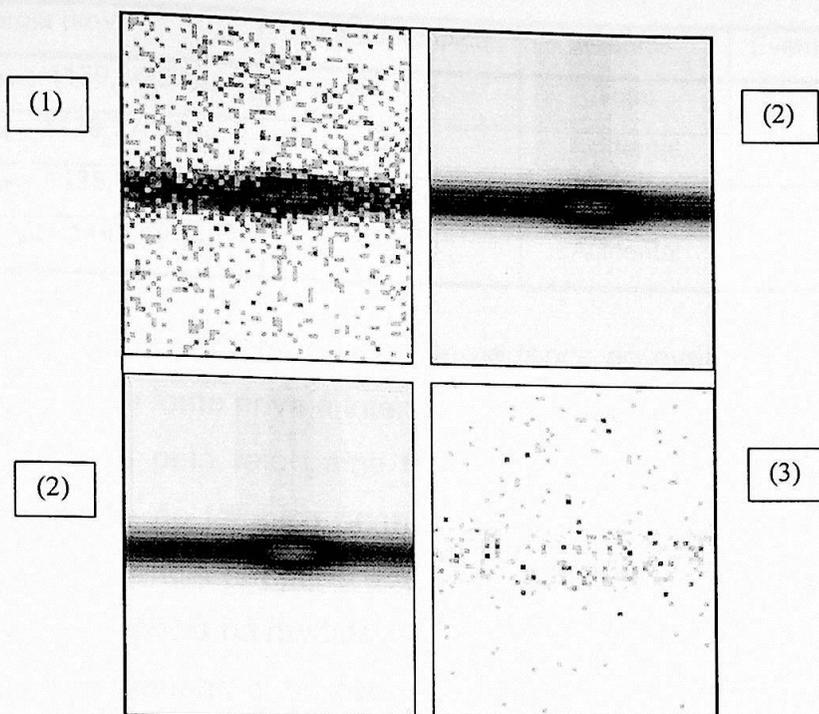


Figura 14c: Fotopico ajustado no programa Bidim;  $511_{\#7} - 511 + 628_{\#4}$  keV, eventos totais.

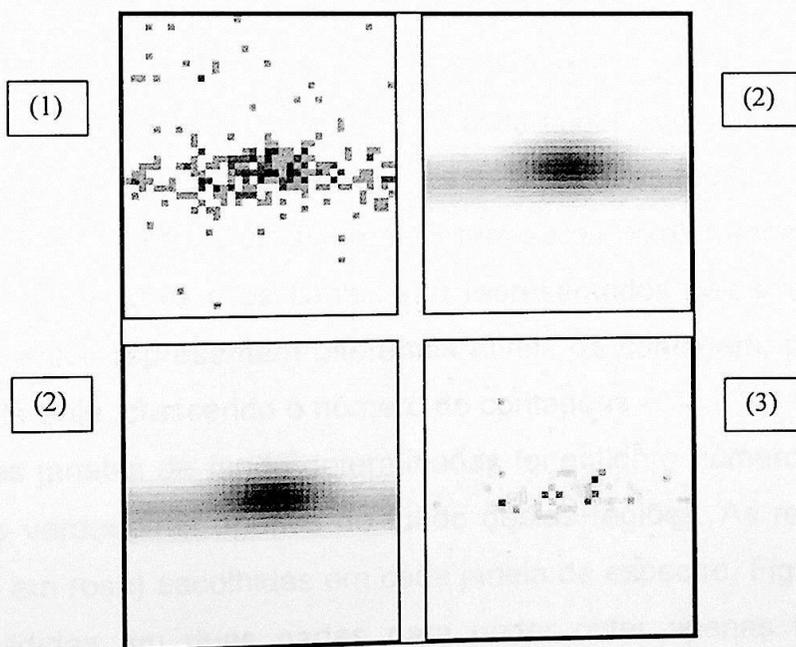


Figura 14d: Fotopico ajustado no programa Bidim;  $511_{\#7} - 511 + 628_{\#4}$  keV, eventos acidentais.

Tabela 34: Resultado dos ajustes dos fotopicos das janelas mostradas nas figuras 14a, 14b, 14c, e 14d.

Energia (keV)	Área do fotopico	Eventos	Eventos verdadeiros
511,44(9) <sub>#4</sub> – 1139,34(26) <sub>#7</sub>	597(47)	Total	584(47)
511,5(5) <sub>#4</sub> – 1139,77(37) <sub>#7</sub>	13(5)	Acidental	
511,54(7) <sub>#7</sub> – 1138,71(19) <sub>#4</sub>	1091(58)	Total	972(60)
511,17(18) <sub>#7</sub> – 1140,1(4) <sub>#4</sub>	119(17)	Acidental	

Verificou-se que o fotopico existente pertence ao evento 511 – 1139 keV; a atividade do  $^{102}\text{Rh}^f$  na fonte nova é intensa e a sua desexcitação através do estado de 1103 keV do Ru pelo raio gama 628 keV também é intensa, Figura 1a; a posição da centróide do fotopico permite concluir que este pico é do evento de detecção em coincidência temporal dos raios gama 511 – 511 + 628 keV, sendo portanto uma interferência na medida.

Para se determinar o número de eventos verdadeiros da coincidência procurada, 511 – 511 + 631 keV, é necessário ter as dimensões da região de interesse e o número de eventos verdadeiros dentro desta região.

Pelos esquemas de decaimento do  $^{102}\text{Rh}^m$  e do  $^{102}\text{Rh}^f$ , os únicos fotopicos possíveis de coincidência verdadeira existentes na região (tabela 33) são 511 – 511 + 631 keV e 511 – 511 + 628 keV. Foi tomada para este cálculo uma área de 34x34 canais<sup>2</sup> (cerca de 22x22 keV<sup>2</sup>). Determinou-se posteriormente áreas contendo apenas fundo; as Figuras 15a e 15b ilustram as regiões escolhidas para obter as janelas de fundo. Nas figuras 15 tem-se os eixos fornecendo a energia depositada nos detetores e os canais são representados pelos retângulos, onde as cores diferentes representam diferentes níveis de contagem, partindo do azul escuro até o laranja, crescendo o número de contagens.

Com as janelas de fundo determinadas foi obtido o número de eventos de coincidências verdadeiras apenas do fundo destas regiões. As regiões de fundo (circundadas em rosa) escolhidas em cada janela de espectro, Figuras 15a e 15b, foram subdivididas em duas partes para poder obter apenas fundo, evitando eventos de fotopicos nas vizinhanças, tabela 35.

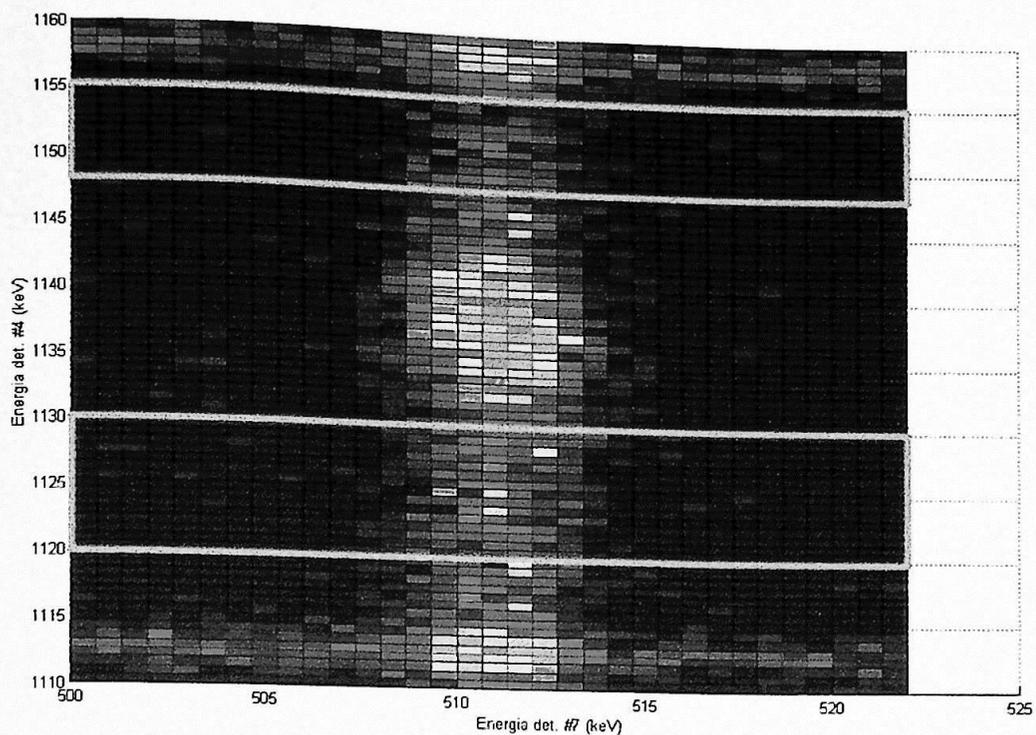


Figura 15a: janelas cercadas em rosa para o cálculo do fundo

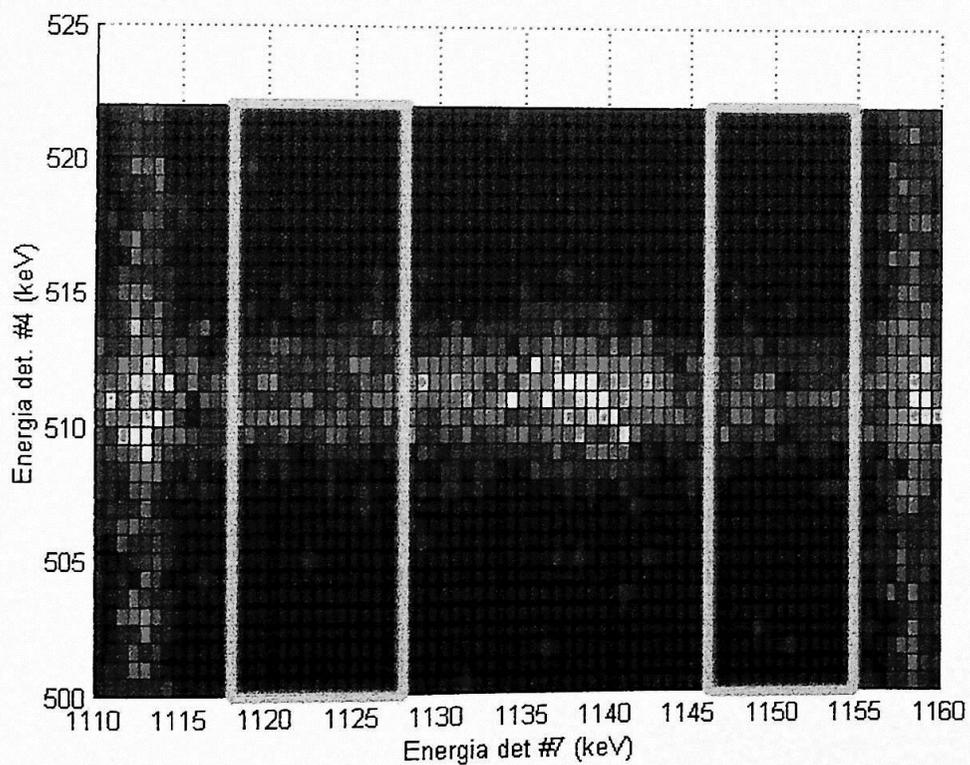


Figura 15b: janelas cercadas em rosa para o cálculo do fundo.

Tabela 35: Número total de eventos em cada janela, Figuras 13, e nas janelas de fundo Figuras 15a e 15b do espectro i1.f47.

Janelas em Energia (keV)	Totais	Acidentais	Verdadeiros		Área (canais) <sup>2</sup>
500 a 522 <sub>#4</sub> – 1131 a 1153 <sub>#7</sub>	1917	153	1764(45)		1156
500 a 522 <sub>#7</sub> – 1131 a 1153 <sub>#4</sub>	2802	75	2727(54)		1156
Fundo, janela em energia (keV)	Totais	Acidentais	Verdadeiros		-
500 a 522 <sub>#7</sub> – 1120 a 1130 <sub>#4</sub>	917(30)	27(5)	890(31)	1406(37)	935
500 a 522 <sub>#7</sub> – 1148 a 1155 <sub>#4</sub>	539(23)	23(5)	516(24)		
500 a 522 <sub>#4</sub> – 1118 a 1128 <sub>#7</sub>	676(26)	44(7)	632(27)	1083(33)	1037
500 a 522 <sub>#4</sub> – 1146 a 1155 <sub>#7</sub>	490(22)	39(6)	451(23)		

Busca-se somente os eventos verdadeiros do 511 – 511 + 631 keV e as contagens obtidas dos eventos verdadeiros nas regiões de interesse englobam os eventos 511 – 511 + 628 keV mais 511 – 511 + 631 keV e o fundo.

Subtraindo-se os eventos ajustados para a interferência 511 – 511 + 628 keV (tabela 34) dos dados da tabela 35 obtém-se a quantidade de eventos do sinal (511 – 511 + 631 keV) mais o fundo. Em termos de contagens/canal<sup>2</sup> temos:

Tabela 36: Valor médio de contagens de eventos verdadeiros das regiões de interesse por unidade de área e valor médio do fundo por unidade de área.

Energia (keV)	Valor médio de eventos por canal <sup>2</sup>	
	Eventos (sinal + fundo)	Fundo
511 <sub>#4</sub> – 511 + 631 <sub>#7</sub>	1,02(6)	1,04(3)
511 <sub>#7</sub> – 511 + 631 <sub>#4</sub>	1,52(7)	1,50(4)

O evento procurado está numa faixa de canais com a largura tomada para o cálculo das densidades em eventos/canal<sup>2</sup>, abrangendo o local do efeito de soma, 511 – 511 + 631 keV. Essa faixa tem de 34<sub>#4</sub>x9<sub>#7</sub> ≈ 306 canais<sup>2</sup>.

Na figura 16a mostra-se o fotopico 511 – 511 keV em coincidências verdadeiras. Este é um exemplo da área ocupada pelo pico soma procurado. A área total considerada para o cálculo está melhor visualizada na Figura 16b.

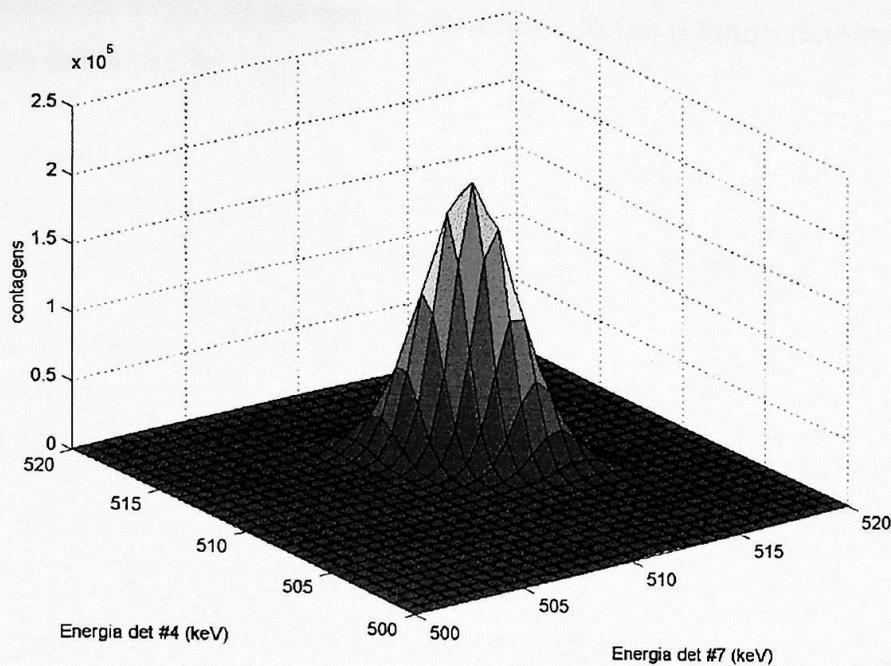


Figura 16a: Região do fotopico 511 – 511 keV, os eixos horizontais estão em unidades de energia.

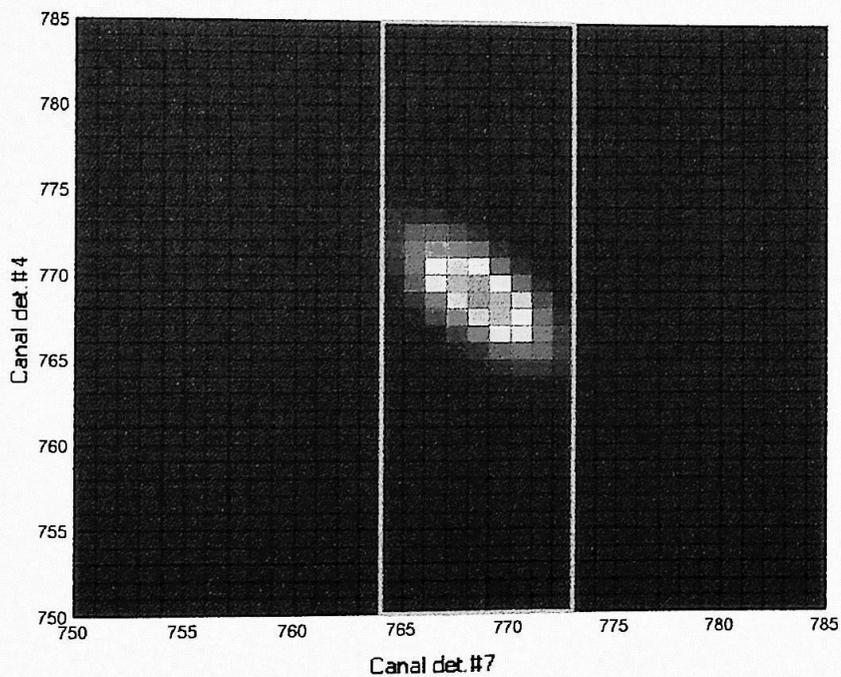


Figura 16b: Região do fotopico 511 – 511 keV, a sub-região circundada em rosa é o tamanho da área estimada do fotopico para os cálculos. Curvas de nível da figura 16a.

Expressando-se então as contagens de sinal + fundo e fundo determina-se o sinal médio para cada região:

Tabela 37: Os eventos em coincidências verdadeiras são o fundo em coincidência verdadeira mais os sinais dos eventos procurados, 511 – 511 + 631 keV.

Energia (keV)	Região (306canaís <sup>2</sup> )	Sinal + Fundo	Fundo	Sinal
511 <sub>#4</sub> – 511 + 631 <sub>#7</sub>	1	312(18)	320(10)	-8(20)
511 <sub>#7</sub> – 511 + 631 <sub>#4</sub>	2	464(21)	460(12)	4(24)

A obtenção de um sinal negativo ou consistente com zero significa que só se poderá estabelecer um limite superior para esse decaimento. Isso será feito seguindo-se o procedimento descrito no Apêndice C.

Os limites máximos dos sinais procurados, com nível de confiança de 95,5%, nas regiões 1 e 2 são respectivamente de 36 e 52 contagens.

A partir destes valores e dos dados da tabela 38, produz-se limites para a intensidade do decaimento procurado.

Tabela 38: Dados da fonte de <sup>102</sup>Rh para o primeiro grupo de medidas.

Atividade do metaestável (kBq)	138,1(6)
Tempo vivo (s)	439317
Eficiência (Região 1)	2,0(4) x 10 <sup>-7</sup>
Eficiência (Região 2)	3,0(5) x 10 <sup>-7</sup>

Assim determina-se um limite máximo para a intensidade do decaimento  $\beta^+$  ( $I_{\max}$ ) para cada região, 1 e 2; os respectivos valores são  $3,0 \times 10^{-3}$  e  $3,0 \times 10^{-3}$  [Apêndice C].

### 3.3 - Segundo Grupo de Medidas – tratamento da eficiência

Um novo arranjo geométrico foi montado, Figura 6b, para se obter a máxima eficiência na aquisição com a Fonte Velha. Com fontes calibradas, tabela 39, foram feitas aquisições neste novo arranjo.

Tabela 39: Espectros de calibração para a determinação das eficiências dos detetores.

Fonte	Detetor Eurisys	Detetor Phenix	Atividade (kBq)
$^{152}\text{Eu}$	Vpreu.chn	Vvereu.chn	16,7(2)
$^{22}\text{Na}$	Nasum000.fil até nasum123.fil		2,16(4)

As áreas dos fotopicos dos espectros de calibração de espectroscopia simples foram calculadas pelo programa IDF\_Win [5]. Através da equação 2.3 as eficiências foram determinadas para ambos os detetores e com isto foi ajustada a curva de eficiência para cada detetor, equação 2.1.

Tabela 40: Dados do espectro vvereu.chn para o ajuste da curva de eficiência para o detetor Phenix, fotopicos do  $^{152}\text{Eu}$ .

Energia (keV)	Intensidade do gama	Área do fotopico	Eficiência
244,7	0,0753(4)	171179(624)	0,0758(10)
344,3	0,2657(11)	530370(769)	0,0666(8)
411,13	0,02238(10)	29902(254)	0,0446(7)
443,96	0,03125(14)	439559(271)	0,0469(7)
778,9	0,1297(6)	116932(537)	0,0301(4)
867,39	0,04214(25)	29799(328)	0,0235(4)
964,05	0,1463(6)	120214(406)	0,0274(4)
1085,84	0,1013(5)	93713(337)	0,0309(4)
1089,77	0,01731(9)	11961(152)	0,0230(4)
1112,09	0,1354(6)	106195(409)	0,0262(3)
1212,97	0,01412(8)	7520(172)	0,0178(5)
1299,15	0,01626(11)	9648(130)	0,0198(4)
1408,02	0,2085(9)	131028(367)	0,0210(3)

Tabela 41: Dados do espectro vpreu.chn para o ajuste da curva de eficiência para o detetor Eurysis.

Energia (keV)	Área do fotopico	Eficiência
244,7	172828(511)	0,0766(10)
344,3	804295(1031)	0,1009(13)
411,13	42960(483)	0,0640(11)
443,96	45532(472)	0,0486(8)
778,9	170507(6000)	0,0438(16)
867,39	27403(2828)	0,0217(23)
964,05	124462(4500)	0,0284(11)
1085,84	117082(1500)	0,0386(7)
1089,77	17334(244)	0,0334(6)
1112,09	108957(520)	0,027(4)
1212,97	6582(638)	0,0155(15)
1299,15	13443(1000)	0,0276(21)
1408,02	125120(770)	0,02001(28)

Tabela 42: Parâmetros ajustados, equação 2.1, das curvas de eficiência de cada detetor.

Parâmetros	Detetor EurisyS	Detetor Phenix
$p(1)$	$7,7(25) \times 10^{-2}$	$4,1(18) \times 10^{-2}$
$p(2)$	$-9,2(27) \times 10^{-1}$	$-4,8(36) \times 10^{-1}$
$p(3)$	$2(21) \times 10^3$	$1,8(13) \times 10^{-1}$
$p(4)$	$-3,1(37) \times 10^1$	$-6(3)$

Assim foram determinadas as eficiências dos raios gama de interesse.

Para a determinação da eficiência de detecção da coincidência temporal do evento soma 511 – 1274 + 511 (keV) no segundo grupo de medidas o espectro nasum.47 foi relocado, no programa Bidim, tendo agora um novo ganho em energia:

$$E = 0,625000 \times c - 1,00 \quad (3.7)$$

$E$  ⇒ energia  
 $c$  ⇒ canal

Devido à geometria próxima utilizada neste arranjo, o efeito de soma é mais provável e a estatística obtida nos fotopicos 511-511+1274 keV do  $^{22}\text{Na}$  é mais elevada. Isso veio evidenciar a calha diagonal sob o pico, associada ao efeito Doppler dos fótons de aniquilação, Figura 17 [apêndice D].

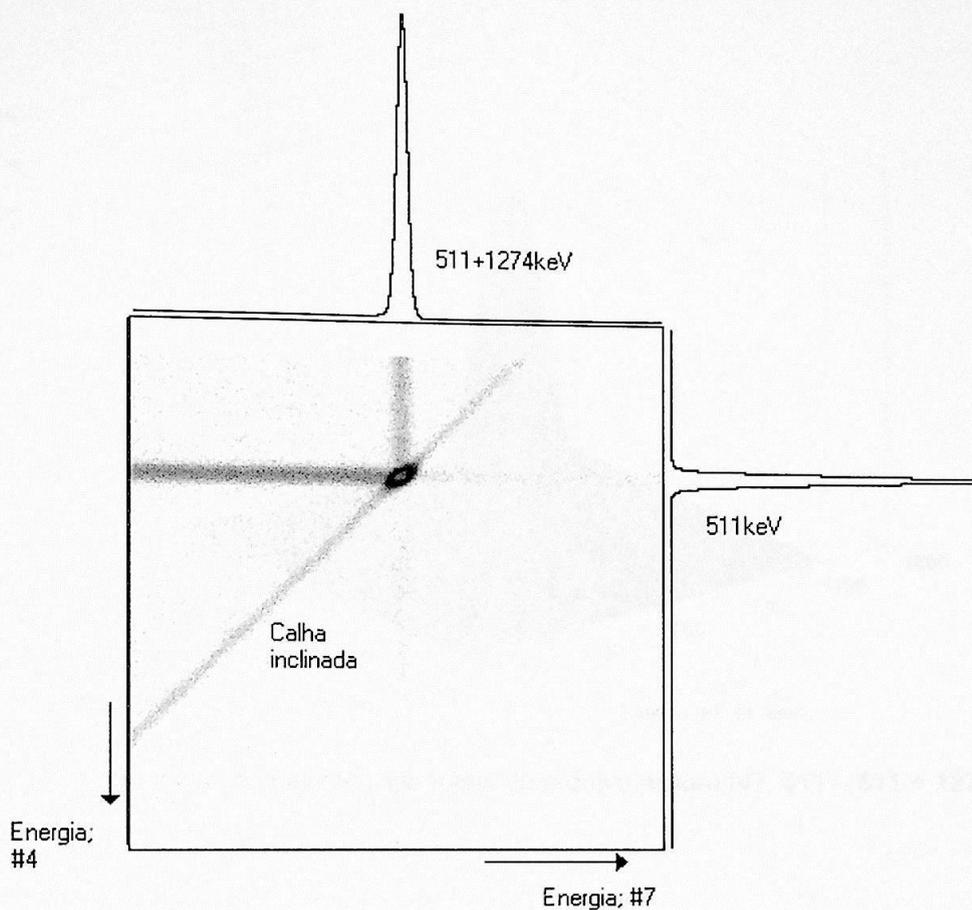


Figura 17: Janela de uma região de interesse do espectro nasum.f47; figura extraída do programa BIDIM [ 8 ].

Analisou-se o espectro de tempo do arquivo nasum.f47, e, com o programa Opening, determinou-se as janelas de tempo para duas situações distintas, eventos totais e acidentais.

Tabela 43: Janelas de tempo de coincidências para o arquivo nasum.f47

Janela total (ns)	440 a 475
Janela acidental (ns)	500 a 535

Com as janelas de tempo de coincidências determinadas, analisou-se o arquivo nasum.f47 e foi montado o espectro de eventos de coincidências totais, acidentais e verdadeiras (totais menos acidentais) para as duas janelas de interesse, Figuras 18.

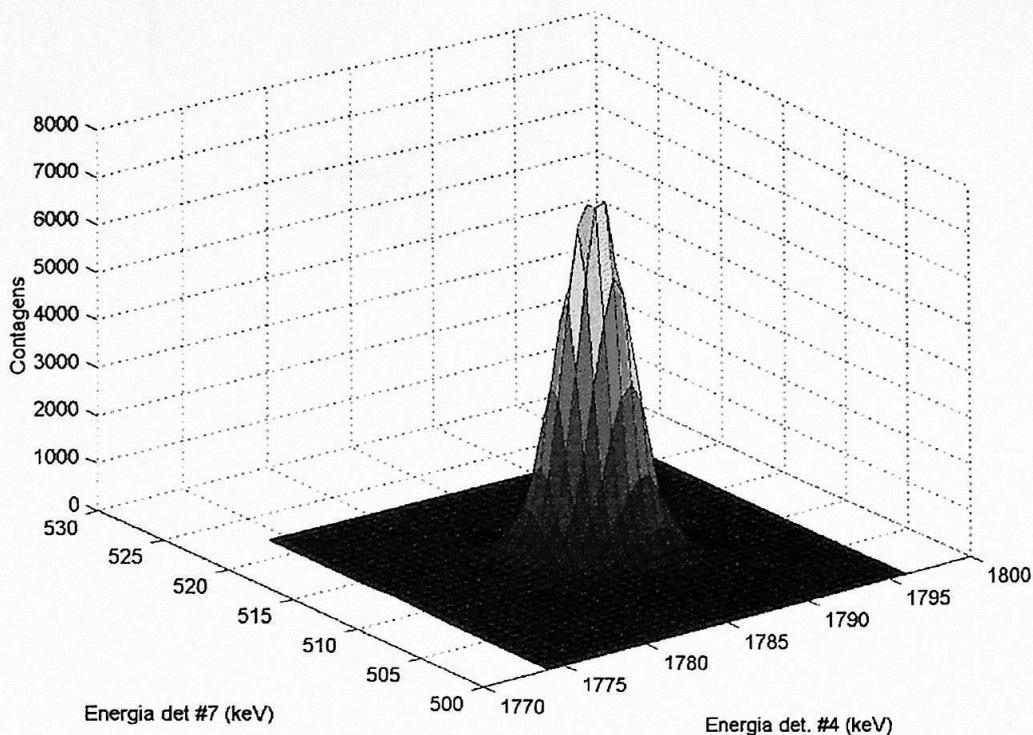


Figura 18a: Eventos de coincidências totais do arquivo nasum.f47; 511 – 511 + 1274 keV.

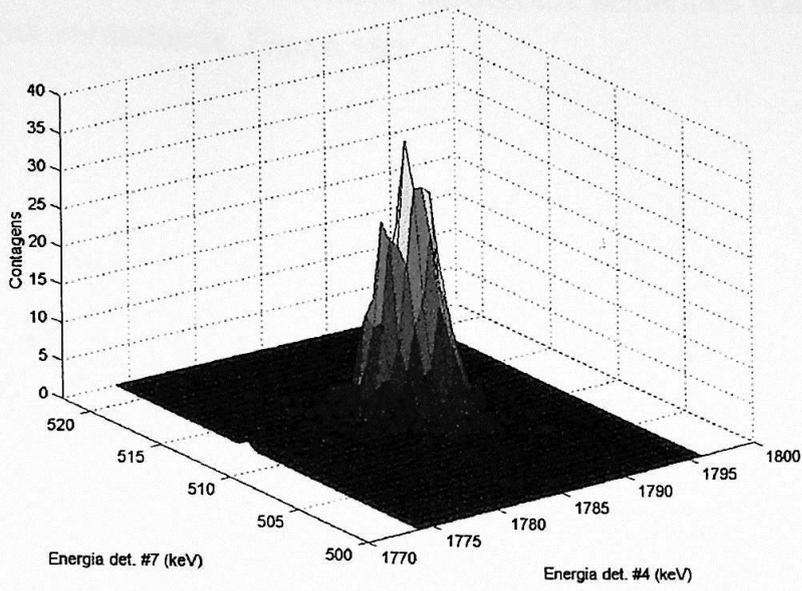


Figura 18b: Eventos de coincidências acidentais.

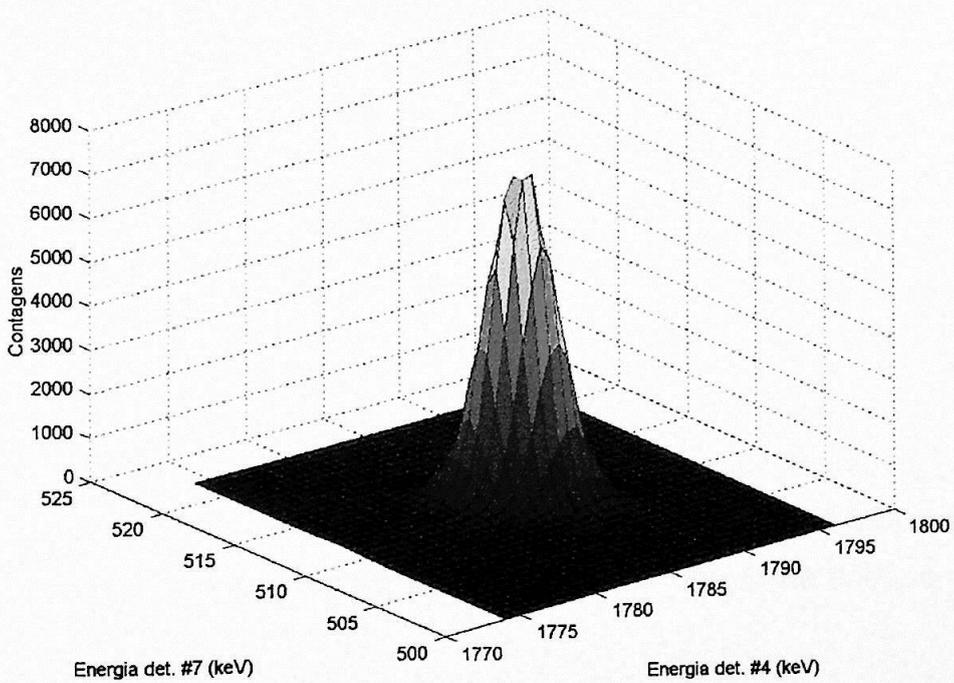


Figura 18c: Eventos de coincidências verdadeiras do fotopico 511 – 511 + 1274 keV

Repetindo a mesma análise para a outra janela ( $511_{\#4} - 511 + 1274_{\#7}$  keV); subtraiu-se da janela de eventos totais os eventos acidentais ficando-se apenas com os eventos verdadeiros, Figura 18d.

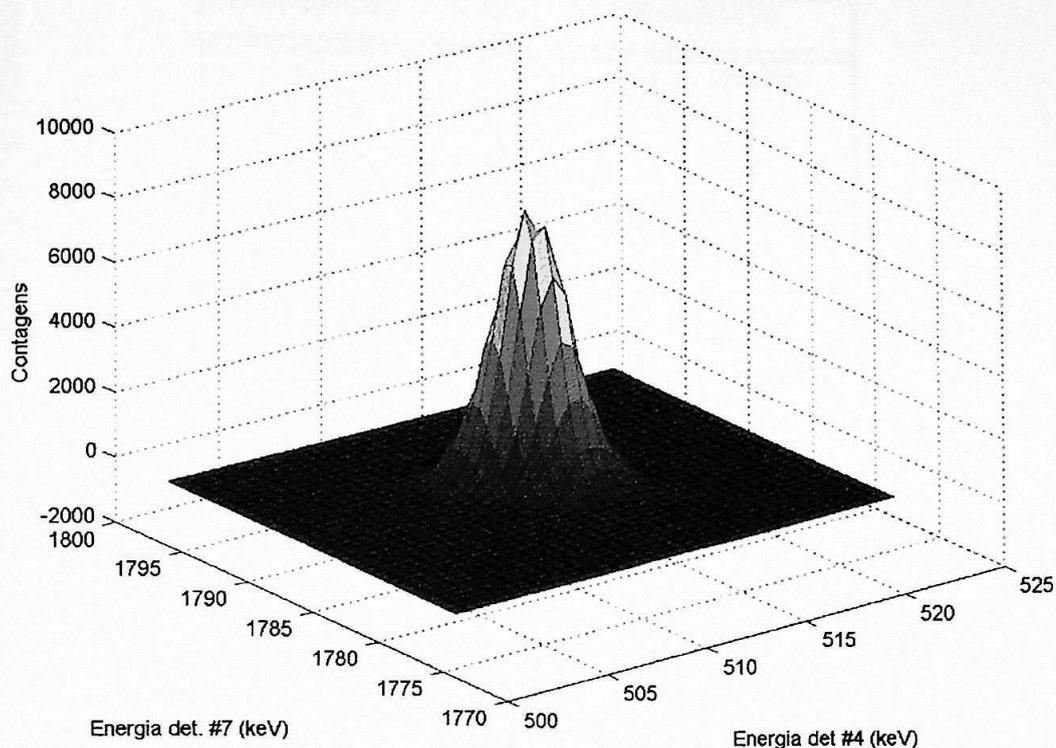


Figura 18d: Eventos de coincidências verdadeiras do fotopico 511 – 511 + 1274 keV; arquivo nasum.f47

Determinou-se assim o número de eventos de coincidências verdadeiras dos fotopicos do evento 511 – 511 + 1274 keV [apêndice D] do arquivo nasum.f47 para as duas janelas de interesse (Figuras 18c e 18d), calculando-se em seguida a eficiência de detecção para o evento nas duas janelas de energia, tabelas 44 e 45.

Tabela 44: Tempo vivo da aquisição com a fonte de  $^{22}\text{Na}$  e sua atividade, áreas dos eventos verdadeiros, 511 – 511 + 1274 keV e as eficiências de detecções em espectroscopia simples dos raios gama de interesse.

Tempo vivo (s)	Atividade (kBq)
86400	2,16(4)
Intensidade do 1274 (keV)	99,944(14)%
Energia (keV)	Área do fotopico
511 <sub>#4</sub> – 511 + 1274 <sub>#7</sub>	93783(306)
511 <sub>#7</sub> – 511 + 1274 <sub>#4</sub>	77167(278)
Energia (keV)	Eficiência
631 <sub>#4</sub>	$3,44(25) \times 10^{-2}$
631 <sub>#7</sub>	$4,3(7) \times 10^{-2}$
1274 <sub>#4</sub>	$2,21(14) \times 10^{-2}$
1274 <sub>#7</sub>	$2,40(15) \times 10^{-2}$

De acordo com a equação 3.5, similarmente às contas feitas para o primeiro grupo, calculou-se as eficiências de detecção dos eventos em coincidência temporal de interesse: 511 – 511 + 631 keV.

Tabela 45: Valores das eficiências de detecção de coincidência temporal para os eventos de interesse:

Energia (keV)	Eficiência
511 <sub>#4</sub> – 511 + 1274 <sub>#7</sub>	$5,02(9) \times 10^{-4}$
511 <sub>#7</sub> – 511 + 1274 <sub>#4</sub>	$4,13(8) \times 10^{-4}$
511 <sub>#4</sub> – 511 + 631 <sub>#7</sub>	$9,1(15) \times 10^{-4}$
511 <sub>#7</sub> – 511 + 631 <sub>#4</sub>	$6,4(6) \times 10^{-4}$

### 3.4 Segundo grupo de medidas – redução de dados

Com o auxílio do programa Opening foi analisado o arquivo s2.f47 e montado o espectro de tempo, Figura 19, para posterior determinação dos espectros de energia dos eventos de coincidências totais e acidentais.

As janelas determinadas do espectro de tempo dos eventos coincidentes totais e acidentais encontram-se na tabela 46.

Tabela 46: Janelas do espectro de tempo do arquivo s2.f47 para posterior análise e distinção dos espectros de energia totais e acidentais (1canal = 1 ns)

Janela total (ns)	432 a 487
Janela acidental (ns)	632 a 687

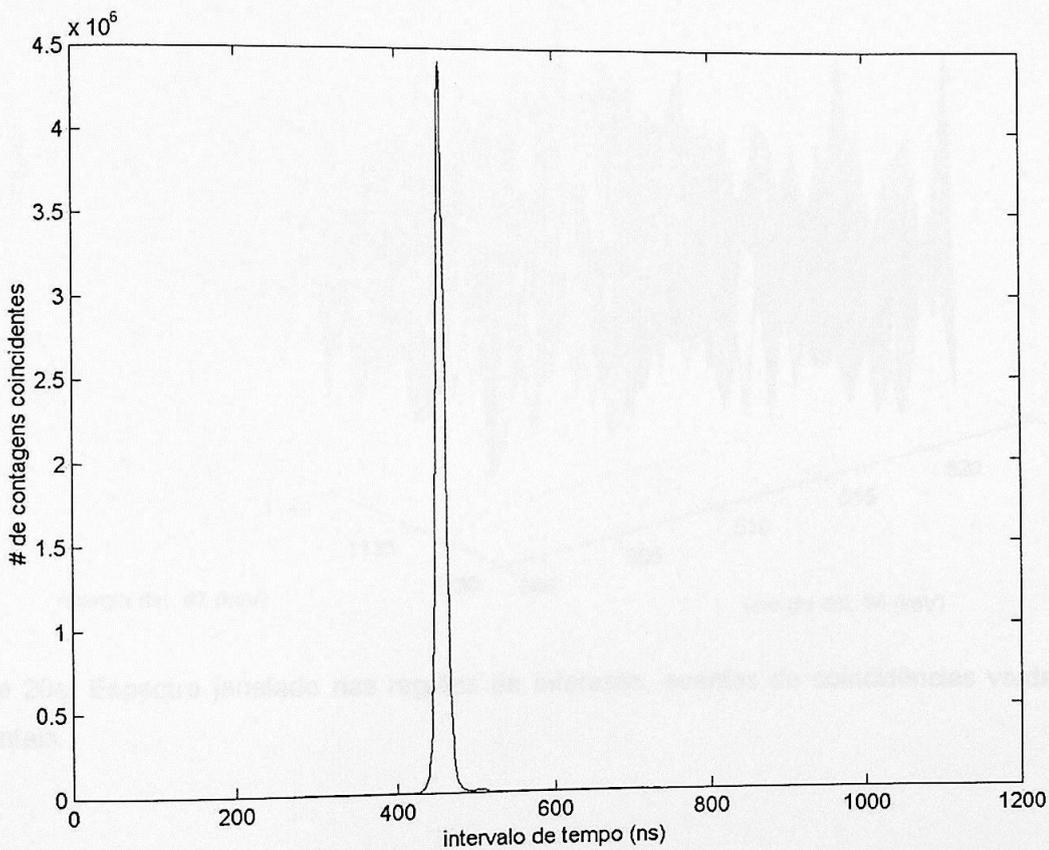


Figura 19: Espectro de tempo do arquivo s2.f47

Com as janelas de tempo determinadas montou-se, da mesma forma que para o primeiro grupo, os histogramas de energia dos eventos totais e acidentais para o segundo grupo, mostrados nas Figuras 20. As regiões de interesse usadas encontram-se na tabela 33. Observa-se, nas regiões de interesse, um fundo 'limpo': não há vestígio de calhas nem de qualquer pico.

Os espectros foram relocados tendo um ganho em energia dado pela equação 3.6.

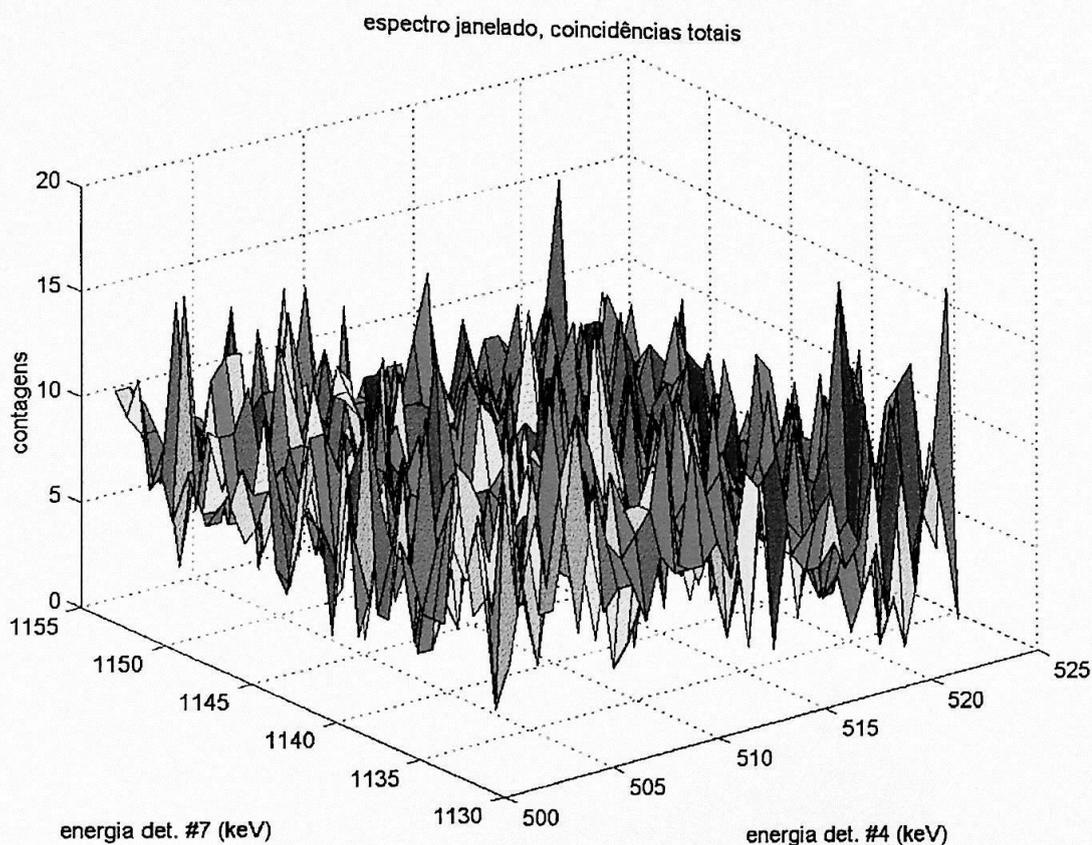


Figura 20a: Espectro janelado nas regiões de interesse, eventos de coincidências verdadeiras e acidentais.

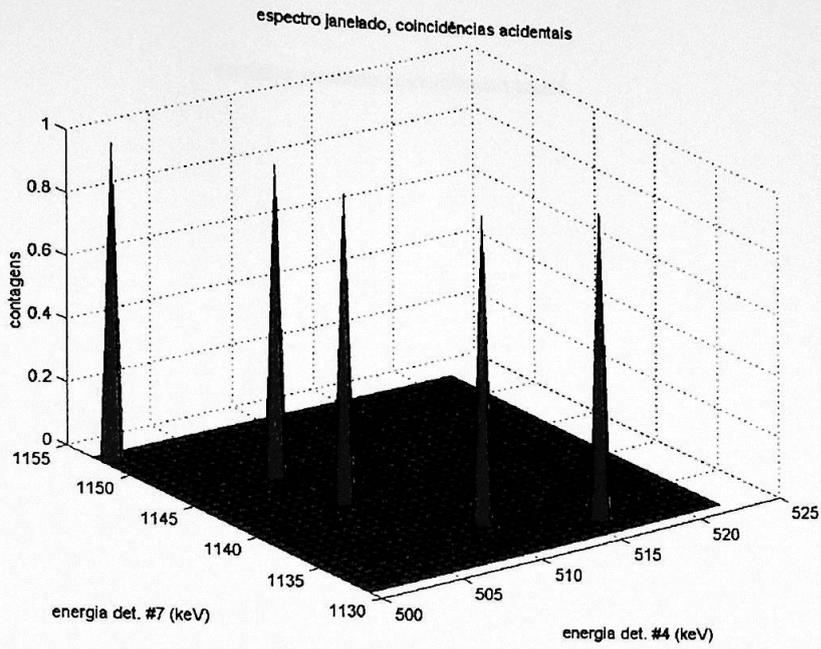


Figura 20b: Espectro janelado nas regiões de interesse, eventos de coincidências acidentais.

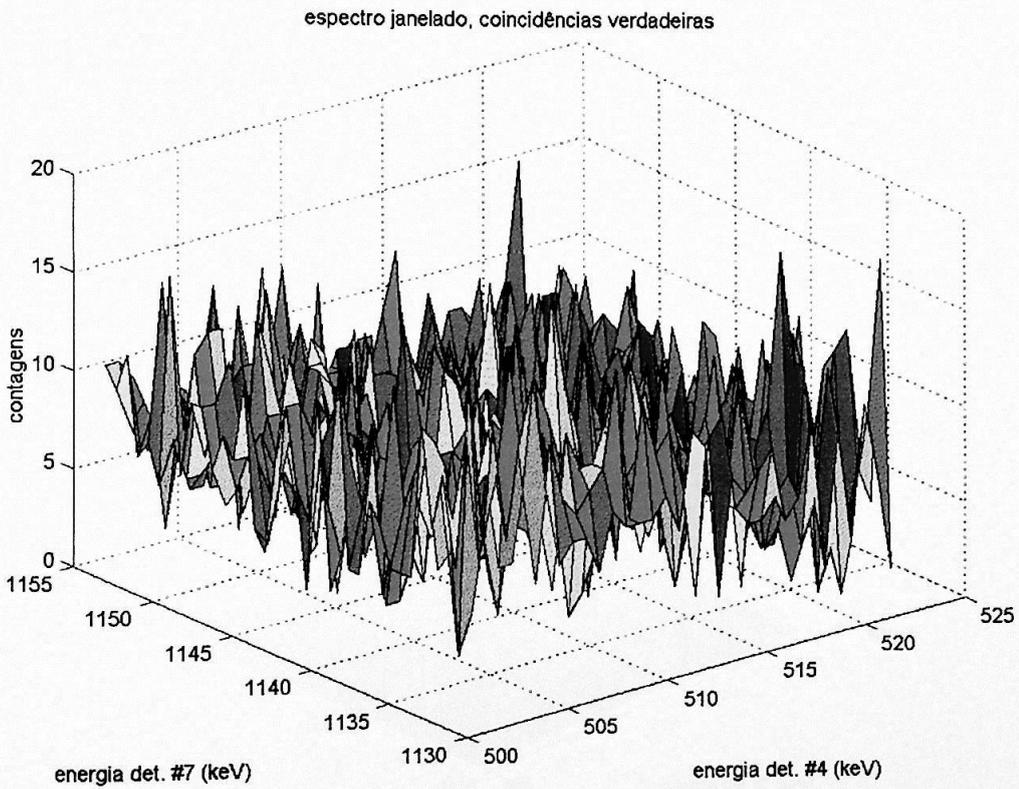


Figura 20c: Espectro janelado nas regiões de interesse, eventos de coincidências verdadeiras.

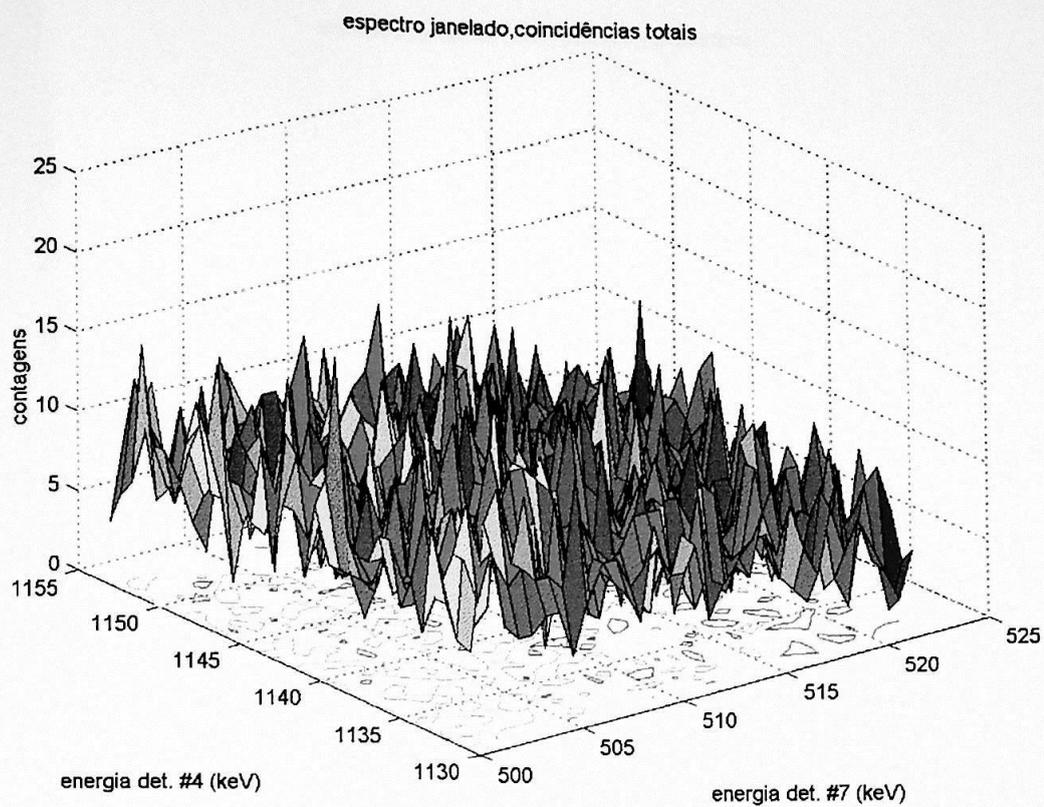


Figura 20d: Espectro janelado nas regiões de interesse, eventos de coincidências verdadeiras e acidentais.

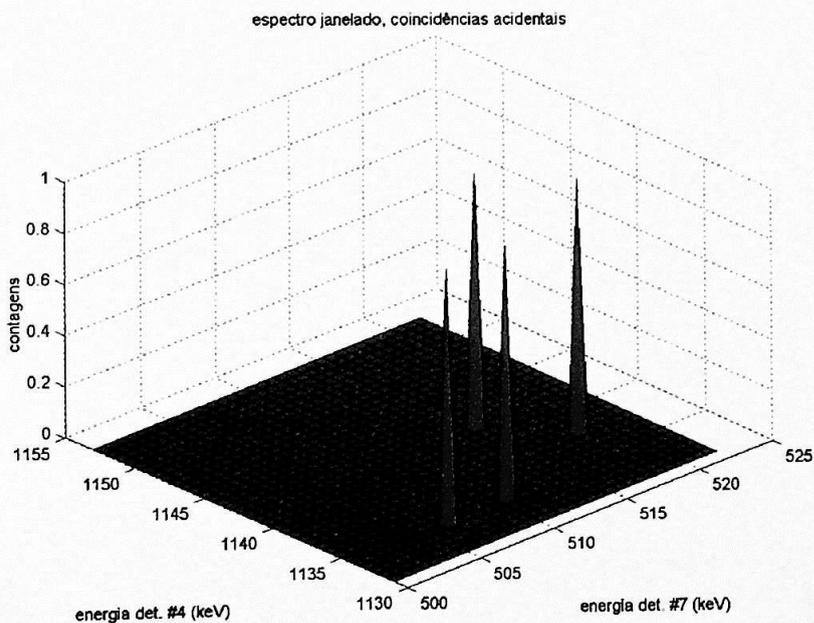


Figura 20e: Espectro janelado nas regiões de interesse, eventos de coincidências acidentais.

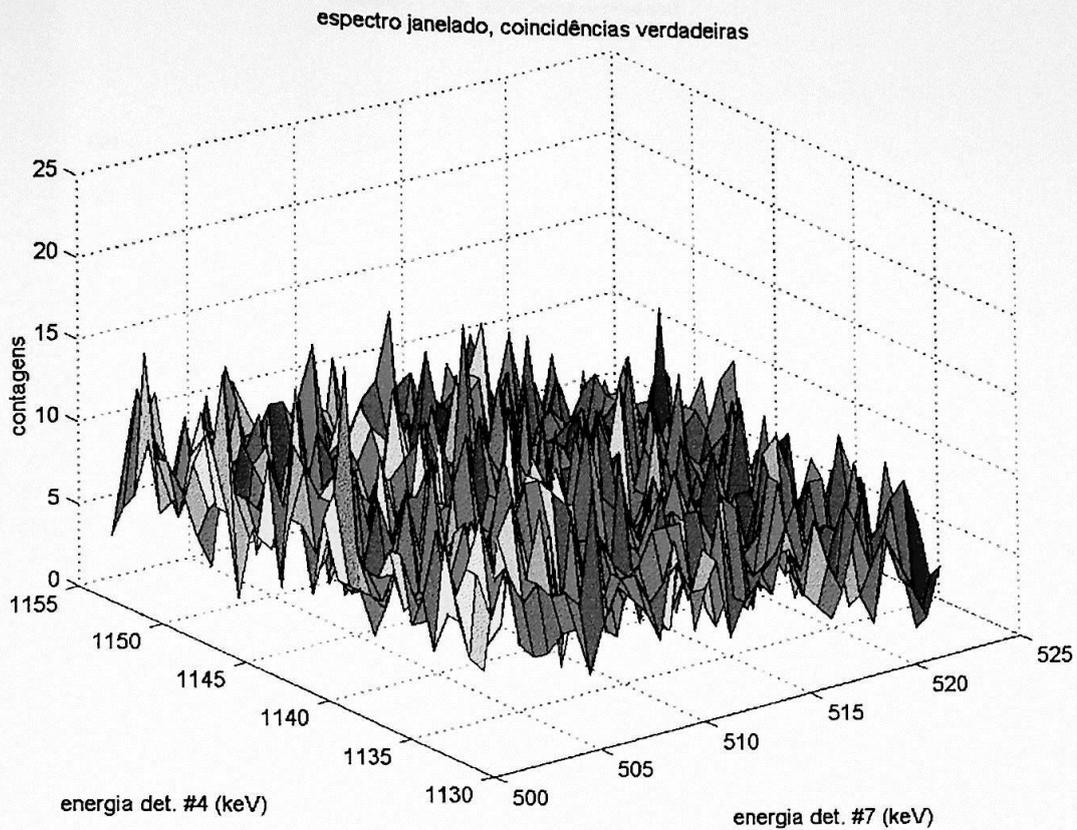


Figura 20f: Espectro janelado nas regiões de interesse, eventos de coincidências verdadeiras.

O evento procurado está dentro de uma sub-região que tem o tamanho da área da base do fotopico 511 – 511 keV.

A Figura 21a mostra o fotopico 511 – 511 keV dos eventos em coincidências verdadeiras e a área total ocupada por ele pode ser melhor visualizada na Figura 21b, pelas curvas de nível da Figura 21a .

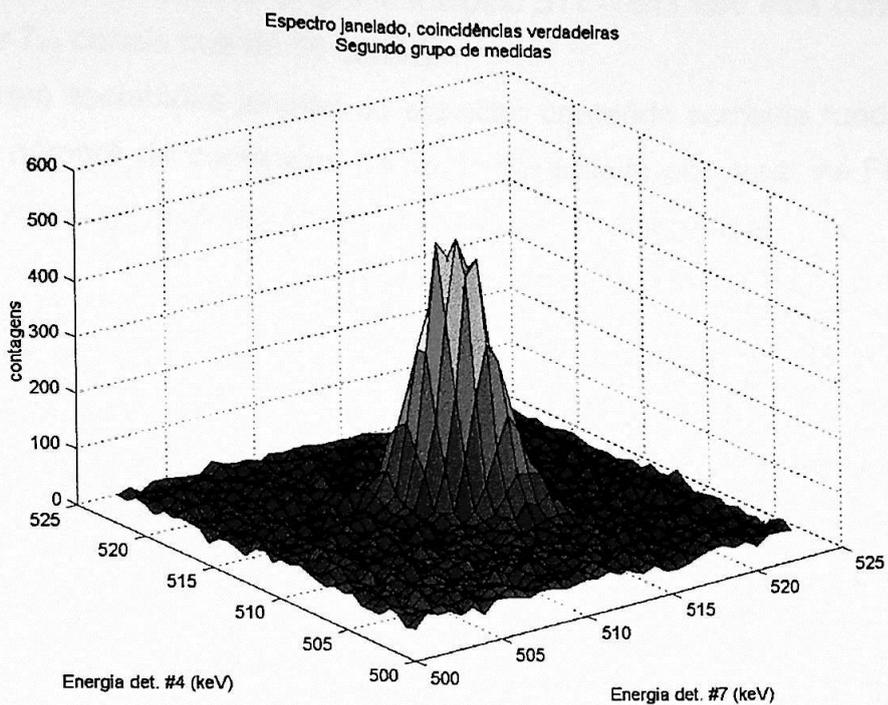


Figura 21a: Região do fotopico 511 – 511 keV

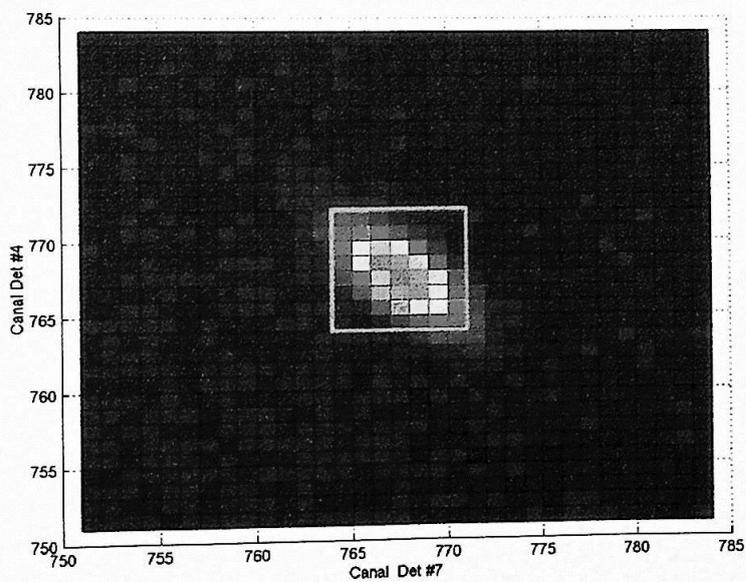


Figura 21b: Sub-região circundada em rosa que engloba a área ocupada pelo fotopico 511 – 511 keV.

O tamanho da área na qual o fotopico 511 – 511 keV está contido é de  $8_{\#4}$  canais por  $7_{\#7}$  canais que dá  $56$  canais<sup>2</sup>.

Foram escolhidas janelas do espectro contendo somente fundo para obter apenas o número de contagens de fundo verdadeiro por área. As Figuras 22a e 22b mostram para cada região as janelas de fundo escolhidas.

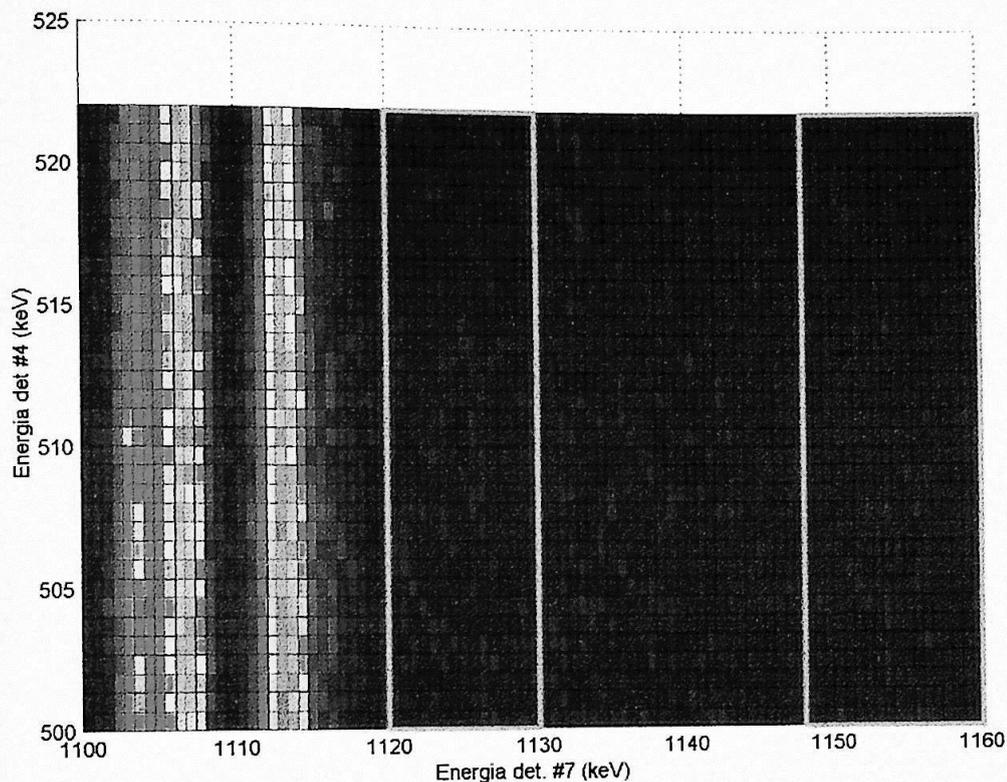


Figura 22a: As janelas escolhidas para o fundo estão circundadas em rosa .

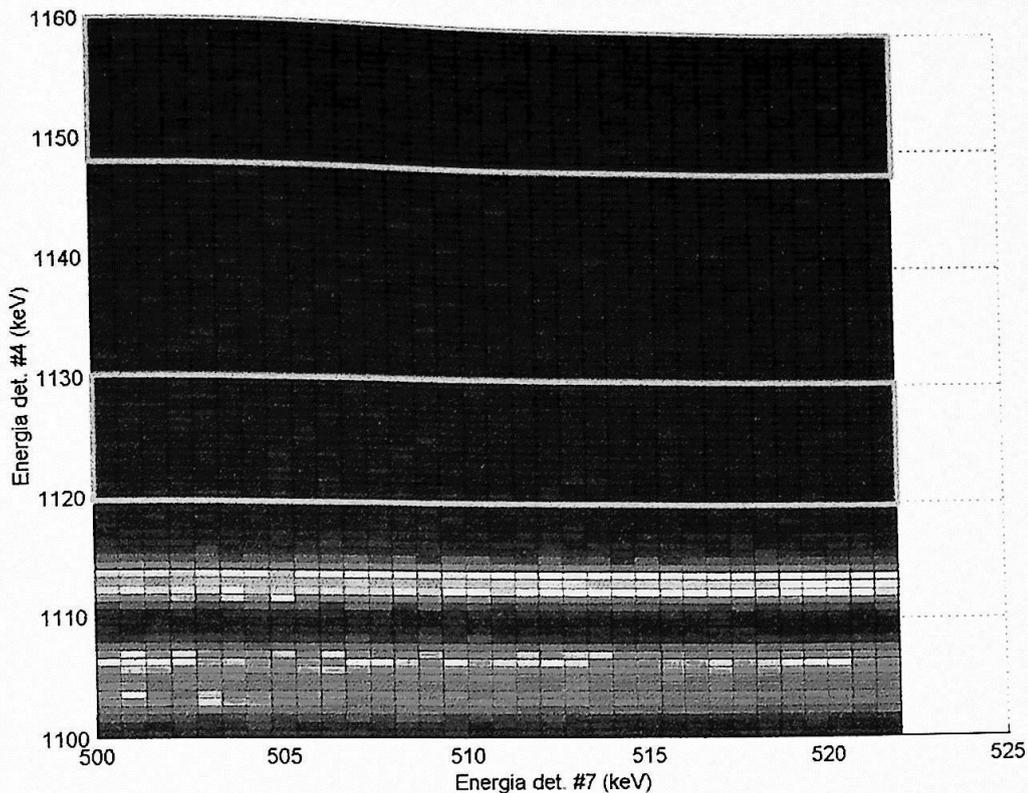


Figura 22b: As janelas escolhidas para o fundo estão circundadas em rosa .

Com o número de eventos em coincidências verdadeiras obtidos em cada região de interesse e conhecendo o número de eventos de coincidências verdadeiras somente de fundo em cada região determinou-se quantos eventos verdadeiros do sinal procurado  $511 - 511 + 631$  keV existem, tabelas 47 a 49.

Tabela 47: Número total de eventos em cada janela, Figuras 20, e nas janelas de fundo 22a e 22b do espectro s2.f47.

Janelas em Energia (keV)	Totais	Acidentais	Verdadeiros		Área (canais) <sup>2</sup>
500 a 522 <sub>#4</sub> – 1131 a 1153 <sub>#7</sub>	9322(97)	5(2)	9317(97)		1156
500 a 522 <sub>#7</sub> – 1131 a 1153 <sub>#4</sub>	8866(94)	4(2)	8862(94)		1156
Fundo, janela em energia (keV)	Totais	Acidentais	Verdadeiros		-
500 a 522 <sub>#4</sub> – 1123 a 1133 <sub>#7</sub>	4882(69)	3(1)	4879(69)	9813 (98)	1190
500 a 522 <sub>#4</sub> – 1148 a 1160 <sub>#7</sub>	4936(70)	2(1)	4934(70)		
500 a 522 <sub>#7</sub> – 1123 a 1133 <sub>#4</sub>	4544(67)	1(1)	4543(67)	9126(95)	1190
500 a 522 <sub>#7</sub> – 1148 a 1160 <sub>#4</sub>	4583(68)	-	4583(68)		

Tabela 48: Valor médio de contagens de eventos verdadeiros das regiões de interesse por unidade de área e valor médio do fundo por unidade de área

Energia (keV)	Valor médio de eventos por canal <sup>2</sup>	
	Verdadeiros (sinal + fundo)	Fundo
511 <sub>#4</sub> – 511 + 631 <sub>#7</sub>	8,06(8)	8,25(8)
511 <sub>#7</sub> – 511 + 631 <sub>#4</sub>	7,67(8)	7,67(8)

O número médio de contagens verdadeiras por canal<sup>2</sup> e o tamanho da área da base do fotopico 511 – 511 keV são conhecidos. Com isto tem-se o número de eventos verdadeiros ( $n_1$  e  $n_2$ ) e somente o fundo ( $n_1^f$  e  $n_2^f$ ) para as duas regiões de interesse, tabela 49. Assim se determina o sinal médio procurado para cada região.

Tabela 49: Os eventos em coincidências verdadeiras são o fundo em coincidência verdadeira mais os sinais dos eventos procurados, 511 – 511 + 631 keV; o sinal médio encontrado em cada região

Energia (keV)	Região (56canaís <sup>2</sup> )	Verdadeiro (sinal + fundo)	Fundo	Sinal
511 <sub>#4</sub> – 511 + 631 <sub>#7</sub>	1	451(5)	462(5)	-10(8)
511 <sub>#7</sub> – 511 + 631 <sub>#4</sub>	2	429(5)	429(4)	0(13)

Da mesma forma que na medida anterior, um limite máximo do sinal procurado, com nível de confiança de 95,5%, nas regiões 1 e 2 produz respectivamente 8,0 e 12,7 contagens [apêndice C].

Tabela 50: Dados da fonte de <sup>102</sup>Rh para o segundo grupo de medida

Atividade do metaestável (kBq)	1,627(15)
Tempo vivo (s)	707636
Eficiência ( Região 1)	$9,1(15) \times 10^{-4}$
Eficiência ( Região 2)	$6,4(6) \times 10^{-4}$

Assim determina-se um limite máximo para a intensidade do decaimento  $\beta^+$  ( $I_{max}$ ) para cada região, 1 e 2; os respectivos valores são  $7,6 \times 10^{-6}$  e  $1,6 \times 10^{-5}$ .

### 3.5 – Terceiro grupo de medidas – tratamento da eficiência

Um novo arranjo geométrico, Figura 6c, foi usado para aquisição com a Fonte Nova, sendo que não era mais necessário usar uma blindagem de chumbo como foi usado no primeiro grupo de medidas pois a radiação proveniente do isótopo  $^{101}\text{Rh}$  de meia vida 4,3 dias era quase inexistente.

Os cálculos para a determinação das eficiências de detecção dos raios gama de interesse, 631 keV e 1274 keV, e de detecção de coincidências temporais, 511 – 511 + 1274 keV, são similares aos cálculos feitos no segundo grupo de medida. Os espectros adquiridos para a determinação das eficiências deste grupo estão na tabela 51.

Tabela 51: Fontes calibradas usadas para a determinação das eficiências dos detetores.

Fonte	Detetor Eurisys	Detetor Phenix	Atividade (kBq)
$^{152}\text{Eu}$	Neupr.chn	Neuve.chn	16,65(21)
$^{137}\text{Cs}$	Ncspr.chn	Ncsve.chn	25,3(8)
$^{22}\text{Na}$	Nna000.fil até nna027.fil		2,15(4)

As áreas dos fotopicos dos espectros de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{152}\text{Eu}$  foram calculadas pelo programa IDF\_Win [5] e as eficiências calculadas através da equação 2.3. Sobre esses valores ajustou-se a curva de eficiência, equação 2.1, para cada detetor.

Tabela 52: Parâmetros adquiridos do ajuste das curvas de eficiência de cada detetor.

Parâmetros	Detetor Eurisys	Detetor Phenix
$p(1)$	$1,8(5) \times 10^{-2}$	$1,87(22) \times 10^{-2}$
$p(2)$	$5,2(23) \times 10^{-1}$	$6,2(8) \times 10^{-1}$
$p(3)$	$6,2(17) \times 10^{-2}$	$7,3(10) \times 10^{-2}$
$p(4)$	4,8(14)	6,0(9)

Com os parâmetros ajustados determinou-se as eficiências individuais dos raios gama de interesse.

Para determinar as eficiências de detecção da coincidência temporal 511 –

1274 + 511 keV do terceiro grupo de medidas, analisou-se o arquivo nna.f47, Figura 23, no qual percebe-se a existência de uma terceira calha inclinada por causa do efeito Doppler, o mesmo fenômeno que ocorreu no espectro de  $^{22}\text{Na}$  do segundo grupo de medidas.

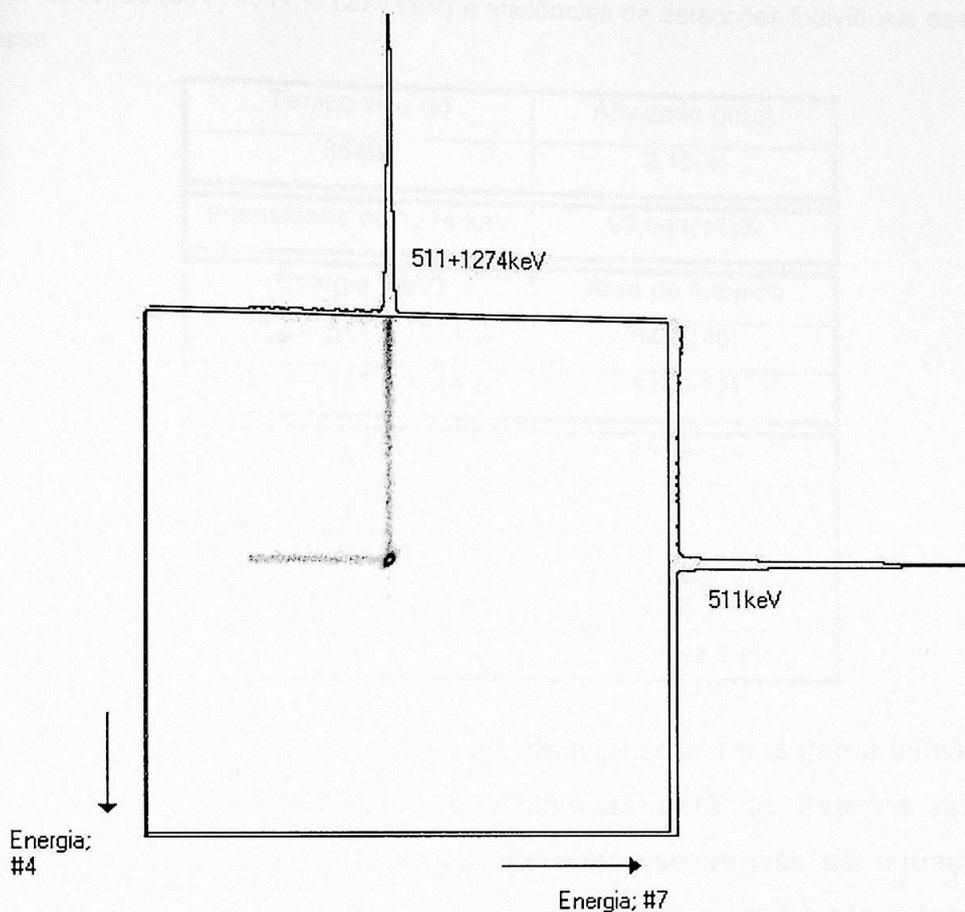


Figura 23: Janela do  $511_{\#4} - 511 + 1274 \text{ keV}_{\#7}$  do arquivo nna.f47; extraído do programa BIDIM

Para a determinação do número dos eventos de coincidências temporais totais e acidentais foi montado o espectro de tempo do arquivo nna.f47 e determinadas as janelas temporais onde ocorreram os eventos totais e acidentais. Com estas janelas conhecidas montaram-se dois espectros de energia; um de eventos coincidentes temporais totais e outro de acidentais. Com estes espectros foram obtidas as áreas dos fotopicos  $511 - 511 + 1274 \text{ keV}$  e com isto foram determinadas apenas as áreas dos eventos coincidentes temporais verdadeiros.

Tabela 53: Janelas temporais de coincidências para o arquivo nna.f47.

Janela total (ns)	442 a 475
Janela acidental (ns)	542 a 575

Tabela 54: Tempo vivo da aquisição com a fonte de  $^{22}\text{Na}$  e a sua atividade; áreas dos fotopicos dos eventos verdadeiros (511 – 511 + 1274 keV) e eficiências de detecções individuais dos raios gama de interesse.

Tempo vivo (s)	Atividade (kBq)
86400	2,15(4)
Intensidade do 1274 keV	99,944(14)%
Energia (keV)	Área do fotopico
511 <sub>#4</sub> – 511 + 1274 <sub>#7</sub>	6407(80)
511 <sub>#7</sub> – 511 + 1274 <sub>#4</sub>	5145(72)
Energia (keV)	Eficiência
631 <sub>#4</sub>	$1,43(3) \times 10^{-2}$
631 <sub>#7</sub>	$1,52(6) \times 10^{-2}$
1274 <sub>#4</sub>	$8,547(15) \times 10^{-3}$
1274 <sub>#7</sub>	$9,32(3) \times 10^{-3}$

Com os valores das eficiências de detecção dos raios gama individuais (631 keV e 1274 keV) e calculadas as eficiências para os eventos coincidentes verdadeiros (511 – 511 + 1274 keV) determinou-se através da equação 3.5, as eficiências de detecção do fenômeno procurado para o novo arranjo, tabela 55.

Tabela 55: Valores das eficiências de detecção de coincidência temporal para os eventos de interesse:

Energia (keV)	Eficiência
511 <sub>#4</sub> – 511 + 1274 <sub>#7</sub>	$3,45(8) \times 10^{-5}$
511 <sub>#7</sub> – 511 + 1274 <sub>#4</sub>	$2,77(6) \times 10^{-5}$
511 <sub>#4</sub> – 511 + 631 <sub>#7</sub>	$5,6(3) \times 10^{-5}$
511 <sub>#7</sub> – 511 + 631 <sub>#4</sub>	$4,66(16) \times 10^{-5}$

### 3.6 – Terceiro grupo de medidas – redução de dados

Com o espectro de tempo, Figura 24, do arquivo n3.f47 determinou-se os intervalos temporais em que ocorreram os eventos coincidentes totais e apenas os acidentais para posterior obtenção dos espectros de energia.

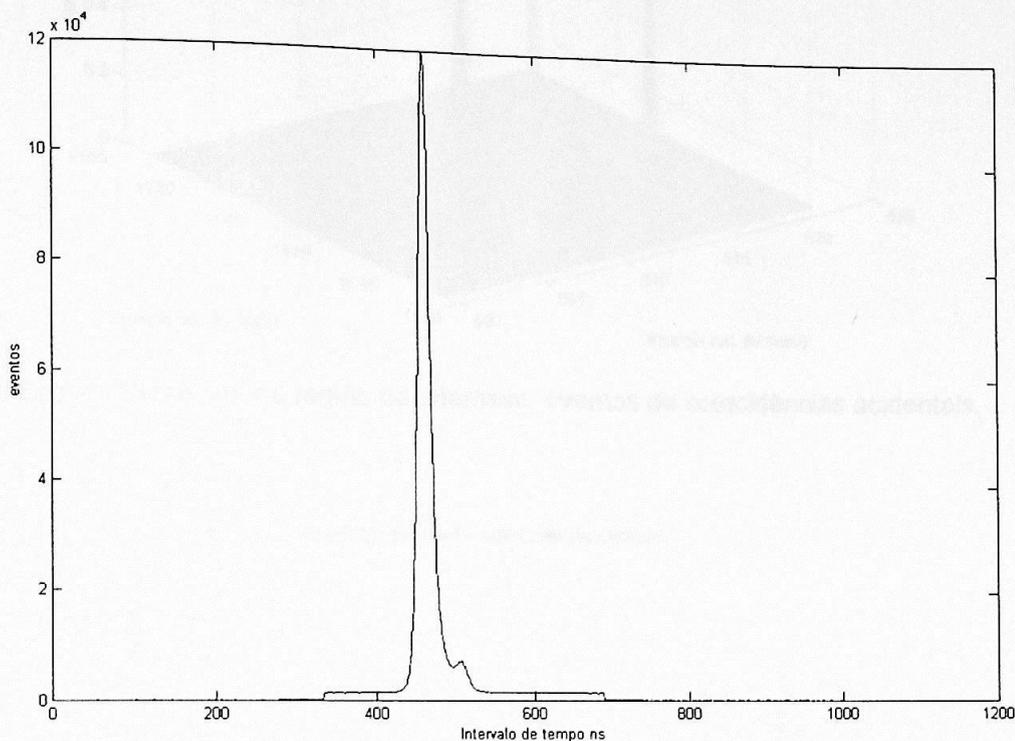


Figura 24: Histograma da diferença de tempo de detecção dos raios gama nos detectores Phenix e Eurisys, do arquivo n3.f47; 1 canal eqüivale a 1ns.

Tabela 56: Janelas temporais de coincidências totais e acidentais para o arquivo n3.f47.

Janela total (ns)	432 a 485
Janela acidental (ns)	542 a 595

Foram montados espectros de energia para ambas as janelas temporais. O ganho em energia obedece a equação 3.7, com isto produziu-se dois tipos de espectros de energia: o que inclui todos os eventos (os verdadeiros e os acidentais) e o que contém apenas os eventos acidentais. Para ambos os espectros foram janeladas as regiões de interesse (tabela 33), que estão expostas nas Figuras 25.

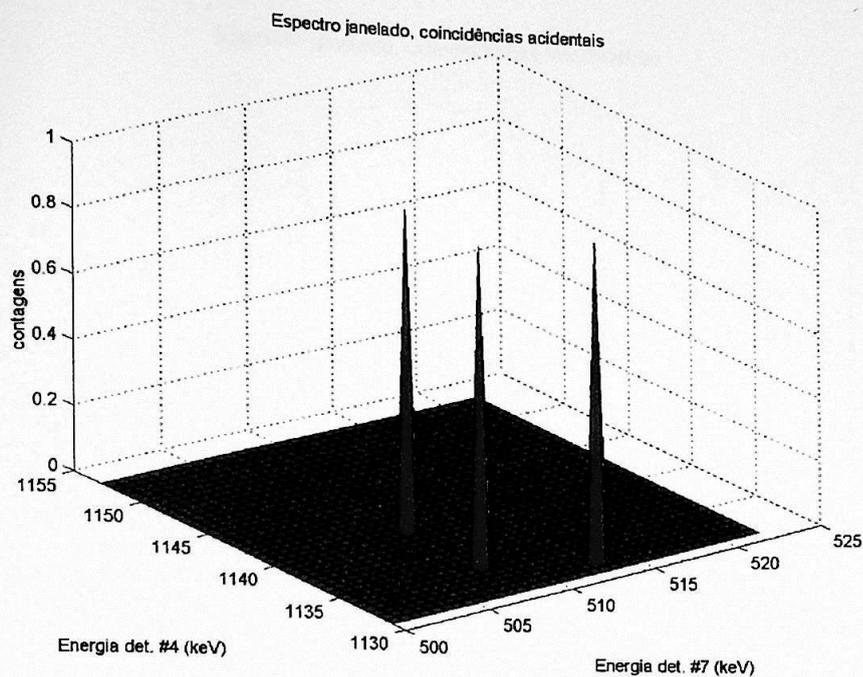


Figura 25a: Espectro janelado na região de interesse, eventos de coincidências acidentais.

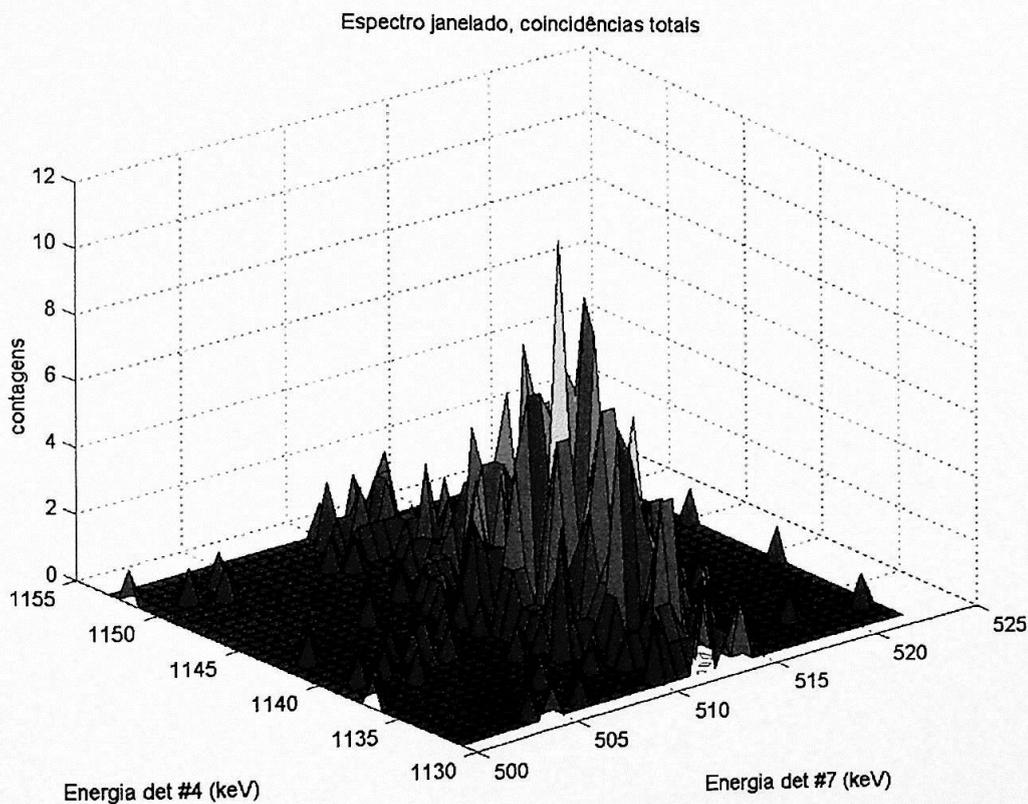


Figura 25b: Espectro janelado na região de interesse, eventos de coincidências verdadeiras e acidentais.

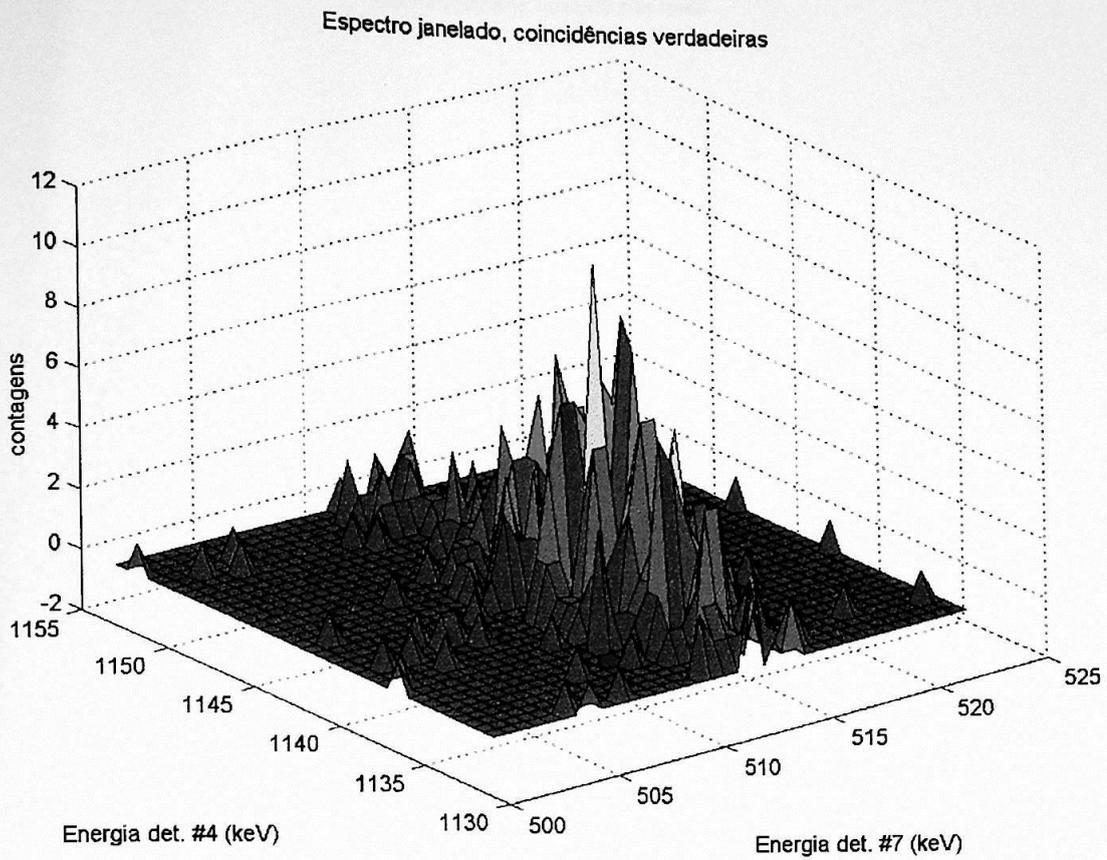


Figura 25c: Espectro janelado na região de interesse, eventos de coincidências verdadeiras.

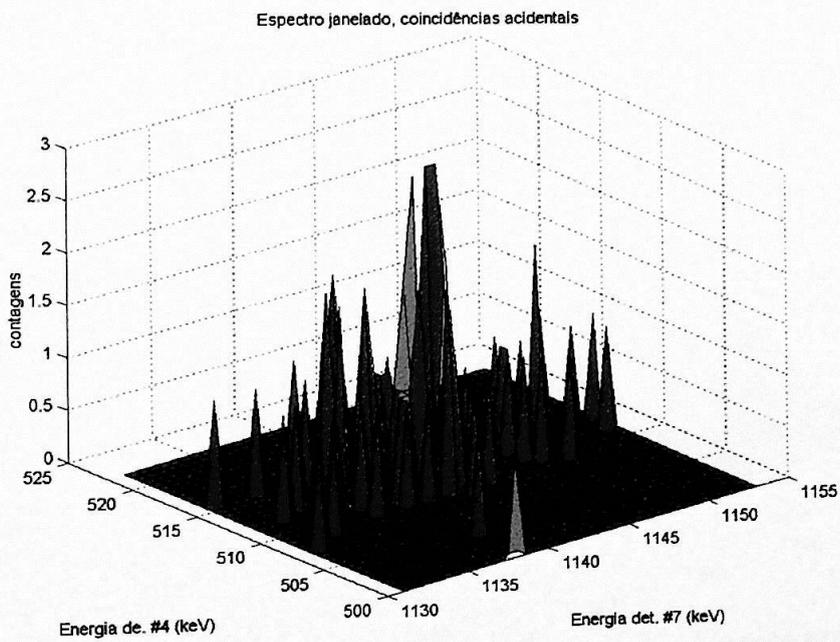


Figura 25d: Espectro janelado na região de interesse, eventos de coincidências acidentais.

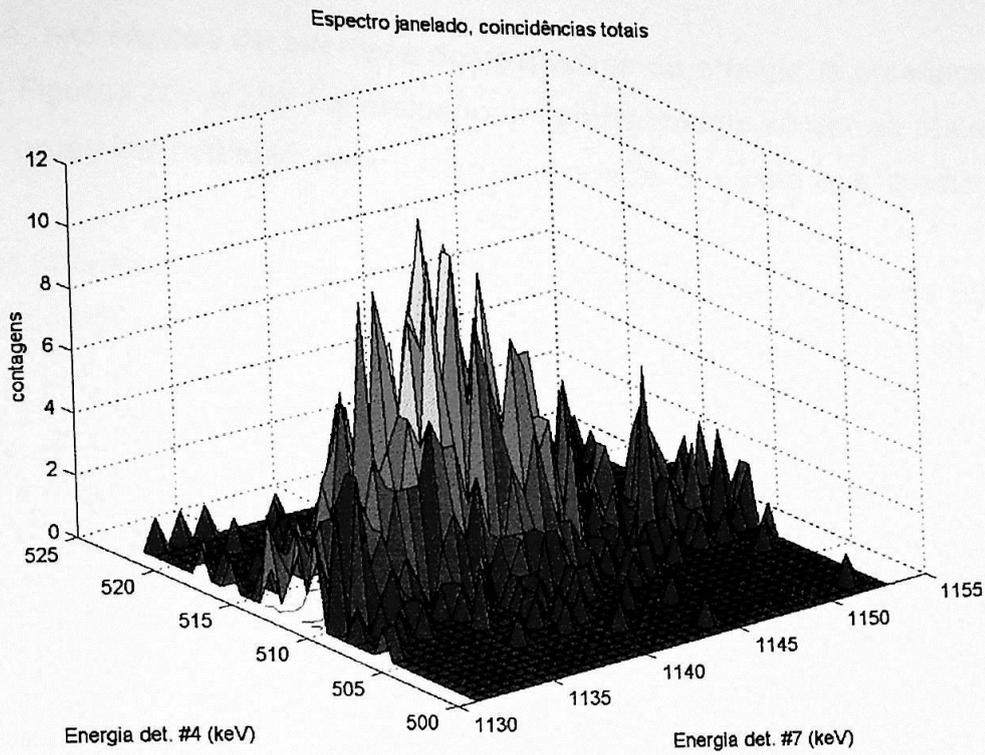


Figura 25e: Espectro janelado na região de interesse, eventos de coincidências verdadeiras e acidentais.

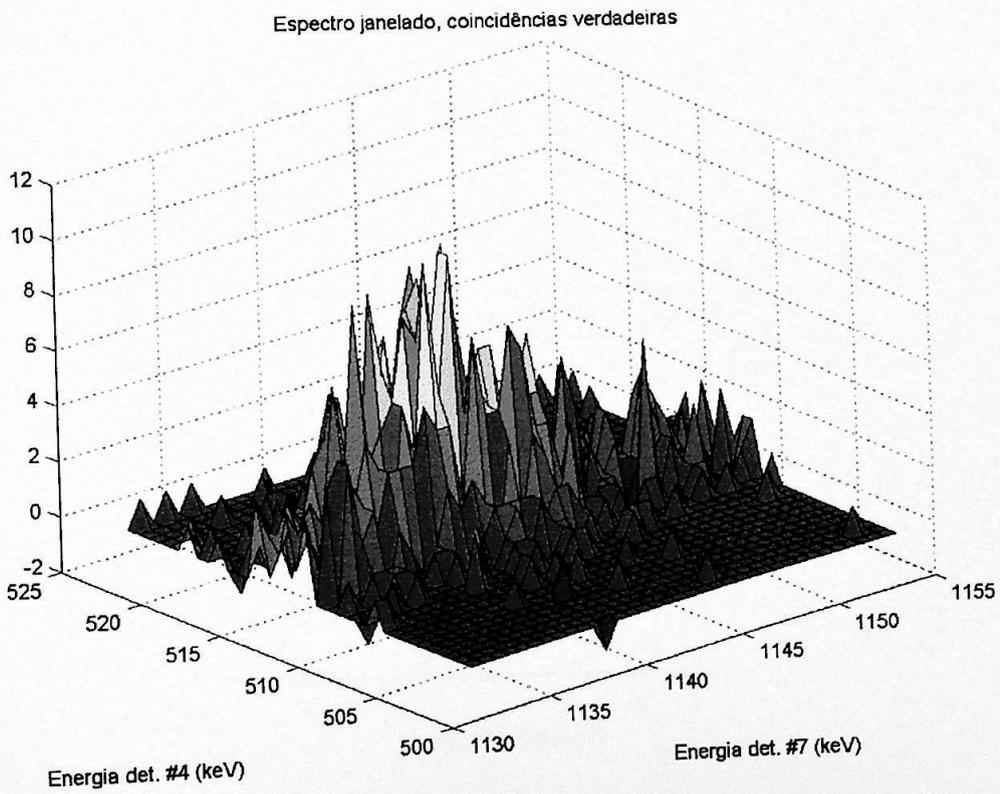


Figura 25f: Espectro janelado na região de interesse, eventos de coincidências verdadeiras.

Há, nas regiões de interesse dos espectros de energia, a presença de um fotopico, Figuras 25c e 25f. Foi efetuado um procedimento similar ao realizado no primeiro grupo de medidas para determinar qual é o evento que produziu esse fotopico.

Os fotopicos (acidentais e totais) foram ajustados pelo programa BIDIM [8], cuja saída gráfica é mostrada nas figuras 26a e b, com mesmo significado que no primeiro grupo. Os resultados encontram-se na tabela 57.

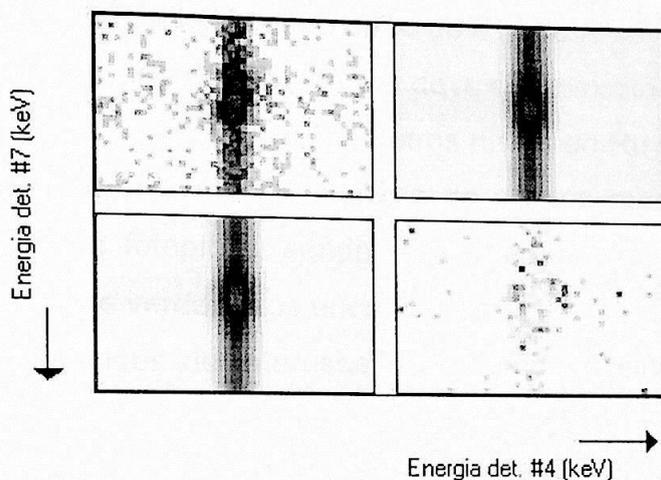


Figura 26a: Ajuste do fotopico  $511_{\#4} - 511 + 628_{\#7}$  keV feito pelo BIDIM; eventos totais.

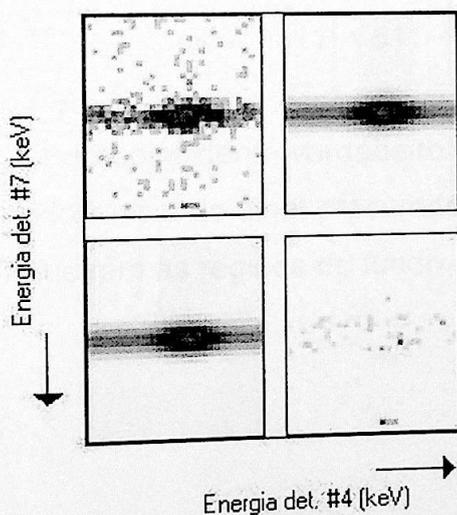


Figura 26b: Ajuste do fotopico  $511_{\#7} - 511 + 628_{\#4}$  keV feito pelo BIDIM; eventos totais.

Tabela 57: Análise dos fotopicos desconhecidos nas regiões de interesse; Figuras 25c e 25f.

Energia (keV)	Área do fotopico	Eventos	Eventos verdadeiros
511,373(75) #4 – 1138,82(17)#7	691(41)	Total	691(41)
511#4 – 1139#7	0	Acidental	
511,54(7) #7 – 1138,71(19) #4	395(30)	Total	360(31)
511,17(18) #7 – 1140,1(4) #4	35(9)	Acidental	

Verifica-se que os fotopicos existentes nas regiões de interesse estão associados às energias de 511 e 1139 keV. A energia de 1139 keV é devida à soma do raio gama de 628 keV com o outro de 511 keV.

O raio gama emitido de 628 keV se deve à desexcitação do nível de spin e paridade 2+ do  $^{102}\text{Ru}$ , filho do  $^{102}\text{Rh}^f$ ; há outros níveis do Ru que decaem para este nível além da possibilidade de decaimento do próprio núcleo pai, por isso esta linha é intensa. Estes fotopicos, sendo uma interferência, serão posteriormente subtraídos dos eventos verdadeiros encontrados.

Dentro das regiões de interesse é procurado o sinal representado pelos eventos de coincidências verdadeiras do 511 – 511 + 631 keV. Para isso determina-se as dimensões das regiões e o número de eventos verdadeiros que ocorreram dentro destas, tabela 58.

A dimensão de cada região de interesse é de 36,2 x 36,2 canais<sup>2</sup>. Assim ambas têm uma área de 1310 canais<sup>2</sup> e dentro desta região são apenas possíveis a ocorrência de dois tipos de fotopicos: 511 – 511 + 631 keV e 511 – 511 + 628 keV.

Na obtenção do fundo coincidente verdadeiro estabeleceu-se duas janelas, próximas das áreas da ocorrência do sinal procurado, garantindo apenas eventos de fundo; as Figuras 27 ilustram as regiões do fundo escolhidas.

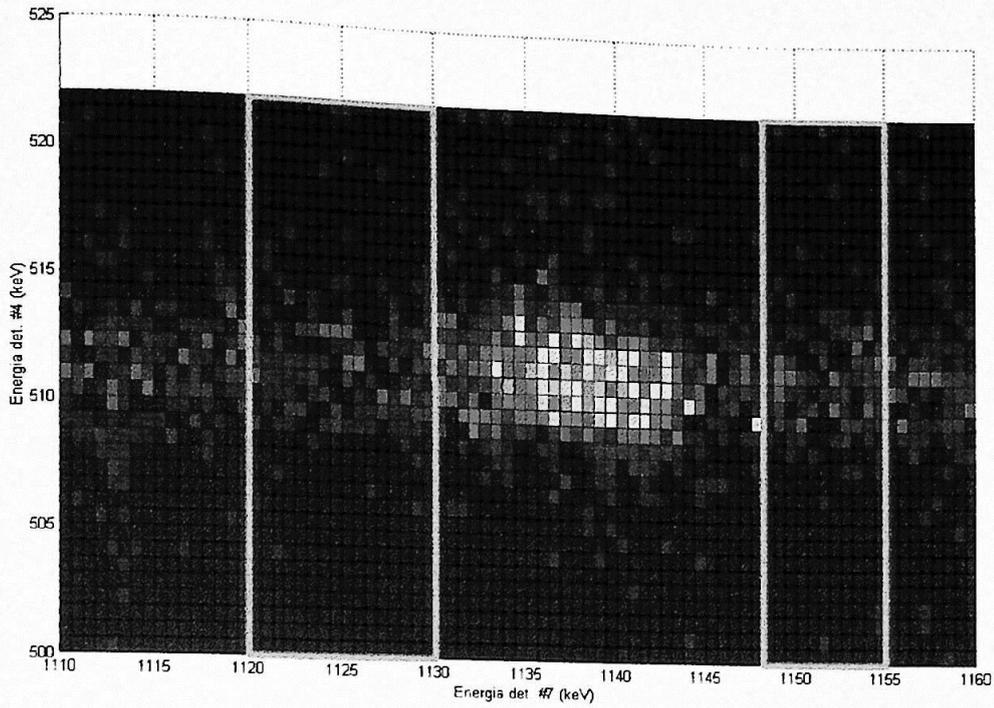


Figura 27a: As janelas de fundo escolhidas para esta região estão circundadas de rosa.

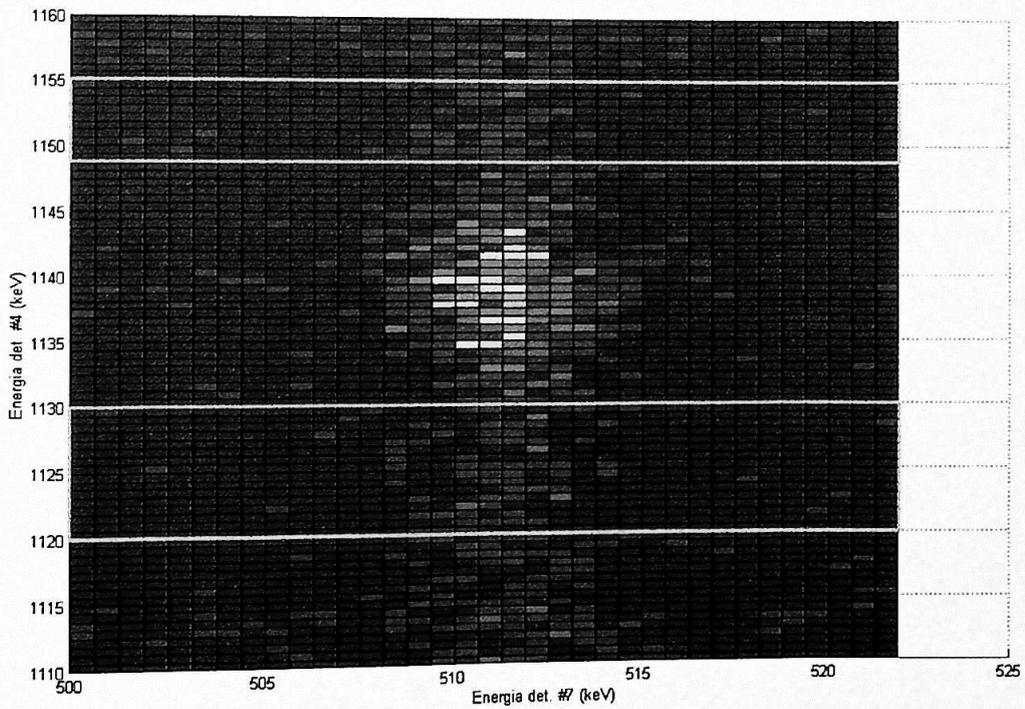


Figura 27b: As janelas de fundo escolhidas, nesta região, estão circundadas de rosa.

Tabela 58: Número total de eventos em cada região, Figuras 26, e nas janelas de fundo, Figuras 27.

Janelas em Energia (keV)	Totais	Acidentais	Verdadeiros		Área (canais) <sup>2</sup>
500 a 522 <sub>#4</sub> – 1131 a 1153 <sub>#7</sub>	1035(32)	88(9)	947 (34)		1310
500 a 522 <sub>#7</sub> – 1131 a 1153 <sub>#4</sub>	595(24)	3(2)	592(24)		1310
Fundo, janela em energia (keV)	Totais	Acidentais	Verdadeiros		-
500 a 522 <sub>#7</sub> – 1120 a 1130 <sub>#4</sub>	100(10)	1(1)	99(10)	171(13)	1057
500 a 522 <sub>#7</sub> – 1148 a 1155 <sub>#4</sub>	72(8)	0	72(8)		
500 a 522 <sub>#4</sub> – 1120 a 1130 <sub>#7</sub>	177(13)	16(4)	161 (14)	294 (18)	1057
500 a 522 <sub>#4</sub> – 1148 a 1155 <sub>#7</sub>	150(12)	17(4)	133 (13)		

Para obter somente os eventos verdadeiros do 511 – 511 + 631 keV foi executada a subtração, nos eventos coincidentes temporais verdadeiros obtidos nas regiões de interesse dos eventos da interferência 511 – 511 + 628 keV (tabela 57). Com isso têm-se as quantidades de eventos do sinal (511 – 511 + 631 keV) mais o fundo. Pode-se expressar esses números em termos de contagens/canal<sup>2</sup>, tabela 59.

Tabela 59: Valor médio de contagens de eventos verdadeiros e do fundo nas regiões de interesse por unidade de área.

Energia (keV)	Valor médio de eventos por canal <sup>2</sup>	
	Eventos (sinal + fundo)	Fundo
511 <sub>#4</sub> – 511 + 631 <sub>#7</sub>	0,20(3)	0,278(17)
511 <sub>#7</sub> – 511 + 631 <sub>#4</sub>	0,177(23)	0,162(12)

A densidade, em contagens/canais<sup>2</sup> da região de interesse é a densidade na janela dentro da região onde é possível a ocorrência do sinal procurado. Esta janela tem a dimensão do comprimento da região versus a largura do fotopico 511 – 511 keV, 36<sub>#4</sub> x 11<sub>#7</sub>  $\cong$  398 canais<sup>2</sup>.

Na Figura 28 tem-se a região onde se encontra o fotopico 511 – 511 keV na qual podemos determinar a sua largura de  $\cong$  11 canais.

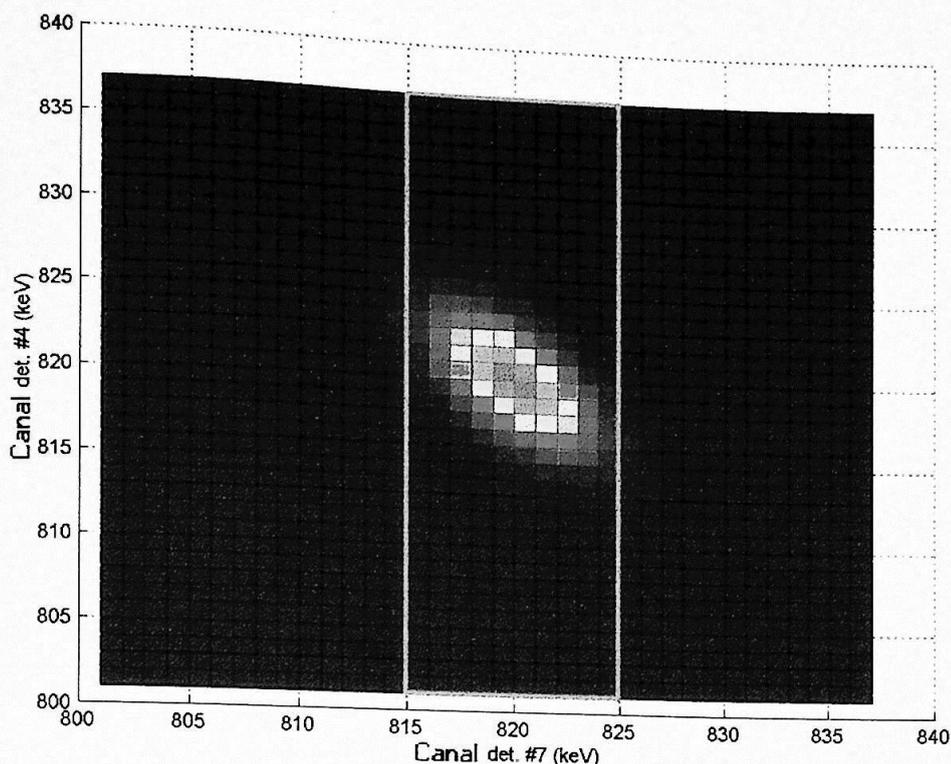


Figura 28: Curvas de nível da região do fotopico 511 – 511 keV, eventos em coincidências verdadeiras, a janela circundada em rosa é o tamanho da área utilizada para a determinação do número médio de eventos.

Obtendo-se agora as contagens médias de sinal + fundo e fundo pode ser determinado o sinal médio para cada região:

Tabela 60: Os eventos em coincidências verdadeiras são o fundo em coincidência verdadeira mais os sinais dos eventos procurados, 511 – 511 + 631 keV.

Energia (keV)	Região (398canais <sup>2</sup> )	Sinal +Fundo	Fundo	Sinal
511 <sub>#4</sub> – 511 + 631 <sub>#7</sub>	1	78(13)	111(7)	-33(15)
511 <sub>#7</sub> – 511 + 631 <sub>#4</sub>	2	70(9)	64(5)	6(11)

Novamente se trata de uma situação onde o sinal ou é negativo ou consistente com zero. O limite máximo do sinal procurado, com nível de confiança de 95,5%, nas regiões 1 e 2 é respectivamente 14,6 e 25,7 [apêndice C].

Tabela 61: Dados da fonte de  $^{102}\text{Rh}$  para o terceiro grupo de medida.

Atividade do metaestável (kBq)	135,8(4)
Tempo vivo (s)	216000
Eficiência (Região 1)	$5,6(3) \times 10^{-5}$
Eficiência (Região 2)	$4,66(16) \times 10^{-5}$

Assim determina-se um limite máximo para a intensidade do decaimento  $\beta^+$  ( $I_{\text{max}}$ ) para cada região, 1 e 2; os respectivos valores são  $8,8 \times 10^{-6}$  e  $1,9 \times 10^{-5}$  [decaimentos por desintegração do núcleo pai].

#### 4 – Estimativa da intensidade da transição isomérica

Há uma probabilidade de decaimento do  $^{102}\text{Rh}^m$  via transição isomérica, Figura 29, para o fundamental, a intensidade desta transição no laboratório é de  $2,7(3) \times 10^{-3}$  [1]; este decaimento pode ocorrer pela emissão de fótons,

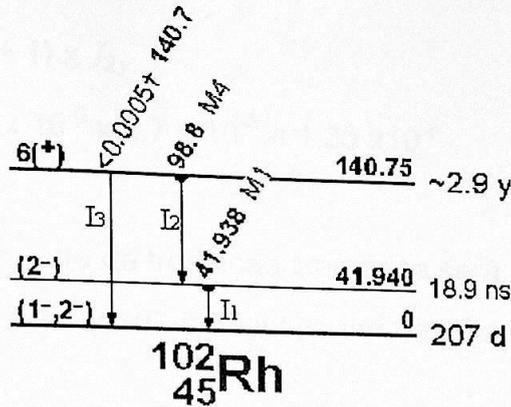


Figura 29: Decaimento do metaestável para o fundamental;  $I_3$ ,  $I_2$  e  $I_1$  representa a intensidade do decaimento de cada nível.

mas para momentos angulares elevados ele tem uma facilidade maior de ocorrência através da emissão de elétrons principalmente da camada K (conversão eletrônica). Como no meio interestelar o núcleo está despido da coroa eletrônica, é necessário determinar o valor parcial das intensidades de transições ocorridas por decaimento gama do  $^{102}\text{Rh}^m$  em  $^{102}\text{Rh}^f$ .

Os coeficientes de conversões totais [2] para M1 e M4 do  $^{102}\text{Rh}$  para as transições de desexcitação do metaestável para o fundamental são:

$$M1(42\text{keV}) = 4,4$$

$$M4(99\text{keV}) = 305$$

$$M1 = \frac{I_{1e}}{I_{1\gamma}} \Rightarrow M1 + 1 = \frac{I_{1e}}{I_{1\gamma}} + \frac{I_{1\gamma}}{I_{1\gamma}} = \frac{I_{1e} + I_{1\gamma}}{I_{1\gamma}}$$

$$M4 = \frac{I_{2e}}{I_{2\gamma}} \Rightarrow M4 + 1 = \frac{I_{2e}}{I_{2\gamma}} + \frac{I_{2\gamma}}{I_{2\gamma}} = \frac{I_{2e} + I_{2\gamma}}{I_{2\gamma}}$$

Onde M1 e M4 representam os coeficientes de conversão,  $I_i$  é a intensidade total da transição  $i$ ,  $I_{ie}$  é a parte dela que se dá por conversão eletrônica e  $I_{iy}$  é a parte que se dá por emissão de fótons.

$$I_1 = I_{1\gamma} + I_{1e} = (M1 + 1) \times I_{1\gamma}$$

$$I_2 = I_{2\gamma} + I_{2e} = (M4 + 1) \times I_{2\gamma}$$

$$I_3 = I_{3\gamma} + I_{3e} < 5,0 \times 10^{-6} \times 2,7 \times 10^{-3} = 1,35 \times 10^{-8}$$

Assim, a Intensidade da transição isomérica será:

$$I = I_{2\gamma} \times br_{1\gamma} + I_{3\gamma} = 1,65 \times 10^{-6} \text{ transições por decaimentos}$$

$$br_{1\gamma} = \frac{I_{1\gamma}}{I_1} \text{ é a razão de ramificação}$$

$$I_{3\gamma} \approx 10^{-8} \text{ foi desprezado}$$

## 5 - Resultados e Discussões

Os melhores valores dos limites máximos das intensidades buscadas, com nível de confiança de 95,5% para cada grupo de medidas do decaimento por  $\beta^+$  do  $^{102}\text{Rh}^m$  estão expostos na tabela 62.

Tabela 62: Valores dos limites das intensidades para cada grupo de medida.

Grupo de medida	Intensidade do $\beta^+$ (%) (decaimentos por desintegração do núcleo pai)
Primeiro	$3,0 \times 10^{-1}$
Segundo	$7,6 \times 10^{-4}$
Terceiro	$8,8 \times 10^{-4}$

No primeiro grupo de medidas houve ocorrência de dois fatores responsáveis pela deterioração da qualidade do limite de intensidade. A fonte de  $^{22}\text{Na}$  calibrada era fraca mas para manter o mesmo arranjo de medida foi necessário coloca-la dentro da blindagem de chumbo, comprometendo a qualidade estatística da eficiência de detecção do 511 – 511 + 631 keV. Além disso, uma interferência na janela de medida causada pelo fótico 511 – (511 + 628) keV elevando os valores das incertezas dos números de contagens do evento procurado.

Esse efeito apareceu também no terceiro grupo de medidas pois os resultados obtidos com a Fonte Nova, mais intensa, sofreram interferência do decaimento  $\beta^+$  do  $^{102}\text{Rh}^f$  para o estado de 1103,15 keV, produzindo o fótico 511 – (511 + 628) keV na janela de energia em estudo. Mesmo após algum tempo de espera, a Fonte Nova se encontrava intensa o suficiente para não permitir uma medida com os detectores encostados ou numa geometria mais próxima. O limite de intensidade obtido com a Fonte Nova no terceiro grupo de medidas foi melhor do que o do primeiro grupo, significando que a diminuição da intensidade do decaimento do  $^{101}\text{Rh}$  (meia vida de 4,34 dias), concorrente, foi importante para a melhoria da qualidade da medida. Os resultados do primeiro e terceiro grupo de medidas podem estar indicado também que um arranjo experimental sem a

blindagem de chumbo e uma espera um pouco maior poderiam contribuir para a produção de um limite de melhor qualidade, ou seja, um limite mais restritivo para a intensidade  $\beta^+$  do  $^{102}\text{Rh}^m$ .

A fonte nova poderia ser adequada para uma medida de natureza diferente, uma coincidência tripla, onde três detetores distintos detectassem respectivamente os fótons de aniquilação e o gama 631 keV. Numa tal medida, a eficiência de detecção seria bem menor do que aquela conseguida com a Fonte Velha, porém um efeito favorável seria a redução do fundo coincidente.

Quando à medida com a Fonte Velha, que produziu o melhor valor para o limite de intensidade  $\beta^+$ , uma possível melhoria seria reduzir o fundo na região de interesse através da introdução de uma blindagem conveniente entre os detetores. Uma vantagem apresentada na medida do segundo grupo é que a região de interesse apresentou apenas um fundo contínuo, sem a presença de fotopicos. Isso pode ser devido ao fato de que a quantidade de  $^{102}\text{Rh}^f$  em relação ao estado isomérico era menor do que na Fonte Nova, onde o estado fundamental só deve existir em equilíbrio secular com o metaestável.

Uma espera maior no uso da Fonte Nova deve então apresentar melhores resultados devido à quantidade de núcleos no estado fundamental ser sucessivamente menor, relativamente ao metaestável.

## 6 – Conclusão

O resultado da medida da intensidade de decaimento  $\beta^+$  e por transição isomérica (via fóton) do  $^{102}\text{Rh}^m$  é um limite superior de  $9,3 \times 10^{-6}$  por decaimento, com um nível de confiança de 95,5%. Este limite representa uma meia vida parcial [Apêndice E] na ausência dos elétrons atômicos, de  $3,1 \times 10^5$  anos. Esta meia vida permite incluir o  $^{102}\text{Rh}^m$  como um isótopo que pode ser usado como cronômetro de raios cósmicos [14] na região de massa  $\sim 100$ .

Cálculos de propagação da componente nuclear dos raios cósmicos envolvem essa meia vida parcial, no caso dos isótopos radioativos, sendo esta um parâmetro essencial para o estudo das abundâncias isotópicas observadas. A variação do número de núcleos de Rh depende também de sua produção na fonte e de reações nucleares com o meio interestelar (*spallation*) [15] que venham a produzir mais núcleos.

## Apêndice A

### Passeio: deslocamento da centróide do fotopico

Numa medida de espectroscopia o ganho em energia pode variar durante a aquisição de dados danificando com isto a estrutura do fotopico; a centróide do fotopico se desloca da posição original em que se encontrava. Este efeito é chamado de passeio do fotopico e uma possível causa pode ser a variação da temperatura e/ou umidade da sala onde a aquisição foi efetuada.

Para verificar se ocorreu passeio no conjunto de espectros compara-se a posição da centróide de três fotopicos distintos localizados no início, centro e final de cada espectro para cada detetor, e assim monta-se para cada detetor de cada conjunto três gráficos. Cada gráfico mostra as posições das centroides do mesmo fotopico em cada espectro .fil como função do número do espectro. Na Figura 30 tem-se um gráfico ilustrativo de um conjunto de espectros problemáticos.

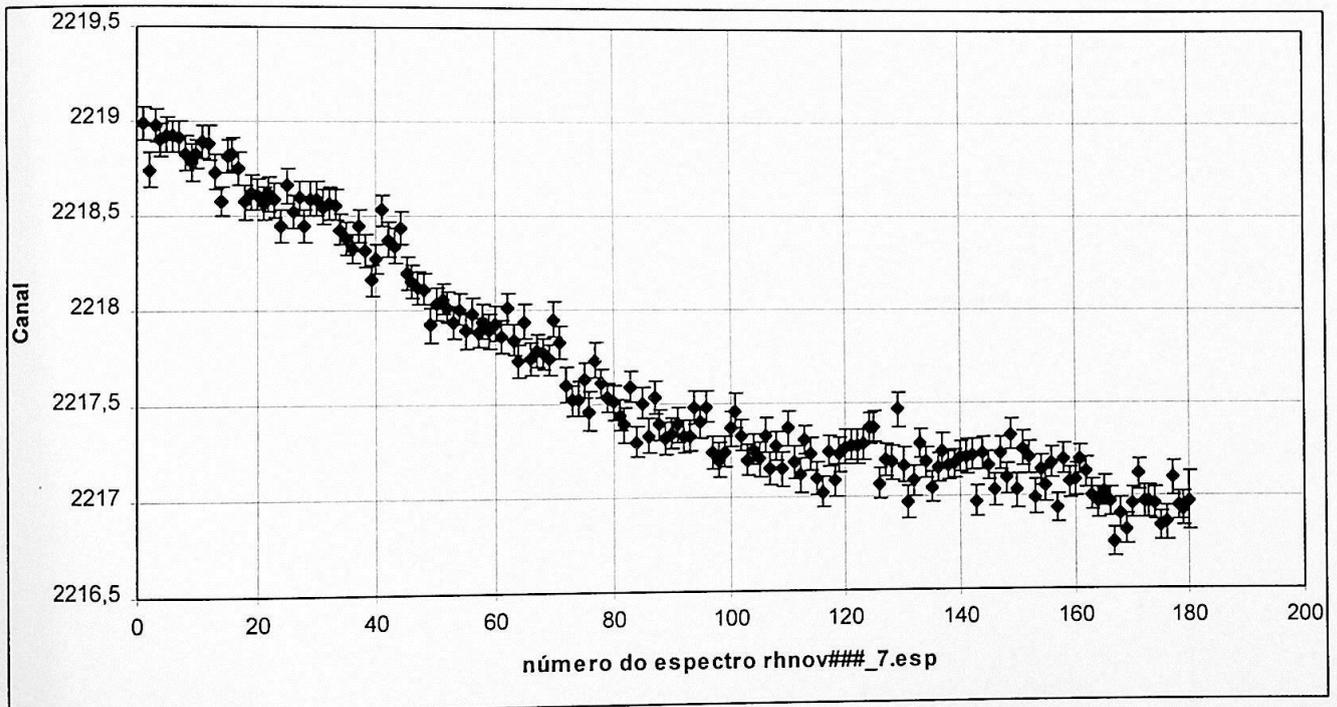


Figura 30: Exemplo do deslocamento da centróide de um determinado fotopico durante a aquisição.

## Apêndice B

### Projeções dos espectros bidimensionais

A projeção de um espectro \*.fil para um detetor A é o espectro de contagens no detetor A em coincidência temporal com qualquer gama detectado em outro detetor contido no arranjo do experimento.

Na tabela 65 tem-se os espectros \*.fil usados para mostrar os espectros de projeção para o detetor Eurysis (Figuras 31) e na tabela 66 está indicado um espectro simples da fonte de  $^{152}\text{Eu}$  (Figura 32) usado para o cálculo da eficiência do detetor Eurisy para o primeiro grupo de medidas.

Tabela 65: Projeção para um conjunto de espectros \*.fil pelo detetor Eurisy da fonte de  $^{102}\text{Rh}$  em coincidência temporal com qualquer gama detectado pelo Phenix.

Espectro	Grupo	Projeção
Rhmv000.fil até rhmv181.fil	1	rhmv_7.esp
Rhv000.fil até rhv210.fil	2	rhv_7.esp
Nrhd000.fil até nrhd041.fil	3	Nrhd_7.esp

Tabela 66: Espectroscopia simples com a fonte de  $^{152}\text{Eu}$

Espectro	Grupo
Eupr.chn	1

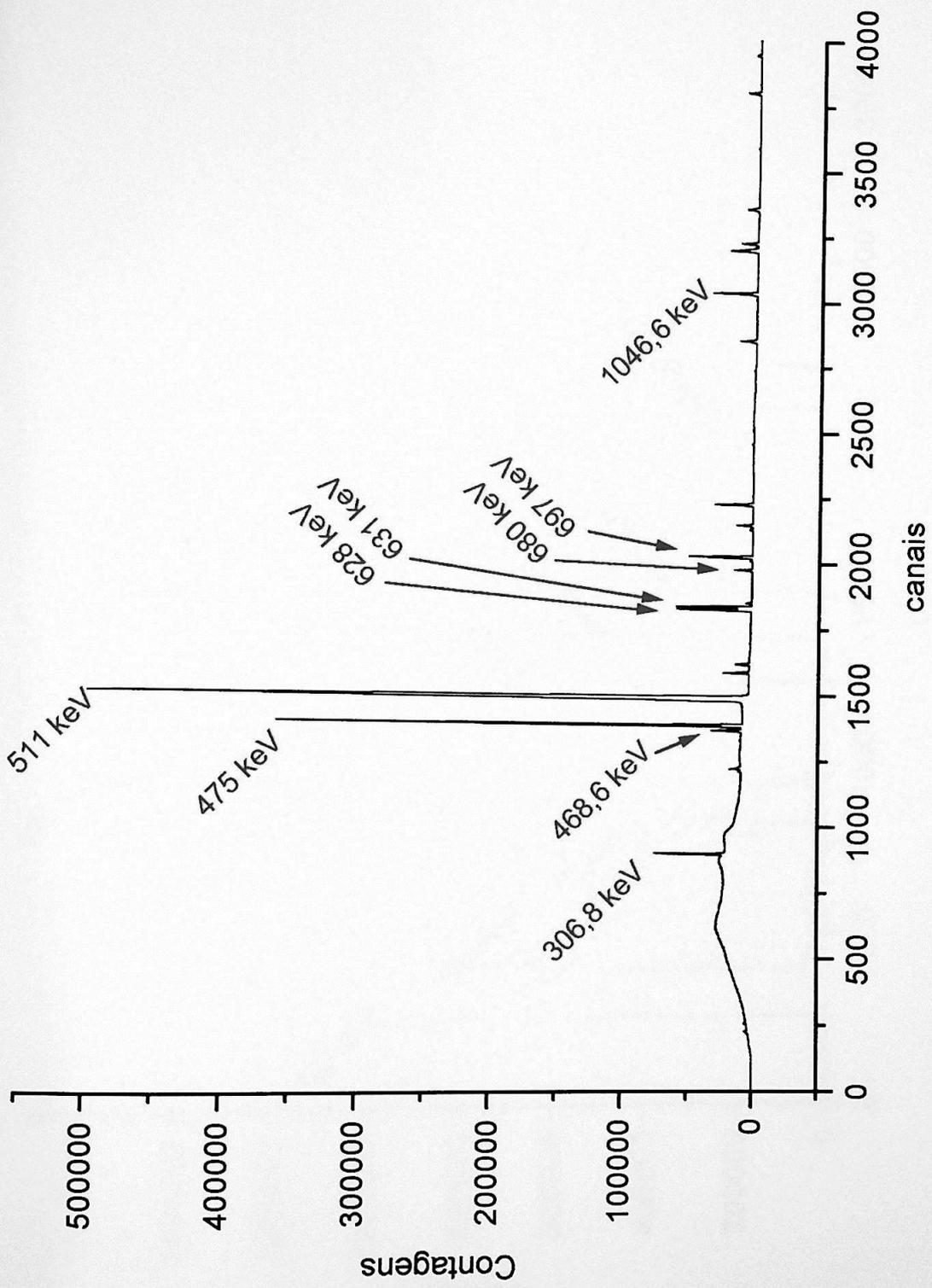


Figura 31a: Projção para o detector Eurysis (#7), espectro rhnv\_7.esp.  
 O ganho em energia é:  $E_{\#7} = -1,72 + 0,346 \times C_{\#7}$

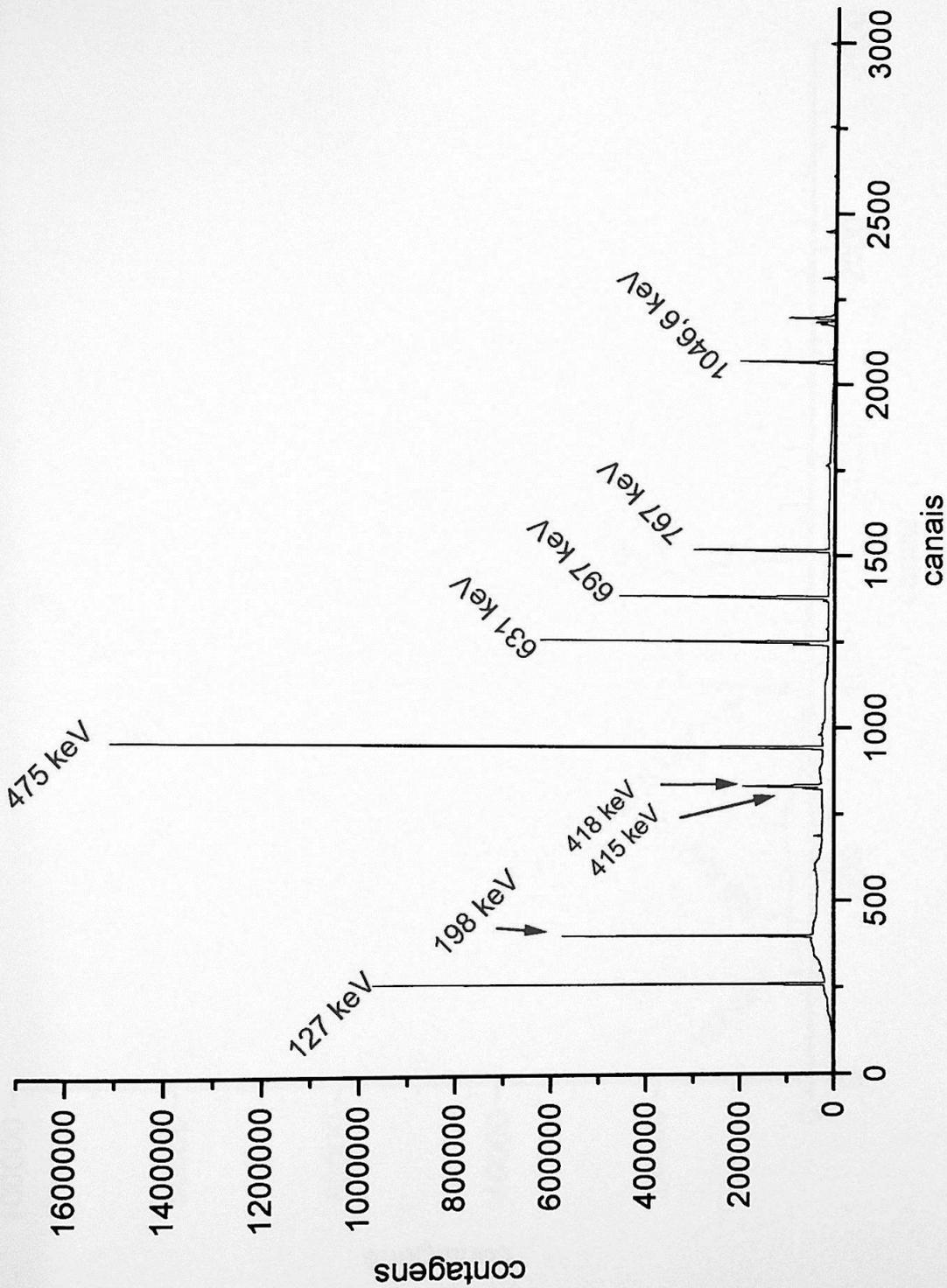


Figura 31b: Projeção para o detector Eurnysis (#7), espectro rhv\_7.esp.

O ganho em energia é:  $E_{\#7} = -2,99 + 0,509 \times C_{\#7}$

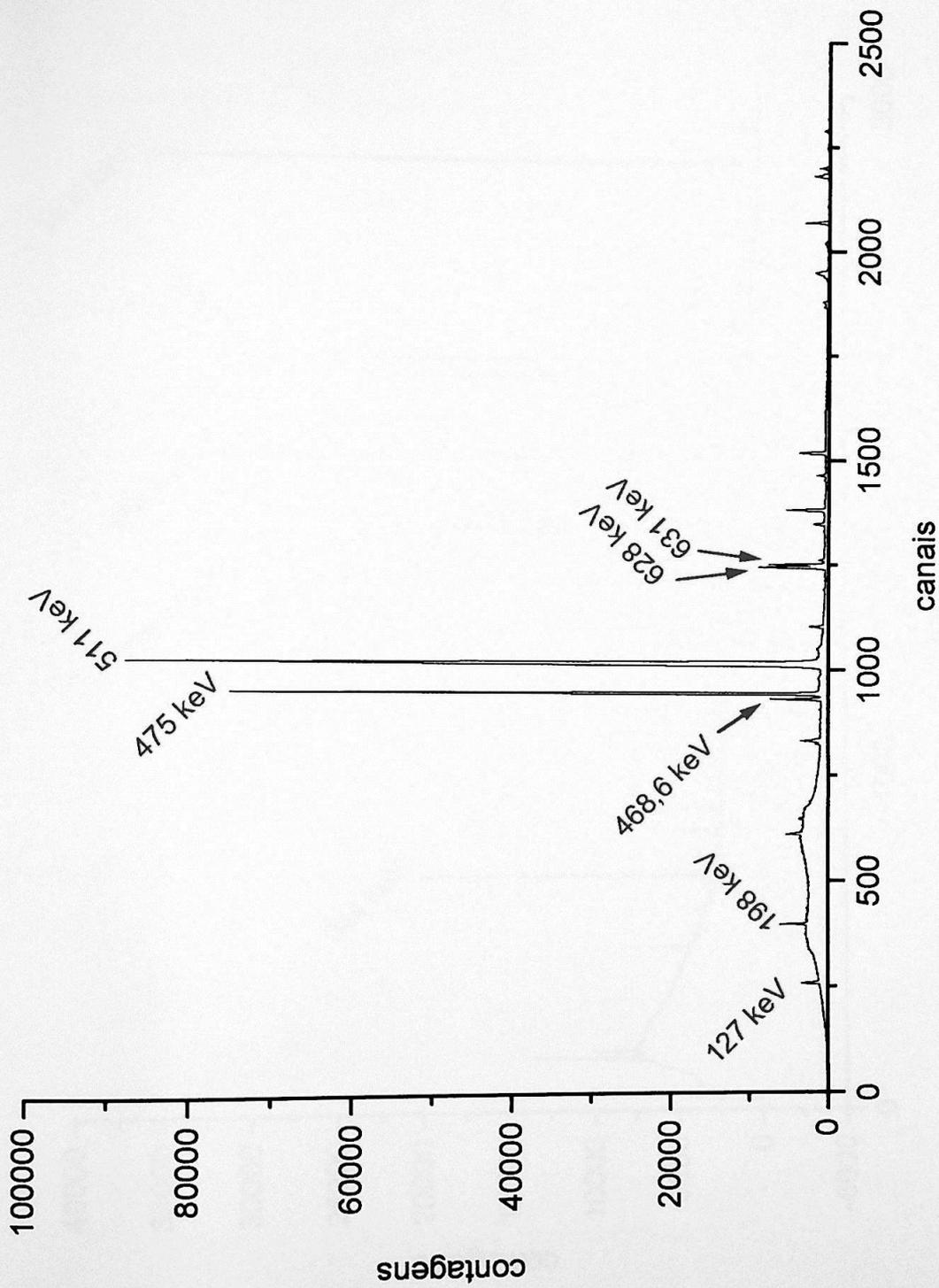


Figura 31c: Projção para o detector Eurysis (#7), espectro nrhd\_7.esp.

O ganho em energia é:  $E_{\#7} = -2,58 + 0,508 \times C_{\#7}$

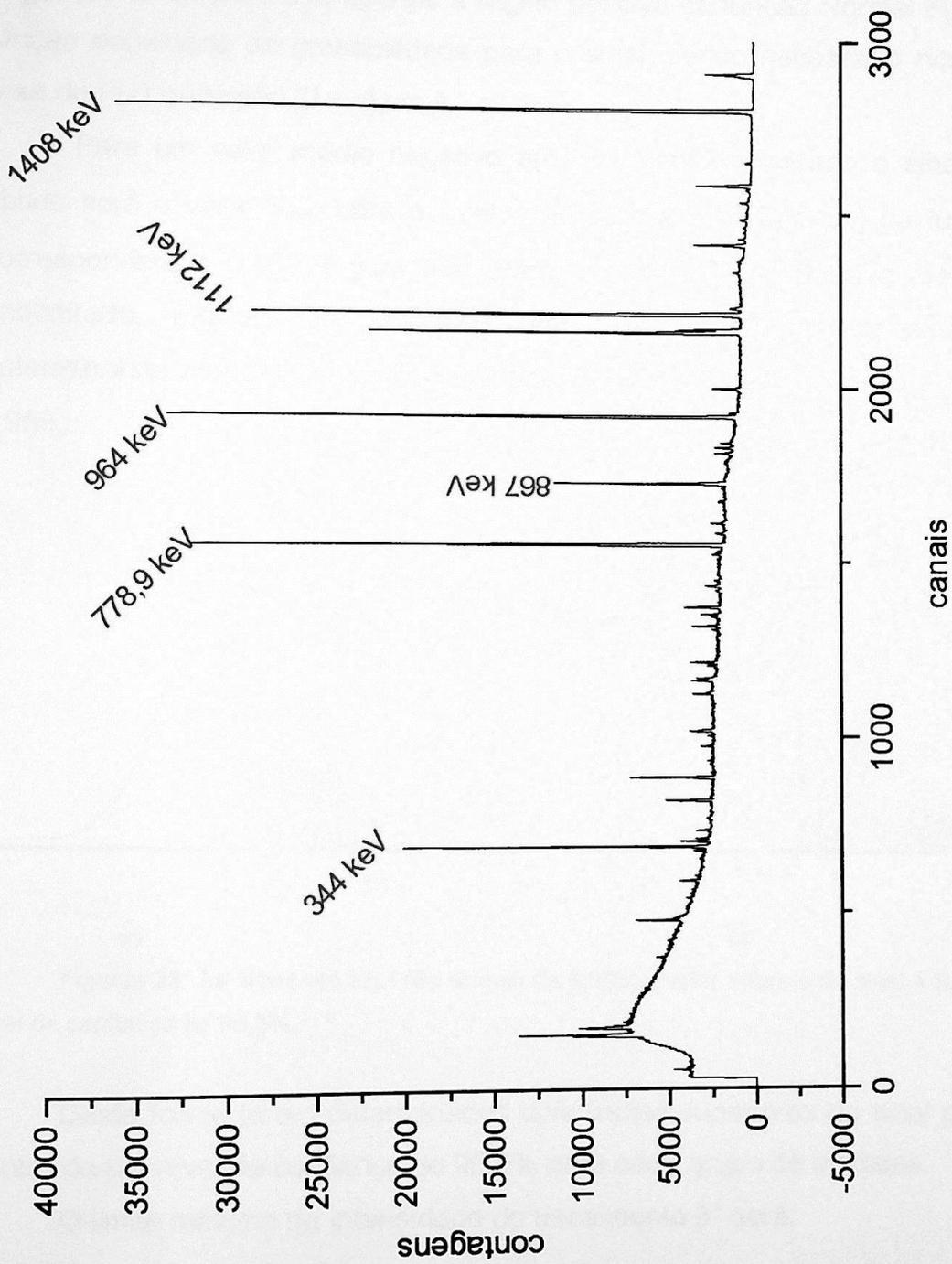


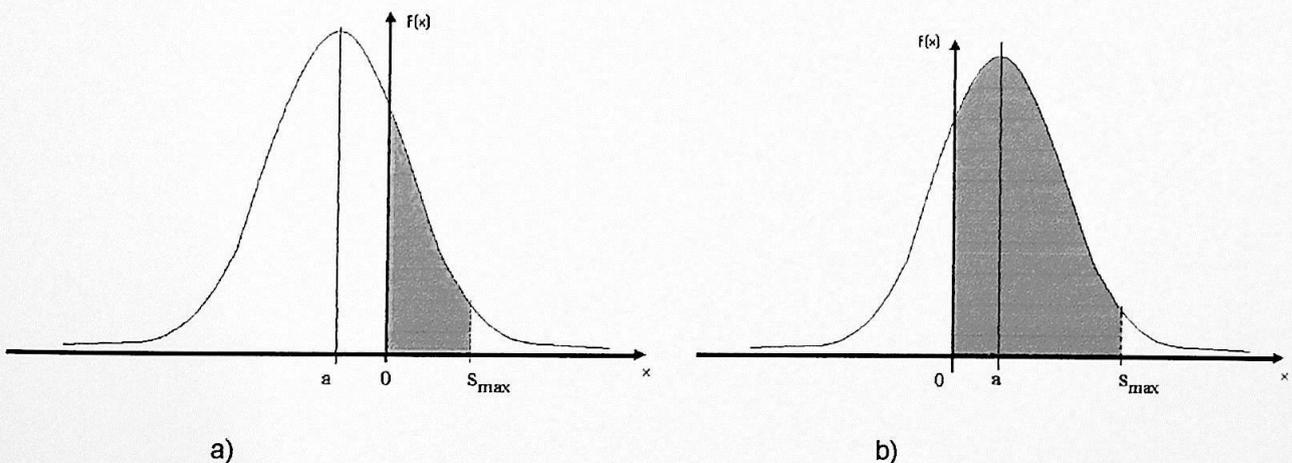
Figura 32: Espectro de  $^{152}\text{Eu}$  epr. chn; detector Eurysis (#7).  
 O ganho em energia é:  $E_{\#7} = - 2,01 + 0,503 \times C_{\#7}$

## Apêndice C

### Determinação da intensidade do decaimento $\beta^+$ dentro de uma faixa com 95,5% de chance

A função densidade de probabilidade considerada é uma função Normal (Gaussiana) e como não há sentido físico números de eventos detectados negativos foi considerada apenas a região positiva da função Normal  $F(x)$  como a função densidade de probabilidade para o sinal, sendo necessário normalizar a área de  $F(x)$  na região  $[0 +\infty]$  em 1.

Para um valor médio negativo  $a(\sigma)$  do sinal encontrado o sinal máximo obtido será o valor  $S_{\max}$  para a qual a área da região  $[0 S_{\max}]$  da função  $F(x)$  corresponderá a 0,955, Figura 33a. Para um valor médio positivo  $a(\sigma)$  do sinal encontrado, Figura 33b, adota-se um procedimento similar ao anterior, determinando uma região de  $[0 S_{\max}]$  para a qual a área da função  $F(x)$  seja de 0,955.



Figuras 33: As áreas em azul são ambas de 0,955; o valor máximo do sinal é  $S_{\max}$  com um nível de confiança de 95,5%.

Desta forma foram determinados dois limites superiores do sinal procurado dentro de um nível de confiança de 95,5% para cada grupo de medidas.

O limite máximo da intensidade do decaimento  $\beta^+$  será:

$$I = \frac{\text{senal}}{\text{Ativ} \times \epsilon_{\text{senal}} \times t_{\text{vivocnt}}}$$

onde

$I$   $\Rightarrow$  é o limite máximo da intensidade do decaimento  $\beta^+$ [decaimentos por desintegração do núcleo pai]

$\text{Ativ}$   $\Rightarrow$  atividade do rádio metaestável

$\epsilon_{511_{(a)}-511+631_{(b)}}$   $\Rightarrow$  eficiência de detecção do sinal

$t_{\text{vivocnt}}$   $\Rightarrow$  tempo vivo de contagem

$\text{senal}$   $\Rightarrow$  valor do limite superior do sinal (511 - 511 + 631keV)

## Apêndice D

### Cálculo do volume do fotopico com calha na diagonal

O fotopico de aniquilação 511 – 511 keV obedece uma distribuição gaussiana mas a sua estrutura é mais complexa por causa de alguns fenômenos. Exemplos: efeito doppler [11] e efeito compton. Assim, para o fotopico ser ajustado deve-se somar outras funções além da gaussiana. De uma forma ilustrativa e simplista temos a Figura 34 exemplificando a estrutura de um fotopico.

Assim, o ajuste da estrutura do fotopico se deu por uma função gaussiana mais uma função polinomial, para o fundo, e uma função erro, no degrau.

Quando o fotopico a ser ajustado envolve coincidência com 511 keV do aniquilamento elétron-pósitron, ele sofre uma deformação; um alargamento do fotopico com uma inclinação de  $45^\circ$ , que representa energia constante.

Para facilitar o cálculo do ajuste deste fotopico foi mudado o referencial dos eixos de energia, Figura 35, para que a inclinação de  $45^\circ$  do fotopico no novo referencial não existisse.

Estes fotopicos centrados em  $E_{ox}$  e  $E_{oy}$  estão também sobre calhas. Estas calhas são das coincidências temporais dos gamas  $E_{ox}$  com o efeito compton de  $E_y$  e dos gamas  $E_{oy}$  com o efeito compton de  $E_x$ . Assim na função a ser ajustada deve-se acrescentar as funções das calhas:  $F_{calhax} + F_{calhay}$ .

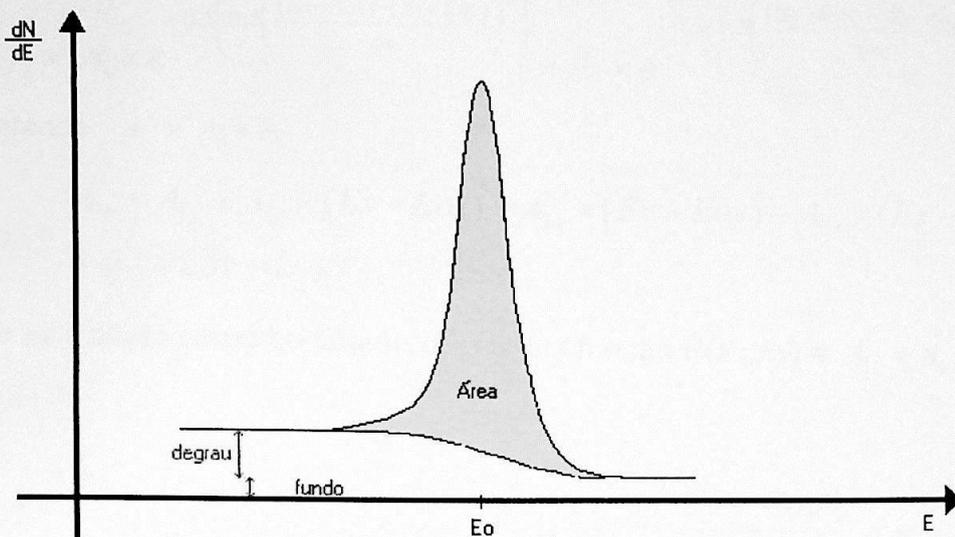


Figura 34: Um fotopico, a distribuição de contagens dos eventos obedece uma distribuição gaussiana. Esta estrutura está sobre um degrau devido à coleção incompleta de carga e um fundo.

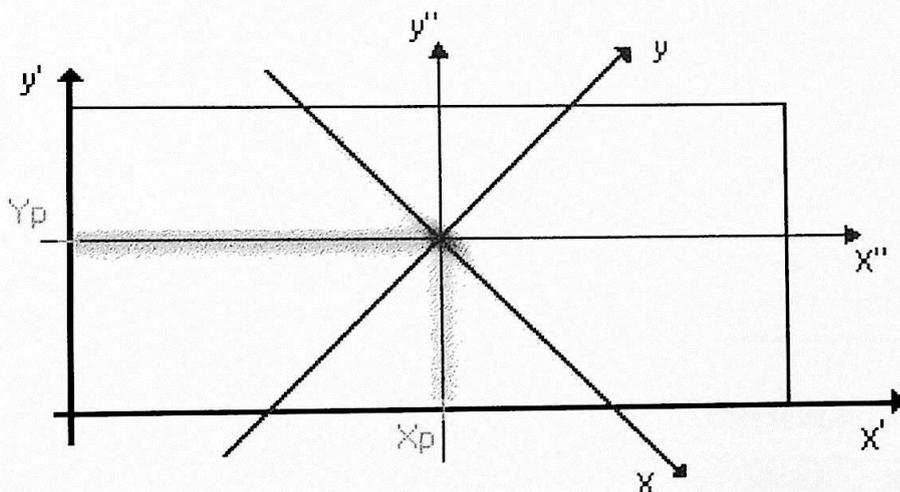


Figura 35: Espectro mostrado na Figuras 18; um novo sistema de coordenadas para reorganizar o fotopico e com isto facilitar o calculo do seu volume (número de contagens totais)

Assim tem-se a função  $F_{ajuste}(Ex, Ey)$  a ser ajustada [12] nos fotopicos 511 – 511 + 1274 keV dos espectros de  $^{22}\text{Na}$  do segundo e terceiro grupo de medidas:

$$F_{ajuste}(Ex, Ey) = \text{erfc}(Ex, Ey) + P(Ex, Ey) + G(Ex, Ey) + F_{\text{calhax}}(Ex, Ey) + F_{\text{calhay}}(Ex, Ey)$$

onde,

$$G(Ex, Ey) = A_1 \times e^{-0,5 \left( 0,5 \left( \frac{(Ex-Eox)-(Ey-Eoy)}{\sigma x} \right)^2 \right)} \times A_2 \times e^{-0,5 \left( 0,5 \left( \frac{(Ex-Eox)+(Ey-Eoy)}{\sigma y} \right)^2 \right)}$$

considerando  $A_1 \times A_2 = A$

$$P(Ex, Ey) = A'_{1,x} + A'_{1,y} + A'_{2,x} \times (Ex - Eox) + A'_{2,y} \times (Ey - Eoy) + A'_{3,x} \times (Ex - Eox)^2 + A'_{3,y} \times (Ey - Eoy)^2$$

O funto foi tratado como constante com isto a função  $P(Ex, Ey) = A'_{1,y} + A'_{1,x} = A'$ .

$erfc(Ex, Ey) =$

$$A_1'' \times erfc\left(\frac{Ex - Eox}{\sigma x}\right)^2 \times e^{-0,5 \left( \frac{Ey - Eoy}{\sigma y} \right)^2} + A_2'' \times erfc\left(\frac{Ey - Eoy}{\sigma y}\right)^2 \times e^{-0,5 \left( \frac{Ex - Eox}{\sigma x} \right)^2}$$

$$F_{calhax}(Ex, Ey) = A_1''' \times e^{-0,5 \left( \frac{Ex - Eox}{\sigma x} \right)^2}$$

$$F_{calhay}(Ex, Ey) = A_2''' \times e^{-0,5 \left( \frac{Ey - Eoy}{\sigma y} \right)^2}$$

Tabela 63: Parâmetros da função  $F_{ajuste}(Ex, Ey)$  ajustada para espectro de  $^{22}\text{Na}$  do segundo grupo de medidas.

Parâmetros	Fotopico	Fotopico
	511 <sub>#4</sub> - 511+1274 <sub>#7</sub>	511 <sub>#7</sub> - 511 + 1274 <sub>#4</sub>
A'	1,51(7)	1,71(7)
Eox	5,115255(28) x 10 <sup>2</sup>	1,7857204(34) x 10 <sup>3</sup>
Eoy	1,7859720(31) x 10 <sup>3</sup>	5,115843(28) x 10 <sup>3</sup>
σx	1,7632(27)	1,6757(28)
σy	1,0177(15)	9,481(15) x 10 <sup>-1</sup>
A <sub>1</sub> '''	0	0
A <sub>2</sub> '''	0	9,6(33) x 10 <sup>-1</sup>
A	8,318(24) x 10 <sup>3</sup>	7,73017(25) x 10 <sup>3</sup>
A <sub>1</sub> ''	1,191(38) x 10 <sup>1</sup>	3,41(6) x 10 <sup>1</sup>
A <sub>2</sub> ''	1,370(29) x 10 <sup>1</sup>	3,45(19)

Tabela 64: Parâmetros da função  $F_{\text{ajuste}}(E_x, E_y)$  ajustada para espectro de  $^{22}\text{Na}$  do terceiro grupo de medidas.

Parâmetros	Fotopico	
	$511_{\#4} - 511 + 1274_{\#7}$ keV	$511_{\#7} - 511 + 1274_{\#4}$ keV
$A'$	$8,3(9) \times 10^{-1}$	$9,9(11) \times 10^{-1}$
$E_{ox}$	$5,11429(11) \times 10^2$	$1,785884(13) \times 10^3$
$E_{oy}$	$1,785984(12) \times 10^3$	$5,11527(11) \times 10^2$
$\sigma_x$	1,733(10)	1,653(11)
$\sigma_y$	1,017(6)	$9,31(6) \times 10^{-1}$
$A_1'''$	0	0
$A_2'''$	0	1,4(4)
$A$	$5,78(6) \times 10^2$	$5,33(7) \times 10^2$
$A_1''$	$2,7(13) \times 10^{-1}$	$5,2(25) \times 10^{-1}$
$A_2''$	$8,4(12) \times 10^{-1}$	$3,4(12) \times 10^{-2}$

Com os parâmetros ajustados para cada fotopico de cada grupo de medidas calculou-se o número de eventos (volume) para cada fotopico.

## Apêndice E

### Determinação da meia-vida parcial do $^{102}\text{Rh}^m$ apenas por decaimento $\beta^+$ ou transição isomérica via fóton

As ramificações no decaimento do  $^{102}\text{Rh}^m$  são: captura de elétrons ( $\epsilon$ ), decaimento  $\beta^+$ , transição isomérica via fóton e por conversão eletrônica.

A taxa de decaimento por unidade de tempo é  $\frac{dN}{dt} = I^{total} \times \lambda \times N$  onde  $I^{total} = 1 =$

$I_{ITf} + I_{\beta^+} + I_{\epsilon}$  é a probabilidade de ocorrer o decaimento por qualquer ramificação disponível sendo  $\lambda$  a probabilidade de decaimento por unidade de tempo. Assim, a taxa de decaimento apenas por  $\beta^+$  e transição isomérica via fóton por unidade de tempo será:

$$\frac{d(N^{\beta^+} + N^{ITf})}{dt} = (I_{ITf} + I_{\beta^+}) \times \lambda \times N \Rightarrow (I_{ITf} + I_{\beta^+}) \times \lambda = \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}^{parcial}} \text{ onde } \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

com isto determinamos a meia vida parcial  $\tau_{1/2}^{parcial}$  do  $^{102}\text{Rh}^m$ :

$$\tau_{1/2}^{parcial} = \frac{t_{1/2}}{(I_{ITf} + I_{\beta^+})}$$

$t_{1/2} \Rightarrow$  meia vida do  $^{102}\text{Rh}^m$

$I_{ITf} \Rightarrow$  Intensidade do decaimento por transição isomérica via fóton

$I_{\beta^+} \Rightarrow$  Intensidade do decaimento  $\beta^+$

## Referências

- [1] R. M. Castro – Decaimento do Estado Isomérico do  $^{102}\text{Rh}$ , Tese de Mestrado, IFUSP, 1997.
- [2] Richard B. Firestone – Table of Isotopes CD Rom; Eighth Edition, Version 1.0, March 1996.
- [3] E. A. Skakun, A. I. Stojanov, V. G. Botij – Conference Proceedings Vol 59 pag 1649; Nuclear Data for Science and Technology.
- [4] Programa Somador, LAL / IFUSP.
- [5] Z. O. G. Filho – Programa IDF for Windows, LAL / IFUSP.
- [6] X-ray and gamma-ray standards for detector calibration – International Atomic Energy Agency (IAEA).
- [7] D. B. Filho, R. C. Neves, R. Tramontano, V. R. Vanin, L. F. Gamarra. – Controlador do Sistema Multidetector para Espectroscopia Gama por Atividade Residual, XXII Reunião de Trabalho em Física Nuclear no Brasil, São Lourenço, MG.
- [8] Z. O. Guimarães Filho – Medidas Precisas de Energias de Transições Gama em Coincidência: Espectroscopia das Séries do  $^{232}\text{U}$  e  $^{233}\text{U}$ , Tese de Mestrado, IFUSP, 1998.
- [9] E. Storm, H. I. Israel – Photon Cross Sections From 1keV to 100MeV For Elements  $Z = 1$  To  $Z = 100$ , Nuclear Data Tables A7, 565-681 (1970).
- [10] Programas OPENING e TWODGATES, for Matlab – MICROSUL / IFUSP.
- [11] E. Nascimento – Estudo do Alargamento Doppler dos Gamas da Aniquilação Elétron-Positron, Tese de Mestrado, IFUSP, 1999.
- [12] AJUSTE2D, programa que ajusta funções bidimensionais pelo método de mínimos quadrados não lineares for Matlab – MICROSUL / IFUSP.

[13] AJUSTE, programa que ajusta funções pelo método de mínimos quadrados não lineares for Matlab – MICROSUL / IFUSP.

[14] P. Perso, M. T. Freitas da Cruz –  $^{102}\text{Rh}^m$ : Could It Be a Cosmic-Ray Chronometer?, International Nuclear Physics Conference, INPC, 2001

[15] P. Perso, M. T. Freitas da Cruz – Long-Lived Products Of The Spallation Of  $^{nat}\text{Te}$  And  $^{nat}\text{Mo}$  By Protons, Proceedings of the XX Brazilian Workshop, Nuclear Physics, 1997