Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO COM
REGISTRO SIMULTÂNEO DE AMPLITUDE E INSTANTE
DE OCORRÊNCIAS DOS PULSOS, APLICADO
AO MÉTODO DE COINCIDÊNCIAS $4\pi\beta\text{-}\gamma$**

Fábio de Toledo

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

Orientador:
Dr. Mauro da Silva Dias

São Paulo
2009

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO COM REGISTRO SIMULTÂNEO DE AMPLITUDE E INSTANTE DE OCORRÊNCIAS DOS PULSOS, APLICADO AO MÉTODO DE COINCIDÊNCIAS $4\pi\beta\text{-}\gamma$

Fábio de Toledo

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

Orientador:
Dr. Mauro da Silva Dias

São Paulo
2009

À Célia, minha Esposa

Ao Danilo e Diego, meus filhos

Ao Dácio e Joraci, meus pais

À minha irmã, Mônica

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não é mérito individual, mas resultado da contribuição de inúmeras pessoas que participaram direta ou indiretamente para o seu desenvolvimento. Agradeço a todas elas e, de forma particular:

Ao meu orientador e gerente do Centro do Reator de Pesquisas – CRPq do IPEN, o Dr. Mauro da Silva Dias, a dedicação e apoio, e por incentivar, desde o início, em que obteríamos um bom resultado. Este trabalho deve muito às suas sugestões de encaminhamentos teóricos, e às nossas reuniões de trabalho;

À Dra. Marina Koskinas, a sua participação no grupo de pesquisa, e, especialmente, no curso ministrado que auxiliou no desenvolvimento do meu trabalho;

Ao MSc. Franco Brancaccio, a sua participação no grupo de pesquisa, a viabilização do projeto através de discussões que foram enormemente enriquecidas por seus comentários e ponto de vista;

Ao Dr. André Luis Lapolli, pelas informações técnicas que contribuíram para o desenvolvimento do projeto;

Ao MSc. Alfredo Alvim de Castro, pela importante ajuda no desenvolvimento do *software* em LabVIEW;

Ao MSc. Cláudio Domienikan, pelos seus comentários técnicos enriquecendo o trabalho;

Aos amigos do CRPq que estiveram ao meu redor a compreensão, incentivo, solidariedade e amizade que me deram nos momentos mais difíceis;

Ao IPEN pelo material técnico e pela oportunidade de poder realizar este trabalho.

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO COM REGISTRO SIMULTÂNEO DE AMPLITUDE E INSTANTE DE OCORRÊNCIAS DOS PULSOS APLICADO AO MÉTODO DE COINCIDÊNCIAS $4\pi\beta\text{-}\gamma$

Fábio de Toledo

Resumo

Em Metrologia Nuclear, há muitos anos, o método absoluto de medida de atividade radioativa por coincidência $4\pi\beta\text{-}\gamma$ tem sido considerado um padrão primário, em razão de seu alto grau de exatidão e por depender de grandezas observáveis para a obtenção de resultados. O Laboratório de Metrologia Nuclear (LMN), do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), dentre suas técnicas de medida, utiliza a metodologia de coincidência $4\pi\beta\text{-}\gamma$. Uma nova técnica, conhecida como medida de coincidência por *software* tem sido empregada na padronização de radionuclídeos, com muitas vantagens sobre a metodologia convencional. Com o objetivo de atualizar sua metodologia de padronização de radionuclídeos, o LMN desenvolveu um novo sistema de medida de coincidências por *software*, descrito neste trabalho. O sistema eletrônico emprega os mesmos arranjos de detecção beta e gama utilizados em seus sistemas. O novo sistema é constituído por uma placa de aquisição de dados da National Instruments (NI), conectada a um microcomputador e, através de um painel de conexão, aos arranjos de detecção. O gerenciamento é obtido através de *software* desenvolvido em LabVIEW, proprietária da NI. Este sistema registra as amplitudes e os instantes de ocorrência dos pulsos de detecção beta e gama, em arquivos de disco. Os arquivos são posteriormente analisados por um programa apropriado, o *software* de análise de coincidências, de forma a obter as contagens beta, gama e de coincidências, e executando o processamento necessário para a determinação da atividade da amostra radioativa de interesse. O trabalho também apresenta e discute os resultados obtidos, utilizando a primeira versão de *software* desenvolvida especialmente para este trabalho, bem como perspectivas para futuros trabalhos.

DESIGN OF AN ELECTRONIC SYSTEM WITH SIMULTANEOUS REGISTERING OF PULSE AMPLITUDE AND EVENT TIME APPLIED TO THE $4\pi\beta\text{-}\gamma$ COINCIDENCE METHOD.

Fábio de Toledo

Abstract

The $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence method for absolute radionuclide activity measurement has been considered for many years as a primary standard in Nuclear Metrology, because of dependence on few observable quantities and high accuracy. The Laboratório de Metrologia Nuclear (LMN) – Nuclear Metrology Laboratory –, at Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) – Nuclear and Energy Research Institute –, among its measurement techniques, uses the $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence method. Recently a new technique known as ‘*software* coincidence’ has been used, with many advantages over the conventional coincidence methodology. In order to update the methodologies for radionuclide standardizations, the LMN developed a new system based on the *software* coincidence technique, described in the present work. This system uses the same nuclear set up for beta and gamma detection. The new *software* coincidence electronics uses a National Instruments (NI) acquisition card connected to a microcomputer and, through a connection panel, to the nuclear detection set up. The card configuration and controlling is accomplished by *software* using the LabVIEW, a NI proprietary product. This system records into disk files all the amplitudes and occurrence times for beta and gamma detected pulses. A suitable *software* was developed (the coincidence analysis program) to process the recorded data in order to obtain beta, gamma and coincidence counts and perform calculation of the radioactive source activity. The work also presents and discusses the results obtained with the first version of the coincidence analysis program, as well as perspectives for future works.

SUMÁRIO

	Página
INTRODUÇÃO	1
OBJETIVOS.....	4
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
1.1. Desintegração radioativa	5
1.1.1. Leis da desintegração	6
1.1.2. Desintegração alfa	7
1.1.3. Desintegração beta	7
1.1.4. Desintegração por captura eletrônica.....	8
1.1.5. Transições gama.....	9
1.1.6. Características do ^{60}Co	11
1.2. Interação da radiação com a matéria	12
1.2.1. Partículas carregadas	12
1.2.2. Fótons	14
1.3. Detectores de radiação.....	19
1.4. Método de coincidência $4\pi\beta\text{-}\gamma$ para medida da atividade	22
1.4.1. Técnica da extrapolação linear da eficiência.....	23
2. MATERIAIS E MÉTODOS	28
2.1. Sistemas de coincidência $4\pi\beta\text{-}\gamma$ do LMN do IPEN.....	28
2.2. Sistema eletrônico convencional	29
2.3. Sistema eletrônico <i>Time to Amplitude Converter</i> (TAC)	31
2.4. Sistema de coincidência por <i>software</i>	32
2.5. Detectores utilizados no Sistema II do LMN	33
2.6. Arranjo eletrônico do Sistema de Coincidência por <i>Software</i> (SCS)	36
2.7. Preparação da fonte radioativa de ^{60}Co	43
3. SISTEMAS DE COINCIDÊNCIA POR SOFTWARE	45
3.1. Coincidência por <i>software</i>	45
3.2. <i>Digital Coincidence Counting</i> (DCC).....	46

3.3.	<i>Software Coincidence Counting (SCC)</i>	47
3.4.	Sistema de Coincidência por <i>Software</i> (SCS) do LMN	47
3.4.1.	<i>Hardware</i> de aquisição do Sistema de Coincidência por <i>Software</i> (SCS)	49
3.4.2.	<i>Software</i> de aquisição desenvolvido em LabVIEW	56
3.4.3	<i>Software</i> para análise.....	61
4.	PARTE EXPERIMENTAL	62
4.1.	Medida com sistema convencional	62
4.2.	Medida com sistema <i>Time to Amplitude Converter</i> (TAC)	64
4.3.	Medida com Sistema de Coincidência por <i>Software</i> (SCS)	65
5.	RESULTADOS	68
6.	CONCLUSÕES.....	77
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 - Esquema de desintegração do ^{60}Co	11
Figura 1.2 - Predominância dos três tipos de interação dos fótons com a matéria, em relação à energia do fóton incidente e número atômico, Z, do meio.....	15
Figura 1.3 - Representação do efeito Compton.....	16
Figura 1.4 - Processo de aniquilação de pares.....	18
Figura 1.5 - Esquema dos contadores proporcionais em geometria 2π e 4π	20
Figura 1.6 - Detector de cintilação e elementos básicos de uma válvula fotomultiplicadora.	22
Figura 2.1 - Sistema convencional de coincidência.....	29
Figura 2.2 - Sistema TAC de coincidência.	31
Figura 2.3 - Sistema de coincidência por <i>software</i>	32
Figura 2.4 - Sistema II de coincidência $4\pi\beta\text{-}\gamma$	33
Figura 2.5 - Contador proporcional, esquema em corte transversal da vista frontal.	34
Figura 2.6 - Contador proporcional do LMN. As fotos (a) e (b) correspondem a uma das metades do conjunto.....	35
Figura 2.7 - Prateleira deslizante para inserção da fonte radioativa.	35
Figura 2.8 - Fonte de alta tensão para polarização do detector proporcional $4\pi\beta$	37
Figura 2.9 - Fonte de alta tensão para polarização dos cintiladores de NaI(Tl). ...	38
Figura 2.10 - Pré-amplificador ORTEC 109PC utilizado no detector proporcional.	38
Figura 2.11 - Pré-amplificador dos cintiladores de NaI(Tl).	39
Figura 2.12 - Amplificadores de espectroscopia (a) Ortec e (b) Camberra.	40
Figura 2.13 - Bastidor BIN.....	41
Figura 2.14 - Somador dos 2 cintiladores de NaI(Tl).....	41
Figura 2.15 - Gerador de pulsos de precisão.	42
Figura 2.16 - Fonte de ^{60}Co , destinada a medidas no sistema de coincidência....	44

Figura 3. 1 - Sistema de aquisição de dados (DAQ).....	50
Figura 3. 2 - Placa de aquisição – NI PCI-6132.....	51
Figura 3. 3 - Painel de conexão BNC-2110.....	53
Figura 3. 4 - Cabo de conexão SH-68-EP.....	53
Figura 3. 5 - SH-68-EP conectado à PCI6132, inserida no microcomputador.	54
Figura 3. 6 - Cabo SH-68-EP conectado no painel de conexões BNC-2110.	54
Figura 3. 7 - Diagrama em blocos das placas NI PCI6132 / NI PCI6133.....	55
Figura 3. 8 - Conector da placa NI PCI-6132.....	56
Figura 3. 9 - Painel frontal do sistema de aquisição de dados.....	58
Figura 3.10 - Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados.....	60
 Figura 4.1 - Sistema eletrônico auxiliar.....	 63
Figura 4.2 - Tensão de entrada (Máxima e Mínima.) dos canais analógicos.	65
Figura 4.3 - Ajuste do tempo de aquisição e indicador do tempo corrente.	66
Figura 4.4 - Discriminação do ruído.....	66
Figura 4.5 - Taxa de contagem e taxa de amostragem.....	66
Figura 4.6 – Diagrama de ocorrências no intervalo de 1 ms dos canais β (A0), γ (A1) e pulsador nuclear (A2).....	67
 Figura 5.1 - Espectro de altura de pulso da via β	 70
Figura 5.2 - Espectro de altura de pulso da via γ	70
Figura 5.3 – Comportamento do tempo real de contagem como função do número de pulsos de entrada no canal.	73
Figura 5.4 - Espectros beta (a) e gama (b) obtidos na padronização do ^{60}Co , indicando a saturação dos pulsos.....	74
Figura 5.5 – Saída do amplificador de espectroscopia do canal β , (a) pulsos normais e bem definidos e (b) pulsos empilhados.....	75
Figura 5.6 – Sinal da saída do amplificador de espectroscopia do canal β com degradação dos picos.....	75

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1.1 - Energias e intensidades para as radiações principais provenientes da desintegração do ^{60}Co	12
Tabela 5.1- Fragmento do arquivo de dados de aquisição do canal β	68
Tabela 5.2 - Fragmento do arquivo de dados de aquisição do canal γ	69
Tabela 5.3 - Fragmento do arquivo de dados do pulsador de 60 Hz.	69
Tabela 5.4 - Fragmentos de arquivos da medida da radiação de fundo (BG) dos canais β e γ	71
Tabela 5.5 - Sincronismo dos canais β (Canal 0) e γ (Canal 1).	72
Tabela 5.6 - Resultados dos três sistemas de medida de coincidência (convencional, TAC e SCS).	73
Tabela 5.7 - Fragmento do arquivo de dados do ^{60}Co , mostrando no caso (a) pulsos normais, (b) pulsos saturados e (c) pulsos empilhados.	74
Tabela 5.8 - Resultados dos três sistemas de medida de coincidência (convencional, TAC e SCS) com o TMS.	76

INTRODUÇÃO

Define-se a radiação como sendo ondas eletromagnéticas, ou partículas que carregam energia e que, quando interagem com um meio material, podem produzir variados efeitos sobre ele. Existem vários tipos de radiação, como as partículas alfa, beta, elétrons, nêutrons, ou ondas eletromagnéticas como os raios X e gama. Podem ser originadas de fontes naturais ou produzidas artificialmente, por meio de dispositivos construídos pelo homem, tais como os aceleradores de partículas e reatores nucleares.

A radiação é um fenômeno físico capaz de ser mensurado. Medir este fenômeno corresponde a compará-lo com outro de mesma espécie, adotado como padrão ou unidade de medida. Os sistemas de medida utilizados devem ser calibrados, de acordo com os padrões adotados. Os sistemas de padronização podem ser: primários, secundários, terciários, etc.

Os sistemas primários normalmente possuem maior exatidão, sendo utilizados também para a calibração de sistemas secundários, que por sua vez calibram os terciários, etc. Formando uma cadeia de rastreabilidade metrológica.

O método de medida absoluta de atividade de radionuclídeos por coincidência $4\pi\beta\text{-}\gamma$ é considerado como padrão primário, em razão de seu alto grau de exatidão e por depender apenas de grandezas observáveis [1-10].

Os sistemas de medida secundários e terciários necessitam de fontes padrão ou de outros sistemas pré-calibrados, para que se possa efetuar a sua própria calibração. Nestes sistemas, torna-se necessário efetuar uma calibração para cada tipo de radionuclídeo [11].

O método de coincidência apresenta vantagens em relação aos demais métodos, sendo aplicável a um maior número de radionuclídeos, incluindo-se

aqueles que apresentem esquemas de desintegração complexos, desde que ocorram transições com emissão de dois ou mais tipos de radiação (β - γ , RX- γ ou α - γ) [10].

A motivação do presente trabalho é o desenvolvimento de um novo sistema de aquisição de dados que permita o registro simultâneo da amplitude e do instante de ocorrência do pulso de origem nuclear. Deste modo, a análise dos dados arquivados em disco pode ser feita após a medida estar concluída, usando um programa especialmente concebido para análise. Como o sistema contém todas as informações dos eventos necessárias para análise, a curva de extrapolação para a obtenção da atividade pode ser obtida em uma única medida, tornando a medida muito mais rápida e simples. Além disso, este procedimento faz com que o número de intervenções do experimentalista seja minimizado, possibilitando uma redução nas fontes de erro experimentais.

O presente trabalho descreve um novo sistema de coincidência por software instalado no Laboratório de Metrologia Nuclear (LMN), do IPEN-CNEN/SP em São Paulo, Brasil. A simplicidade e o baixo custo, associados a um bom desempenho e confiabilidade, são referências para o desenvolvimento deste projeto.

No Capítulo 1 são apresentados os fundamentos teóricos, descrevendo os principais tipos de desintegração radioativa, o radionuclídeo ^{60}Co , a interação da radiação com a matéria, o princípio de funcionamento dos detectores de radiação, o método de coincidência $4\pi\beta$ - γ para a medida da atividade e a técnica da extrapolação linear da eficiência.

O Capítulo 2 descreve os materiais e métodos utilizados neste trabalho, apresenta o sistema de coincidência $4\pi\beta$ - γ do LMN do IPEN, os detectores utilizados e os três métodos para obter a atividade do radionuclídeo: sistema convencional, sistema TAC (*Time to Amplitude Converter*) e Sistema de Coincidência por *Software* (SCS).

O Capítulo 3 apresenta em detalhe o SCS: descrição, processo de desenvolvimento e sua comparação com os sistemas de coincidência por *software* encontrados na literatura.

O Capítulo 4 descreve a parte experimental, estabelecendo as condições de medida tanto da via β como da via γ para os sistemas de medidas: convencional, TAC e SCS.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos pelo método do SCS, comparado com os resultados do sistema convencional e sistema TAC, métodos que apresentam resultados consistentes em comparações internacionais.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do presente trabalho e indica os possíveis trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos.

OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho foi desenvolver um sistema de aquisição de dados desenvolvido para a aplicação em medidas de coincidência $4\pi\beta\text{-}\gamma$, que permite o registro simultâneo da amplitude e do instante de ocorrência dos pulsos de detecção de radiação. Este sistema, denominado de Sistema de Coincidência por *Software* (SCS), é baseado em técnicas de *software* similares a sistemas apresentados na literatura, como o *Digital Coincidence Counting* [12] e o *Software Coincidence Counting* [13]. Nestes sistemas, não há registro prévio das informações de coincidências. As informações de cada pulso – altura e instante de detecção – são registradas por meio de uma placa de aquisição de sinais analógicos provenientes dos detectores de radiação, que efetua a conversão analógico-digital (conversão A/D, realizada por dispositivos eletrônicos capazes de produzir uma representação digital de uma grandeza analógica). Esta placa é inserida em um microcomputador PC (*slot PCI*). Os dados convertidos são armazenados e, posteriormente processados, por *software*.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão abordados os fundamentos teóricos relacionados ao conceito de desintegração radioativa; interação da radiação com a matéria; detectores de radiação; método de coincidência $4\pi\beta\text{-}\gamma$ e técnica da extrapolação linear da eficiência.

1.1. Desintegração radioativa

A estabilidade de um núcleo atômico é resultado do equilíbrio entre as forças nucleares e as de repulsão eletrostática. Quando há um desequilíbrio entre essas forças, ocorre a instabilidade do núcleo. Nesta situação, o núcleo procura atingir o estado de maior estabilidade, emitindo partículas (α , β , etc.) ou radiações eletromagnéticas (radiação γ). Este processo de transmutação, conhecido como desintegração radioativa, implica na diminuição gradual de massa e da atividade radiativa[14].

Ao decair, os núcleos radioativos, denominados núcleos-pais, podem transformar-se em outro nuclídeo: o núcleo filho. Este núcleo pode ser gerado no seu estado fundamental, ou em um de seus níveis de excitação, caso em que novas emissões radioativas são necessárias, para que o estado fundamental seja atingido [15].

A desintegração nuclear pode fornecer informações sobre as espécies nucleares, e seus esquemas de desintegração, tais como os níveis de energia das transições, meias-vidas e spins nucleares.

1.1.1. Leis da desintegração

As forças de interação próton-próton (p-p), nêutron-nêutron (n-n) e próton-nêutron (p-n) são semelhantes, existindo uma forte tendência para os núcleos apresentarem igual número de prótons e nêutrons. Entretanto, existe uma repulsão Coulombiana nas interações p-p e, conseqüentemente, em núcleos mais pesados, sempre há um excesso de nêutrons, para garantir a coesão nuclear. Os núcleos contendo números pares de prótons e de nêutrons são mais abundantes e mais estáveis do que núcleos contendo números ímpares de prótons ou nêutrons [16].

A instabilidade nuclear aumenta na mesma proporção do crescimento do número de nucleons, e pode originar desintegração ou até mesmo fissão nuclear. A desintegração radioativa ocorre pela emissão de partículas alfa (núcleos de hélio – ${}^4\text{He}^{++}$), partículas beta (elétrons originados no núcleo) e fótons gama e X. Os núcleos que apresentam este processo foram denominados radioativos, por Marie Curie. A desintegração radioativa obedece a uma lei exponencial, do tipo:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.1)$$

onde,

N_0 : é o número de átomos radioativos no instante $t=0$;

λ : é a constante de desintegração.

Define-se a meia-vida do processo, $t_{1/2}$, como o tempo necessário para que a quantidade de átomos radioativos reduz-se à metade. A partir desta definição, conclui-se que:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1.2)$$

1.1.2. Desintegração alfa

A partícula alfa, é constituída de 2 prótons e 2 nêutrons (núcleo de ${}^4\text{He}$), num total de 4 nucleons, e grande quantidade de energia, produzindo-se um novo elemento situado no lugar Z-2 da Tabela Periódica. Em geral, os núcleos alfa emissores tem número atômico elevado (Z maior que 82) [17].

1.1.3. Desintegração beta

A desintegração beta corresponde à emissão de elétrons pelo núcleo. Estes elétrons podem ser negativos (β^-) ou positivos (β^+). Ao emitir uma partícula β^- , um nêutron transforma-se em um próton e o número atômico, Z, aumenta em uma unidade. Na emissão β^+ , um próton transforma-se em nêutron, com a diminuição de Z, em uma unidade. Em ambos os casos, o número de massa permanece inalterado. Tal desintegração é característica de núcleos leves, sendo a mais comum entre os elementos que buscam a estabilidade [18,19].

- **Emissão beta negativo (β^-)**

É comum em núcleos em que haja excesso de nêutrons. Neste processo, um nêutron transforma-se em um próton, uma partícula beta negativa e um anti-neutrino:

Como se pode observar, o número de prótons no núcleo aumenta de uma unidade, enquanto que o número de massa permanece o mesmo, pois deixa de existir um nêutron:

onde:

$\bar{\nu}$: é o neutrino;

Q: é a energia liberada no processo.

- **Emissão de pósitron (beta positivo, β^+)**

O pósitron, ou anti-elétron, tem a mesma massa do elétron e a mesma carga em valor absoluto, porém, de sinal contrário (elétron positivo). Essa desintegração é chamada de emissão de pósitron ou emissão beta positivo (β^+). Neste caso, um próton do núcleo se transforma num nêutron, o pósitron emitido e um neutrino:

A desintegração pode ser descrita por:

O pósitron emitido recombina-se com um elétron do meio, aniquilando-se mutuamente, emitindo energia na forma de dois fótons de 511 keV cada um. O processo de aniquilação será posteriormente descrito.

1.1.4. Desintegração por captura eletrônica

Embora não seja um processo essencialmente nuclear, essa transmutação, que na realidade é uma reação de absorção, pode ser tratada como desintegração porque envolve o núcleo atômico. Este processo de desintegração ocorre quando um núcleo instável, com excesso de prótons, captura um elétron orbital, geralmente da camada K. Desta forma, um próton se transforma em nêutron:

Esta desintegração pode ser assim esquematizada:

Após esse processo, ocorre emissão de radiação eletromagnética, em geral, raios-X em virtude do preenchimento sucessivo de vacâncias eletrônicas por elétrons de órbitas mais externas [20].

1.1.5. Transições gama

Quando um núcleo decai por emissão alfa ou beta, geralmente, o núcleo resultante tem seus nucleons fora da configuração de equilíbrio, ou seja, contém ainda um excesso de energia temporário. Para atingir o estado fundamental, a energia excedente é emitida sob a forma de fóton, denominado radiação γ .

A energia da radiação gama é bem definida e depende somente dos valores inicial e final de energia da transição, conforme expressão abaixo:

$$E_\gamma = E_i - E_f = h\nu \quad (1.9)$$

onde:

h = constante de Planck = $6,6252 \cdot 10^{-34}$ J.s;

ν = frequência da radiação.

Os raios γ não tem carga elétrica, sendo semelhantes aos raios-X, mas normalmente com comprimento de onda menor. As propriedades físicas dos raios-gama, inclusive a sua interação com a matéria, são similares às dos raios-X. A diferença fundamental está na origem de ambos. Enquanto os raios γ provêm do núcleo, os raios-X se originam das órbitas eletrônicas, não ocasionando alteração nos valores de Z e A [17].

- **Processo de conversão Interna**

O processo de conversão interna compete com a emissão de radiação gama e consiste na transferência da energia de excitação nuclear para elétrons das primeiras camadas, por meio de interação coulombiana, arrancando-os de seus orbitais com a energia dada pela diferença entre a energia de excitação E_{EX} do átomo e a energia de ligação do elétron à eletrosfera E_B [17]:

$$E_e = E_{EX} - E_B \quad (1.10)$$

onde:

E_{EX} é a energia de excitação transferida ao elétron ejetado, em forma de energia cinética;

E_B é a energia de ligação na camada em que estava o elétron ejetado.

Estes elétrons são monoenergéticos e a relação entre o número de elétrons de conversão por segundo (N_{ec}) e número de fótons por segundo (N_γ) é chamada de coeficiente de conversão interna total (α). O coeficiente de conversão interna total (α_T) é dado por:

$$\alpha_T = \frac{N_{ec}}{N_\gamma} \quad (1.11)$$

e

$$\alpha_T = \alpha_K + \alpha_L + \text{etc} \quad (1.12)$$

Onde:

α_K , α_L , etc, são os coeficientes de conversão interna para as camadas K, L, etc.

- **Emissão de Elétrons-Auger**

A emissão de Elétrons-Auger ocorre quando uma vacância é criada nas camadas eletrônicas, por exemplo, através de um processo de captura eletrônica. Normalmente, esta vacância será preenchida por um dos outros elétrons localizados em camadas mais externas, dando origem à emissão de raios-X característicos. Em alguns casos, entretanto, a energia disponível no átomo, devida ao aparecimento da vacância, pode ser transferida diretamente a outro elétron orbital, que é ejetado do átomo, o elétron Auger.

1.1.6. Características do radionuclídeo utilizado no presente trabalho: ^{60}Co

Este radionuclídeo decai principalmente pela emissão de partículas beta de energia máxima de 318 keV, seguida por dois fótons gama em cascata com energias de 1173 keV e 1332 keV, como pode ser visto na FIG. 1.1.

Na TAB. 1.1 encontram-se as energias, as probabilidades mais intensas de emissão e o coeficiente de conversão interna (α_t). [21].

Figura 1.1 - Esquema de desintegração do ^{60}Co .

Tabela 1.1 - Energias e intensidades para as radiações principais provenientes da desintegração do ^{60}Co .

	Energia (keV)	Probabilidade de Emissão (%)	α_t
β^-_2	$317,89 \pm 0,11$	$99,92 \pm 0,03$	
γ_4	$1173,239 \pm 0,004$	$99,91 \pm 0,02$	$(1,67 \pm 0,04) \times 10^{-4}$
γ_5	$1332,503 \pm 0,005$	$99,9989 \pm 0,0006$	$(1,27 \pm 0,04) \times 10^{-4}$

1.2. Interação da radiação com a matéria

Como visto, o núcleo atômico de um elemento radioativo decai basicamente por emissão de três tipos de radiação, partículas alfa (α) ou beta (β) e os fótons gama (γ). Existem algumas diferenças básicas entre a natureza destas emissões. Partículas alfa e beta possuem massa de repouso, ao passo que a radiação gama não, podendo, portanto, propagar-se à velocidade da luz no vácuo ($\sim 300000 \text{ km/s}$) [18].

As formas como esses três tipos de radiação interagem com a matéria são bastante distintas. As partículas α e β dissipam sua energia no meio material através de colisões, ionizando ou excitando os átomos constituintes desse meio.

Fótons gama podem interagir de várias formas, sendo três interações mais representativas, utilizadas como princípio para a detecção gama: efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares.

1.2.1. Partículas carregadas

Partículas carregadas pesadas, tais como as partículas alfa, interagem com a matéria principalmente através de forças Coulombianas entre a sua carga positiva e a carga dos elétrons orbitais do meio absorvedor, sendo a velocidade do projétil $v_p(\alpha \sqrt{E})$, o parâmetro determinante no processo de freamento [9]. O processo dominante é o de colisão íon-átomo, com a transferência da energia do íon para o meio, em processos de ionização e excitação dos elétrons atômicos.

Em razão da grande diferença de massas, a transferência de energia do íon para o meio dá-se em pequenas quantidades e com um grande número de colisões, até que o íon seja completamente freado. Um íon altamente energético ($v_p \gg v_e$), onde v_e é a velocidade dos elétrons nas camadas externas do alvo, ao penetrar num meio material, adquire um alto estado de ionização, independente de seu estado inicial. À medida que o íon perde velocidade, a probabilidade de captura de elétrons orbitais aumenta e o íon é neutralizado. Quando a velocidade do íon é bastante baixa ($v_p \ll v_e$), as colisões elásticas átomo-átomo começam a ser dominantes, dando origem a espalhamentos a grandes ângulos.

Os processos de perda de energia por colisões inelásticas com elétron (freiamento eletrônico) e por colisões elásticas átomo-átomo (freiamento nuclear) são basicamente independentes, de modo que a taxa de perda de energia por unidade de comprimento pode ser expressa como a soma das duas contribuições:

$$\frac{dE}{dx} = S_e(V_p) + S_n(V_p) \quad (1.13)$$

onde,

$S_e(v_p)$: freiamento eletrônico;

$S_n(v_p)$: freiamento nuclear.

Uma partícula β^- pode perder uma grande fração de sua energia numa única colisão com um elétron atômico (ionização), sendo desviadas muito mais facilmente pelos núcleos do que as partículas α . Partículas β^- de alta energia, passando próximo ao campo coulombiano de um núcleo atômico, perdem energia em forma de radiação eletromagnética de espectro contínuo, chamada de radiação de *Bremsstrahlung* ou radiação de freiamento. O efeito depende do número atômico do absorvedor, conforme expressa a equação 1.14:

$$\frac{\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\text{rad.}}}{\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\text{ioniz.}}} = \frac{T.Z.}{800} \quad (1.14)$$

onde:

T: energia cinética da partícula β (em MeV);

Z: número atômico do absorvedor.

Para o chumbo ($Z=82$), a perda de energia por *Bremsstrahlung* é dominante para energias de elétron acima de 9,6 MeV.

1.2.2. Fótons

Existem várias formas de interações dos raios gama com a matéria. Os três mecanismos mais importantes são: Efeito Fotoelétrico, Efeito Compton e Produção de Pares. A probabilidade de ocorrência destes processos de interação está relacionada diretamente com o número atômico do meio e a energia do gama incidente, como apresentado na FIG. 1.2 [22].

Todos esses processos de interação produzem uma transferência completa ou parcial da energia de um fóton para um elétron do meio absorvedor.

Figura 1.2 - Predominância dos três tipos de interação dos fótons com a matéria, em relação à energia do fóton incidente e número atômico, Z, do meio.

- **Efeito fotoelétrico**

No efeito fotoelétrico, o fóton é completamente absorvido e toda sua energia $E = h\nu$ é transferida a um elétron ligado ao átomo. O elétron é arrancado com energia cinética inicial E_e igual à diferença entre a energia do fóton e a energia de ligação do elétron ao átomo, b_e , conforme a expressão abaixo:

$$E_e = h\nu - b_e \quad (1.15)$$

O efeito fotoelétrico ocorre preferencialmente com elétrons da camada K, que estão mais fortemente ligados ao núcleo (115 keV no Urânio, 7,1 keV no Ferro e 0,28 keV no Carbono). A vacância na camada K é preenchida por outro elétron proveniente de camada mais externa, havendo a emissão de raio-X ou de um elétron Auger.

- **Efeito Compton**

O efeito Compton, ilustrado na FIG. 1.3, é uma interação entre o fóton e um elétron de energia de ligação muito baixa ou quase livre. Considera-se quase livre, um elétron que possua uma energia de ligação muito pequena, com relação à energia do fóton incidente. O espalhamento Compton, ao contrário da absorção fotoelétrica, geralmente envolve elétrons das camadas mais externas do átomo, sendo mais provável à medida que a energia do fóton aumenta. No processo Compton, o fóton incidente cede ao elétron parte de sua energia $h\nu$, adquirindo uma nova frequência ν^* , menor que a frequência inicial. No processo de colisão com o elétron, ocorre um desvio na trajetória do fóton incidente.

O ângulo de espalhamento, θ , é aquele formado entre as direções de propagação original e final do fóton. O elétron, por sua vez, adquire energia cinética, movendo-se em uma direção que forma um ângulo ϕ , relativa à direção inicial do fóton. As trajetórias do fóton, inicial e final, e do elétron espalhado são coplanares.

Figura 1.3 - Representação do efeito Compton

Aplicando-se os princípios de conservação da energia e do momento para a colisão, deduz-se que:

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (1.16)$$

onde m_0 é a massa de repouso do elétron e c a velocidade da luz no vácuo

Pela equivalência entre massa e energia, pode-se calcular que $m_0 c^2 = 0,511 \text{ MeV}$.

A energia do elétron Compton é dada por:

$$E_c = E_\gamma - E'_\gamma = \frac{E_\gamma^2 (1 - \cos \theta)}{E_\gamma (1 - \cos \theta) - m_0 c^2} \quad (1.17)$$

As energias cinéticas dos elétrons espalhados na colisão Compton variam de zero ($\theta = 0^\circ$; $\phi = 90^\circ$) até um valor máximo, E_{cm} ($\theta = 180^\circ$; $\phi = 0^\circ$) dado por:

$$E_{cm} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_0 c^2}{2E_\gamma}} \quad (1.18)$$

Dois casos extremos podem ser verificados com as equações acima:

- Um ângulo de espalhamento rasante do fóton, ou seja, $\theta \approx 0$. As equações fornecem que $h\nu^* \sim h\nu$ e $E_c \sim 0$. Nesta situação, o elétron que interagiu com o fóton tem uma energia pequena e o fóton espalhado tem, aproximadamente, a mesma energia do fóton incidente.
- Uma colisão frontal do fóton, ou seja, $\theta = \pi$. Neste caso, o fóton é espalhado para trás na mesma direção de sua incidência. Este extremo representa o máximo de energia que pode ser transferido a um elétron, numa interação Compton (equação 1.18).

- **Produção de pares**

Na produção de pares, o fóton interage com o campo de força nuclear do átomo alvo e desaparece totalmente, ocorrendo a criação de um par elétron-pósitron, conforme ilustrado na FIG. 1.4. Portanto, trata-se de uma transformação de energia em matéria de acordo com a fórmula de equivalência de Einstein ($E = mc^2$). A energia $2 m_0c^2 = 1,022 \text{ MeV}$ é limiar para o processo, sendo esta energia equivalente à da massa de repouso correspondente ao par elétron-pósitron.

Os pares produzidos perdem sua energia no meio e o pósitron recombina-se com um elétron do mesmo aniquilando-se mutuamente, dando origem a dois fótons, conforme esquematizado na FIG. 1.4.

Figura 1.4 - Processo de aniquilação de pares.

A energia cinética do elétron negativo e a do pósitron são iguais e pode ser dada por:

$$E_{e-} = E_{e+} = \frac{E_{\gamma} - 2m_0c^2}{2} \quad (1.19)$$

No final do percurso, o pósitron produzido na interação irá interagir com um elétron do meio, resultando na aniquilação de ambos, e produzindo-se dois fótons de aniquilação. Cada um desses fótons possui uma energia de 0,511 MeV, podendo escapar do meio material, ou podem ser absorvidos no mesmo meio, pelos processos Compton ou fotoelétrico.

1.3. Detectores de radiação

O princípio da detecção das radiações ionizantes baseia-se nas interações da radiação com um meio sensível, denominado detector. De alguma maneira, a energia transferida ao volume sensível é utilizada na indução de transformações físicas ou químicas do próprio meio detector, ou para produzir sinais elétricos ou luminosos. Por meio da quantificação das transformações materiais ou das intensidades dos impulsos elétricos – tensão, corrente ou carga – ou luminosos, é possível estimar, de forma indireta, a quantidade da radiação incidente (energia, taxa, etc).

Dentre os processos mais utilizados, situam-se os que envolvem a geração de cargas elétricas, a geração de luz, a sensibilização de películas fotográficas, a criação de traços no material, a geração de calor, alterações da dinâmica de certos processos químicos.

Um sistema detector deve ser selecionado de acordo com a classe da radiação a ser medida (tipo, intensidade, energia, etc), devendo, ainda, apresentar características tais como repetitividade, reprodutibilidade, estabilidade, eficiência, resolução energética, exatidão e precisão. Normalmente, um detector satisfaz, em maior ou menor grau, apenas algumas das características apontadas. A seguir, descrevem-se os princípios dos sistemas detectores relevantes a este trabalho.

● Detector proporcional a gás

Nos detectores proporcionais a gás, a interação das radiações com os gases provoca principalmente excitação e ionização dos seus átomos ou moléculas. No processo de ionização, formam-se pares elétron-íon que dependem das características dos gases utilizados e da radiação ionizante. A coleta dos elétrons e dos íons formados no volume sensível do detector é feita por meio de campos elétricos. Os sinais elétricos resultantes possibilitam à medida

indireta da radiação incidente. Detectores em geometria 2π e 4π são de grande utilidade em metrologia das radiações. Uma esquematização destas geometrias é apresentada na FIG. 1.5. Para os detectores 4π a fonte é totalmente inserida dentro do volume sensível, o que permite uma eficiência de contagem próxima de 100% para elétrons, pósitrons e partículas alfa de alta energia [20].

Os detectores proporcionais são convenientes para as medições onde o número de pares de íons é muito pequeno para permitir uma operação satisfatória com uma câmara de ionização. Nas câmaras de ionização, uma dada quantidade de energia ionizante é convertida em um número médio de pares de íons. Nos contadores proporcionais, em razão dos campos elétricos serem mais intensos, os elétrons produzidos na ionização primária são fortemente acelerados, de forma a promover novas ionizações em seu percurso, em um efeito cascata. Assim, a quantidade inicial de íons é multiplicada por um fator médio de proporcionalidade (que lhe empresta o nome), sendo, portanto, adequados à detecção e espectroscopia de raios-X, elétrons e partículas alfa [17].

Figura 1.5 - Esquema dos contadores proporcionais em geometria 2π e 4π .

● Cintilador de NaI(Tl)

A detecção de radiações ionizantes por meio da luz produzida pela cintilação em determinados materiais é uma das técnicas mais antigas. O processo de cintilação é um dos métodos mais úteis para detecção e espectroscopia de uma ampla variedade de radiações. Existem vários tipos de cintiladores disponíveis, sendo considerados os mais eficientes na medida de raios γ , além de possibilitar a medida de partículas α e β [23].

A luz produzida por cintilação é convertida em sinais elétricos, em uma válvula eletrônica especial, denominada fotomultiplicadora, ao incidir em um catodo fotossensível. Elétrons são liberados no catodo. Através de uma série de anodos consecutivos, conectados a potenciais crescentes, os elétrons iniciais são acelerados, sendo então multiplicados por um fator de $10^5 - 10^7$. Os sinais elétricos produzidos alcançam intensidades convenientes ao processamento, em sistemas de contagem ou de espectroscopia. Este processo é ilustrado na FIG. 1.6. A quantidade de luz produzida no cintilador e o conseqüente número de elétrons fotomultiplicados dependem da energia da radiação incidente, sendo possível quantificar a sua intensidade, bem como a energia depositada no meio cintilador.

As vantagens do contador de cintilação são: tempo morto baixo, grande durabilidade, proporcionalidade entre energia e altura de pulso e alta eficiência intrínseca para radiação γ , podendo-se estimá-la entre 40 a 100%, dependendo da energia [17,24].

Figura 1.6 - Detector de cintilação e elementos básicos de uma válvula fotomultiplicadora.

1.4. Método de coincidência $4\pi\beta\text{-}\gamma$ para medida da atividade

O método de coincidência foi desenvolvido nos anos 60 para a padronização de radionuclídeos que decaem por emissão de partículas beta (ou captura eletrônica) seguidas pela emissão de radiação gama [4, 24].

O sistema utilizado neste trabalho é constituído por um detector proporcional em geometria 4π , para a detecção de elétrons e raios-X, acoplado a um espectrômetro gama que utiliza 2 detectores de cintilação NaI(Tl), além de uma placa de aquisição de dados para registrar os dados em arquivos no formato ASCII. Registram-se em um microcomputador, de modo independente, informações dos canais β , γ e de um gerador de pulsos de referência. Através de um *software* para análise dos dados arquivados é possível obter-se a atividade da fonte radioativa.

Abaixo estão indicadas as equações representando um caso simples: uma partícula β seguida de uma radiação γ :

$$N_{\beta} = N_0 \varepsilon_{\beta} \quad (1.20)$$

$$N_{\gamma} = N_0 \varepsilon_{\gamma} \quad (1.21)$$

$$N_C = N_0 \varepsilon_{\beta} \varepsilon_{\gamma} \quad (1.22)$$

onde:

N_0 é a taxa de desintegração da fonte;

N_{β} é a taxa de contagem obtida na via beta;

N_{γ} é a taxa de contagem obtida na via gama;

ε_{β} é a probabilidade de detecção na via β ;

ε_{γ} é a probabilidade de detecção na via γ ;

N_C são as taxas de coincidência, correspondendo ao produto das probabilidades de detecção beta e gama.

Multiplicando-se N_{β} por N_{γ} e dividindo-se por N_C , tem-se:

$$\frac{N_{\beta} N_{\gamma}}{N_C} = N_0 \quad (1.23)$$

Pode-se então, em princípio, obter a atividade N_0 sem o conhecimento das eficiências dos detectores de radiação β e γ para as energias das radiações consideradas.

1.4.1. Técnica da extrapolação linear da eficiência

Geralmente, os radionuclídeos apresentam esquemas de desintegração complexos, envolvendo mais de dois tipos de radiações contribuindo para a taxa de contagem. Ainda, devem-se considerar outros parâmetros, intrínsecos ao método de medida, como a sensibilidade dos detectores a outras radiações indesejáveis.

Para um caso prático, em que o radionuclídeo decai por β - γ com n ramos beta e P_r radiações gama para cada ramo beta [6], tem-se que:

$$N_\beta = N_0 \sum_{r=1}^n a_r \left[\epsilon_{\beta_r} + (1 - \epsilon_{\beta_r}) \sum_{s=1}^{P_r} b_{rs} \left(\frac{\alpha_{rs} \epsilon_{e_{rs}} + \epsilon_{\beta_{\gamma_{rs}}}}{1 + \alpha_{rs}} \right) \right] \quad (1.24)$$

$$N_\gamma = N_0 \sum_{r=1}^n a_r \sum_{s=1}^{P_r} b_{rs} \frac{\epsilon_{\gamma_{rs}}}{1 + \alpha_{rs}} \quad (1.25)$$

$$N_C = N_0 \sum_{r=1}^n a_r \epsilon_{\beta_r} \left[\sum_{s=1}^{P_r} b_{rs} \left(\frac{\epsilon_{\gamma_{rs}}}{1 + \alpha_{rs}} \right) + (1 - \epsilon_{\beta_r}) \sum_{s=1}^{P_r} b_{rs} \epsilon_{e_{rs}} \right] \quad (1.26)$$

onde:

- ϵ_{β_r} eficiência do detector beta para o r -ésimo ramo beta;
- $\epsilon_{\gamma_{rs}}$ eficiência do s -ésimo gama associado ao r -ésimo ramo beta;
- α_{rs} coeficiente de conversão interna total do s -ésimo gama associado ao r -ésimo ramo beta;
- $\epsilon_{e_{rs}}$ eficiência do detector beta para elétrons de conversão interna;
- $\epsilon_{\beta_{\gamma_{rs}}}$ eficiência do detector beta para a radiação gama;
- $\epsilon_{c_{rs}}$ probabilidade de se registrar uma coincidência quando o ramo beta não é detectado, ou coincidências γ - γ ;
- a_r abundância do r -ésimo ramo beta;
- b_{rs} abundância relativa do s -ésimo gama associado ao r -ésimo ramo beta.

Podem-se simplificar estas equações, omitindo-se as somatórias em S e as abundâncias relativas b_{rs} desde que elas sejam consideradas implícitas, de modo que:

$$N_{\beta} = N_0 \sum_{r=1}^n a_r \left[\epsilon_{\beta_r} + (1 - \epsilon_{\beta_r}) \left(\frac{\alpha_r \epsilon_{ec_r} + \epsilon_{\beta_r} \epsilon_{\gamma_r}}{1 + \alpha_r} \right) \right] \quad (1.27)$$

$$N_{\gamma} = N_0 \sum_{r=1}^n a_r \frac{\epsilon_{\gamma_r}}{1 + \alpha_r} \quad (1.28)$$

$$N_c = N_0 \sum_{r=1}^n a_r \left[\frac{\epsilon_{\beta_r} \epsilon_{\gamma_r}}{1 + \alpha_r} + (1 - \epsilon_{\beta_r}) \epsilon_{c_r} \right] \quad (1.29)$$

e a equação (1.23) passa a ser escrita como:

$$\frac{N_{\beta} N_{\gamma}}{N_c} = N_0 \frac{\sum_{r=1}^n a_r \left[\epsilon_{\beta_r} + (1 - \epsilon_{\beta_r}) \left(\frac{\alpha_r \epsilon_{ec_r} + \epsilon_{\beta_r} \epsilon_{\gamma_r}}{1 + \alpha_r} \right) \right] \sum_{r=1}^n a_r \frac{\epsilon_{\gamma_r}}{1 + \alpha_r}}{\sum_{r=1}^n a_r \left[\frac{\epsilon_{\beta_r} \epsilon_{\gamma_r}}{1 + \alpha_r} + (1 - \epsilon_{\beta_r}) \epsilon_{c_r} \right]} \quad (1.30)$$

Pela equação 1.30 conclui-se que para determinação de N_0 é necessário o conhecimento dos parâmetros do esquema de desintegração e das propriedades de detecção. Para solucionar este problema e manter a principal característica do método que consiste na sua independência do conhecimento das eficiências de detecção e dos parâmetros do esquema de desintegração foi desenvolvida a técnica de extrapolação linear da eficiência. Segundo esta técnica, a determinação de N_0 só será possível se houver uma relação funcional entre N_0 e o parâmetro de eficiência $\frac{N_c}{N_{\gamma}}$ tal que $N_{\beta} \rightarrow N_0$, quando $\frac{N_c}{N_{\gamma}} \rightarrow 1$ [6].

Esta condição ocorre quando as eficiências dos vários ramos beta, ϵ_{β_s} , podem ser representadas como uma função de uma eficiência única ϵ_{β_s} :

$$\epsilon_{\beta_s} = f_r(\epsilon_{\beta_s}) \quad (1.31)$$

Em que, $f_r \rightarrow 1$ quando $\epsilon_{\beta_s} \rightarrow 1$

Isto implica que os valores ϵ_{ec} , $\epsilon_{\beta_{\gamma}}$ e ϵ_{γ} , sejam constantes ou nulos. [6]

Na prática o parâmetro ϵ_{β_s} é extrapolado ao valor unitário, a partir de uma discriminação gradual em energia das partículas beta emitidas pelo radionuclídeo. Com isso pode-se escrever a equação de coincidência generalizada [6], dada por:

$$N_{\beta} = N_0 F \left[\frac{N_c}{N_{\gamma}} \right] \quad (1.32)$$

onde:

$$F \rightarrow 1 \text{ quando } \frac{N_c}{N_{\gamma}} \rightarrow 1.$$

Esta equação generalizada pode ser escrita de forma mais conveniente para uma solução gráfica utilizando-se a razão $\frac{N_{\beta} N_{\gamma}}{N_c}$ como variável dependente e $\frac{1-N_c}{N_{\gamma}} \frac{N_c}{(N_{\gamma})}$ como variável independente, obtendo-se a função G, que possui uma variação mais lenta com relação à função F:

$$\frac{N_{\beta} N_{\gamma}}{N_c} = N_0 G \left[\frac{1-N_c/N_{\gamma}}{N_c/N_{\gamma}} \right] \quad (1.33)$$

onde:

$$G \rightarrow 1 \text{ e } \frac{N_{\beta} N_{\gamma}}{N_c} \rightarrow N_0 \text{ quando } (1 - N_c/N_{\gamma})/(N_c/N_{\gamma}) \rightarrow 0 \quad (1.34)$$

O valor extrapolado obtido por ajuste polinomial dos dados experimentais fornece a taxa de desintegração N_0 .

A variação do parâmetro da eficiência pode ser obtida pelo uso de absorvedores externos, por auto-absorção na fonte, por discriminação eletrônica ou qualquer outro método que possibilite a variação da eficiência beta [11].

Esta função pode ser considerada aproximadamente linear em um intervalo limitado de variação do parâmetro da eficiência, e para espectros semelhantes dos grupos beta. Através de coeficiente angular dessa reta, pode-se determinar a correção para o esquema de desintegração. No caso geral, esta dependência não é linear e pode ser prevista pela simulação da curva, por meio do método de Monte Carlo [25].

A medida de coincidência é feita, selecionando-se o pico de absorção total para uma dada transição gama, em coincidência com uma emissão beta. Normalmente, a escolha recai nos gamas mais intensos e que apresentem menor coeficiente de conversão interna, resultando em uma reta com menor coeficiente angular e um coeficiente linear com menor incerteza.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados e as metodologias empregadas no sistema de coincidência $4\pi\beta\text{-}\gamma$, tanto para os sistemas de coincidência convencional, sistema TAC e SCS.

2.1. Sistemas de coincidência $4\pi\beta\text{-}\gamma$ do LMN do IPEN

Atualmente, o LMN do IPEN possui três sistemas de coincidência $4\pi\beta\text{-}\gamma$ dois constituídos por detectores proporcionais em geometria 4π , um a gás fluente e outro pressurizado, utilizados para detecção β e X [10,26]. No primeiro, denominado Sistema I, a detecção γ é realizada com um único cristal de NaI(Tl), enquanto no segundo, denominado Sistema II, são utilizados dois cristais de NaI(Tl). O terceiro é constituído por um cintilador plástico em geometria 4π , acoplado a um espectrômetro gama de NaI(Tl), Sistema III, [27].

Os três sistemas são protegidos externamente com paredes formadas por anéis de chumbo para a blindagem da radiação de fundo (*background* – Bg). O SCS pode ser utilizado com qualquer arranjo de detecção. Todas as medidas e dados do presente trabalho foram obtidos com o arranjo de detecção do Sistema II.

A eletrônica de cada sistema pode ser definida ou ajustada de acordo com as necessidades de cada medida. A padronização de radionuclídeos pode ser realizada com a eletrônica convencional, descrita no capítulo 2.2, ou com arranjos eletrônicos alternativos, como o sistema TAC, que utiliza um módulo conversor de tempo em amplitude de pulso (*Time to Amplitude Converter* – capítulo 2.3) associado a um Analisador Multicanal, para registro de dados. A eletrônica TAC tem sido utilizada como sistema primário de padronização do LMN. Por último, o sistema objeto deste trabalho, denominado de Sistema de Coincidência por *Software* (SCS), é detalhado no capítulo 2.4.

para uma operação adequada do módulo de coincidência. Este módulo deve produzir os pulsos de coincidências, quando aqueles provenientes de cada via estiverem, ambos, dentro de uma faixa de tempo pré-ajustado (tempo de resolução). Finalmente, os pulsos destes estágios são conectados a módulos contadores.

De modo análogo ao da via beta, os pulsos provenientes dos cristais cintiladores de NaI(Tl) são amplificados. Nesta via, utilizam-se dois detectores cujas saídas são enviadas a um somador, para aumentar a eficiência de contagem. Um analisador monocanal seleciona os pulsos dentro do intervalo de energia de interesse, correspondente aos picos de absorção total.

O tempo de resolução foi fixado eletronicamente por um módulo eletrônico semelhante ao da via beta, permitindo que os pulsos sejam enviados simultaneamente aos contadores gama e às vias de coincidência, sendo uma para cada energia gama.

A via de coincidência é formada por um módulo denominado *Universal Coincidence*, responsável por registrar os eventos provenientes das duas vias β e γ originados na mesma desintegração, sendo estabelecido um intervalo de tempo (tempo de resolução), onde os sinais são considerados coincidentes, e um contador inserido para o registro desses eventos.

O funcionamento do módulo de coincidência é similar a uma porta lógica “E”, registrando as coincidências apenas quando os pulsos provenientes das duas vias de detecção β e γ atingem a unidade no tempo pré-estabelecido por *hardware*, conhecido como tempo de resolução (τ_R).

O sistema tem um cronômetro digital permitindo um sincronismo nos tempos dos sinais adquiridos.

2.3. Sistema eletrônico *Time to Amplitude Converter* (TAC)

Este sistema utiliza o método TAC, desenvolvido no LMN, para registro das contagens em um analisador multicanal (Multi Channel Analyzer – MCA). Utiliza um módulo eletrônico (TAC) que faz a conversão de tempo em amplitude de pulso, para produzir um espectro que engloba as contagens de pulsos beta, gama e de coincidências [26]. O diagrama em blocos do TAC é mostrado na FIG. 2.2.

Figura 2.2 - Sistema TAC de coincidência.

Os pulsos provenientes do detector proporcional 4π (via β) e dos cristais cintiladores de NaI(Tl) (via γ) são tratados conforme descrito no sistema convencional. Na via de coincidência os pulsos são enviados para o módulo eletrônico TAC, este recebe as contagens provenientes de ambas as vias β e γ . Após seu processamento conjunto pelos módulos de porta e atraso, é conectado ao módulo TAC, um dos pulsos irá gerar o pulso de início (*start*) e o outro o pulso de término (*stop*), gerando o registro das contagens.

2.4. Sistema de coincidência por *software*

O sistema eletrônico de coincidência por *software* (SCS) baseia-se em técnicas de *software* similares aos dos sistemas *Digital Coincidence Counting* [12] e *Software Coincidence Counting* [13]. Utilizando uma placa de aquisição de dados, todos os pulsos provenientes dos detectores (β e γ) são registrados em arquivos de dados e posteriormente analisados por um *software* especialmente desenvolvido para determinar a atividade da fonte radioativa.

O SCS é apresentado no diagrama em blocos, FIG. 2.3, sendo constituído por uma unidade eletrônica de aquisição, um *software* de aquisição e pelo *software* de análise de dados.

Figura 2.3 - Sistema de coincidência por *software*.

Os pulsos provenientes do detector proporcional 4π (via β) e dos cristais cintiladores de NaI(Tl) (via γ), diferem na forma de serem processados, no

SCS a discriminação para rejeição do ruído eletrônico do detector proporcional é implementada por *software*, dispensando o uso de um monocal, de modo análogo é tratado os pulsos provenientes dos cristais cintiladores de NaI(Tl) que também não utilizam o monocal para selecionar os pulsos dentro do intervalo de energia de interesse, correspondente aos picos de absorção total, ficando esta função para o *software* de análise.

Neste sistema, não há registros prévio das informações de coincidências. As informações de cada pulso – altura e instante de ocorrência – são registradas em arquivos de dados, para análise posterior.

2.5. Detectores utilizados no Sistema II do LMN

O arranjo de detecção do Sistema II foi adotado neste trabalho por apresentar maior eficiência de detecção gama, contando com dois detectores de cintilação NaI(Tl), dispostos a 180° (FIG. 2.4).

Figura 2.4 - Sistema II de coincidência $4\pi\beta\text{-}\gamma$.

● Detector proporcional à gás do Sistema II

O detector é constituído por duas partes simétricas de latão com formato interno semi-cilíndrico. Internamente, há um anodo duplo de fio de aço inoxidável com diâmetro de 25 μm , ligado aos conectores de alta tensão e preso por esticadores de teflon, como mostrado na FIG. 2.5 [11].

A justaposição das duas partes forma um conjunto de um formato interno cilíndrico, com diâmetro de 3 cm e comprimento de 7,5 cm, como mostra a FIG. 2.6. Também de latão, uma placa deslizante que se encaixa entre as duas metades é utilizada para o posicionamento da fonte no interior do detector, sem a necessidade de abri-lo, como mostrado na FIG. 2.7. A vedação é feita com anéis de borracha (FIG. 2.6 a e b).

Figura 2.5 - Contador proporcional, esquema em corte transversal da vista frontal.

Figura 2.6 - Contador proporcional do LMN. As fotos (a) e (b) correspondem a uma das metades do conjunto.

Figura 2.7 - Prateleira deslizante para inserção da fonte radioativa.

O contador proporcional é preenchido com gás circulante de alta pureza, constituído de 90% de argônio e 10% de metano (P10), operando a pressão de 0,1MPa.

● Cintilador de NaI(Tl) do sistema II

Os cristais cintiladores de NaI, utilizados para detecção de radiação γ , são dopados com impurezas de Tálcio (Tl), possuindo dimensões de 76 mm x 76 mm, em formato cilíndrico.

Os fótons emitidos pela fonte radioativa absorvidos pelo cristal produzem excitações na estrutura cristalina. Ao retornar ao estado fundamental, a estrutura emite cintilações (fótons de luz) que, por sua vez, são transformadas em impulsos elétricos, por fotomultiplicadoras, como descrito anteriormente. O pulso elétrico possui informação sobre a energia dos fótons incidentes, uma vez que a intensidade de cintilação é proporcional à energia depositada pelo fóton gama no interior do cristal [11].

2.6. Arranjo eletrônico do Sistema de Coincidência por Software (SCS)

O arranjo eletrônico do SCS é bastante simples, necessitando apenas dos módulos eletrônicos essenciais à amplificação dos sinais de detecção e o somador dos pulsos dos cintiladores (γ_1 e γ_2). Nos sistemas convencional e TAC diversos módulos são necessários, exigindo ajustes precisos de *hardware*, para cada tipo de medida, enquanto que com o SCS todo ajuste pode ser efetuado na fase de análise, utilizando-se o programa de coincidência, especialmente desenvolvido para o sistema.

● Fonte de alta tensão (β)

O detector proporcional é alimentado por uma fonte de alta tensão Canberra [28], modelo 3106D apresentada na FIG. 2.8, ajustada para fornecer +2050 V_{DC}. Concebida para polarizar detectores semicondutores e contadores proporcionais, esta fonte fornece tensão de até 6 kV, sob correntes de até 300 μ A (utilizada principalmente em sistemas de detecção de alta resolução). A 3106D incorpora um circuito de proteção contra sobrecargas e curto-circuito, por período indefinido.

Figura 2.8 - Fonte de alta tensão para polarização do detector proporcional $4\pi\beta$.

- **Fonte de alta tensão (γ_1 e γ_2)**

A estabilidade dos pulsos de detecção NaI(Tl)/Fotomultiplicadora depende especificamente da estabilidade da fonte de polarização aplicada a γ_1 e γ_2 . Desta forma, o módulo de alta tensão deve possuir características especiais, como baixa ondulação (*ripple* ≤ 10 mV), baixo nível de ruído, alta estabilidade, boa regulação para variações de carga e capacidade para fornecer corrente suficiente para a operação apropriada da fotomultiplicadora, da ordem de 30mA. Uma fonte Fluke [29], modelo 415B, ajustada em $+1100V_{DC}$ foi empregada para esta tarefa, ilustrada na FIG. 2.9.

Figura 2.9 - Fonte de alta tensão para polarização dos cintiladores de NaI(Tl).

- **Pré-Amplificador (β)**

O pré-amplificador Ortec [30], modelo 109PC demonstrado na FIG. 2.10 é um equipamento que utiliza transistor de efeito de campo no estágio de entrada, apropriado aos contadores proporcionais, em aplicações como a detecção de raios-X de baixa energia, ou a espectrometria gama, onde a resolução deve se aproximar do limite teórico. O ganho do 109PC permite que o contador opere com sinais de amplitudes muito baixas. A resolução é adequada, devido ao baixo nível de ruído obtido com circuitos com transistores de efeito de campo.

Figura 2.10 - Pré-amplificador ORTEC 109PC utilizado no detector proporcional.

- **Pré-Amplificador (γ_1 e γ_2)**

Os pré-amplificadores proporcionam ótimo acoplamento entre a saída do detector e o restante do sistema, efetuando a amplificação inicial do sinal, sem inversão de fase. Os detectores fornecem pulsos de corrente, enquanto, à saída do pré-amplificador, pulsos lineares de tensão, com amplitudes entre 0 e +10 V, são obtidos. O tempo de subida do pulso de saída é da ordem de 100 ns, suficiente à coleta de cargas do detector. Para diminuir a probabilidade de captação de ruído, o cabo coaxial de ligação entre o detector e o pré-amplificador deve ser o mais curto possível. No sistema II são utilizados pré-amplificadores Ortec [30], modelo 276 apresentado na FIG. 2.11, que oferecem ótimo desempenho com os detectores de cintilação. Um conector permite a conexão de um pulsador para teste e calibração do sistema.

Figura 2.11 - Pré-amplificador dos cintiladores de NaI(Tl).

- **Amplificadores de espectroscopia (β , γ_1 e γ_2)**

Amplificadores espectroscópicos são utilizados em circuitos de medição de energia. O sinal do pré-amplificador é transformado por sucessivas diferenciações e integrações em um pulso aproximadamente gaussiano, de altura ajustável entre 0 e 10 V. As constantes de tempo de integração e diferenciação podem ser ajustadas em combinações denominadas tempo de conformação (*shaping time*), e que variam entre 0,5 a 10 μ s. No detector proporcional utiliza-se um modulo simples ORTEC [30], modelo 572A e nos cintiladores de NaI(Tl) são

utilizados dois módulos simples da Camberra modelo 2026, os dois equipamentos são apresentados na FIG. 2.12

(a)

(b)

Figura 2.12 - Amplificadores de espectroscopia (a) Ortec e (b) Camberra.

- **Bastidor NIM**

Módulos NIM (*Nuclear Instrumentation Modules*) são alojados em um bastidor (BIN), marca Ortec [30], modelo 4001D, ilustrado na FIG. 2.13, que fornece as tensões necessárias para o funcionamento dos módulos eletrônicos. Bastidores mais antigos fornecem +12 V, -12 V, +24 V, -24 V, 110 V_{AC} ou 220 V_{AC} dependendo da tensão da rede elétrica conectada e GND (*Ground*), bastidores mais novos fornecem também +6 V e -6 V.

Figura 2.13 - Bastidor BIN.

- **Somador de pulsos na via γ**

O módulo NIM Ortec [30], modelo 433 é um somador inversor/não inversor, de largura simples, ilustrado na FIG.2.14. É utilizado para somar os sinais dos dois cintiladores (γ_1 e γ_2), de modo a aumentar a eficiência de contagem da via γ .

Figura 2.14 - Somador dos 2 cintiladores de NaI(Tl).

- **Gerador de pulsos Nuclear**

O gerador de pulsos de precisão Ortec [30], modelo 419 ilustrado na FIG. 2.15, simula a detecção de uma reação nuclear, gera pulsos com largura ajustável entre 5 e 250 ns, polaridade configurável: positiva ou negativa, frequência de operação sincronizada com a rede elétrica ou gerada por um relé de mercúrio, funcionando de forma assíncrona.

Figura 2.15 - Gerador de pulsos de precisão.

- **Placa de aquisição**

A placa de aquisição de dados NI PCI6132 [31], efetua a aquisição simultânea de dados, em até quatro canais, com quatro conversores A/D (analógico/digital), a uma taxa de conversão de até 2,5 MS/s (*Mega samples per second* – milhões de amostragens por segundo), em cada canal. Os dados são armazenados em disco. A PCI6132 é instalada em um microcomputador com processador Pentium 4, de 2,8 GHz e 1 GB de memória RAM. O ambiente operacional utilizado é o Microsoft Windows XP Professional. No capítulo 3, a

descrição e características da placa e acessórios serão detalhadas incluindo figuras.

- **Painel de conexão**

A conexão entre os amplificadores de espectroscopia e a placa de aquisição de dados é feita através de um painel de conexões [31].

- **Cabo de conexão**

O cabo SH-68-EP [31] interconecta o painel de entrada e a PCI6132. Este cabo é fabricado com pares de fios individualmente trançados, para redução de indução cruzada (*crosstalk*), normalmente verificada em sinais de alta velocidade, em cabos com comprimento de 2 metros ou mais.

2.7. Preparação da fonte radioativa de ^{60}Co

As fontes radioativas são confeccionadas no Laboratório de Metrologia Nuclear (LMN), para serem medidas nos sistemas de coincidências, sendo que estas devem ser preparadas em substratos de filmes finos de Collodium (nitrato de celulose, com espessura de $\sim 10 \mu\text{g cm}^{-2}$), para atenuar a auto-absorção das partículas beta, são montadas sobre arandela de aço inoxidável com 0,2 mm de espessura, diâmetro interno vasado de 2 cm e externo de 4 cm. O conjunto é metalizado em ambos os lados com Au (espessura fina de $20 \mu\text{g cm}^{-2}$), para tornar a película polimérica condutora, de forma a homogeneizar o campo elétrico no interior do detector proporcional [21].

A FIG. 2.16 ilustra a fonte radioativa utilizada no sistema com número de identificação do LMN (nº 14.109), com data de referência em 09/09/2008 e massa de 1 g. O radionuclídeo utilizado para as medidas experimentais foi o ^{60}Co .

Figura 2.16 - Fonte de ^{60}Co , destinada a medidas no sistema de coincidência.

3. SISTEMAS DE COINCIDÊNCIA POR SOFTWARE

Na literatura [12, 13], foram propostos alguns sistemas de aquisição de dados por *software*, que possibilitam o registro simultâneo das amplitudes de pulso e dos instantes de ocorrência dos eventos de cada uma das vias, beta e gama; estes sistemas estão descritos nos Capítulos 3.2 e 3.3. O sistema proposto neste trabalho está descrito no Capítulo 3.4.

3.1. Coincidência por *software*

A vantagem deste método é a possibilidade de manipulação das informações, através de algoritmos e métodos estatísticos, podendo-se emular ou simular certos processos ou procedimentos experimentais. Como exemplo significativo pode-se citar a possibilidade de obtenção da curva de extrapolação, a partir de uma única medida. A variação da eficiência de contagem β é efetuada por *software*, diferentemente de um sistema convencional, onde se devem efetuar varias medidas, alterando-se fatores físicos que induzam a essa variação, tais como: níveis de discriminação β ou a inserção de atenuadores β junto à fonte radioativa. Os dados arquivados em disco podem ser utilizados para uma análise posterior ou como referência.

A coincidência por *software*, baseada em técnicas digitais, constitui uma solução para muitos problemas, reduzindo a quantidade de módulos eletrônicos, simplificando e agilizando os procedimentos necessários à implementação da técnica de coincidência, com grande confiabilidade e reduzindo o número de intervenções do experimentalista.

3.2. *Digital Coincidence Counting (DCC)*

O *Digital Coincidence Counting* (DCC) [12] representa uma nova técnica em Metrologia Nuclear, baseada no sistema de coincidência convencional (contagem analógica). Foi desenvolvida pela Australian Nuclear Science and Technology Organisation (ANSTO) em colaboração com o National Physical Laboratory (NPL) do Reino Unido.

O *hardware* deste sistema de aquisição foi desenvolvido utilizando dois canais de entradas analógicas com 12 bits de resolução, os pulsos provenientes dos detectores de radiação são digitalizados, sendo um detector proporcional $4\pi\beta$ para o canal β e dois cintiladores de NaI(Tl) para contagens γ . Os dados são armazenados em disco de alta velocidade, para posterior análise por *software*. A taxa de amostragem do sistema de aquisição é de 20 MS/s (20 milhões de amostragens por segundo) por canal e, uma taxa de transferência de dados de 30 kHz, entre o sistema de aquisição e o computador. Utilizando o DCC pode-se medir radionuclídeos com atividade de até 30 kBq, gerando arquivos de dados de até 2 GBytes. Neste sistema de aquisição podem-se aplicar rotinas de *software* para análise, possibilitando a análise da forma do pulso, além das amplitudes e dos instantes de ocorrência.

O *software* responsável pela interface com o usuário foi escrito na linguagem LabVIEW 5.1, enquanto as operações de processamento utilizam rotinas desenvolvidas em Turbo C++. Um *software* adicional efetua correções para tempo morto, entre outras freqüentemente utilizadas na determinação da atividade, em Metrologia Nuclear.

Utilizando-se este método a diferença obtida com o sistema convencional foi de (0,50%), resultado consistente considerando o erro estatístico.

3.3. *Software Coincidence Counting (SCC)*

O *Software Coincidence Counting (SCC)* [13] é um sistema digital, desenvolvido pelo Czech Metrology Institute da República Tcheca, para a medida absoluta da atividade. Os pulsos provenientes dos detectores de radiação, sendo um detector proporcional $4\pi\beta$ para o canal β e dois cintiladores de NaI(Tl) para o canal γ , são digitalizados e arquivados em disco. A contagem de fundo (BG) e coincidências são determinadas por *software*.

A concepção do SCC utiliza módulos eletrônicos convencionais e nucleares, como conversores analógico/digital (A/D), um módulo NIM Canberra com 4 canais de entradas analógicas, registrando a amplitude e instante de todos os eventos de detecção. Este sistema permite uma taxa de amostragem de 50 kS/s (cinquenta mil amostragens por segundo) por canal. O sistema operacional utilizado é o MS-DOS, e o programa foi desenvolvido na linguagem QuickBasic. Os arquivos de dados apresentam um tamanho fixo de 16 MB. O intervalo de tempo para que os pulsos sejam considerados coincidentes é fixado eletronicamente por *hardware* em 2 μ s.

Utilizando-se este método obteve-se uma diferença de (0,26%) se comparado com o sistema convencional, resultado consistente considerando o erro estatístico.

3.4. Sistema de Coincidência por *Software* (SCS) do LMN

Uma das dificuldades do método de coincidências $4\pi\beta$ - γ é a obtenção do valor da atividade com grande exatidão. Atualmente, este valor é obtido pelo Método da Extrapolação Linear [6] através do sistema TAC, medindo-se o comportamento da atividade da fonte radioativa, em função de um parâmetro associado à eficiência do detector $4\pi\beta$. O valor extrapolado para eficiência unitária corresponde à atividade procurada.

A exatidão no valor extrapolado depende do comportamento da curva e do número de pontos obtidos para o ajuste. Usualmente dezenas de pontos são necessários, o que demanda um período de vários dias de medida, para atingir a exatidão requerida.

No sistema proposto DCC (item 3.2), podem ser aplicadas rotinas de *software* para análise, possibilitando além da amplitude e do instante, a análise da forma dos pulsos. Esta informação é útil em medidas onde há interesse em diferenciar o tipo de radiação que origina cada pulso (e.g. discriminação nêutron/gama). Para medidas usuais por coincidência $4\pi\beta\text{-}\gamma$, esta informação não é necessária, podendo-se adotar um sistema eletrônico mais simples. Ainda, a taxa de amostragem de DCC é de 20 MS/s, sendo que, para as condições impostas pelas medidas do LMN, taxas de amostragem bem menores, de 2 a 3 MS/s, podem ser utilizadas.

A principal vantagem do sistema SCC (item 3.3), comparado ao sistema convencional, é a possibilidade de definir parâmetros, tais como o tempo de resolução e largura da janela em energia, após a conclusão da medida, utilizando-se os arquivos de dados em disco. Informações adicionais podem ser obtidas, tais como amplitude e instante de ocorrência dos pulsos. Estas características são inerentes à metodologia de coincidência por *software*. Entretanto, no SCC o intervalo de tempo para que os pulsos sejam considerados coincidentes é fixado eletronicamente por *hardware*, em 2 μs . Esta característica dificulta a análise de radionuclídeos que apresentem níveis metaestáveis como, por exemplo, o ^{67}Ga . O sistema opera sob plataforma MS-DOS.

No presente trabalho, estabeleceram-se os seguintes critérios para desenvolvimento do SCS:

- simplicidade eletrônica, comparável ao sistema SCC;
- tempo de resolução não limitado por *hardware*;
- utilização de plataforma com recursos gráficos em LINUX ou Windows.

O SCS reduz a quantidade de módulos eletrônicos, simplificando e agilizando os procedimentos necessários à implementação da técnica de coincidência, com grande confiabilidade, e reduzindo o número de intervenções do experimentalista. O projeto do SCS buscou o equilíbrio entre a sofisticação de DCC e a simplicidade de SCC, utilizando recursos eletrônicos disponíveis no mercado, de forma a satisfazer às necessidades do LMN, no que se refere à padronização da atividade de radionuclídeos, através dos arranjos de coincidências $4\pi\beta\text{-}\gamma$.

O presente trabalho apresenta o sistema de aquisição de dados, desenvolvido como parte integrante do SCS, para aplicação em medidas de coincidência $4\pi\beta\text{-}\gamma$. Este sistema efetua o registro simultâneo de amplitudes e instantes de ocorrência de cada pulso de detecção nuclear, não havendo, a priori, registro das informações de coincidências, que são obtidas por *software*, a partir das primeiras – altura e instante de detecção. O registro é obtido através de uma placa de aquisição de dados, com conversores A/D, conectada a uma interface disponível de um microcomputador PC (Slot PCI). Os dados são armazenados em disco e processados posteriormente por *software*.

3.4.1. Hardware de aquisição do Sistema de Coincidência por Software (SCS)

A aquisição de dados através de computadores é o processo pelo qual um fenômeno físico real é transformado num sinal elétrico proporcional e convertido num formato digital para posterior visualização, armazenamento, processamento e análise.

Da mesma forma, os sinais gerados pelos detectores de radiação necessitam ser convertidos numa forma apropriada pelo equipamento de aquisição, por meio de conversores analógico-digitais (A/D).

O sistema de aquisição, esquematizado na FIG. 3.1, utiliza:

- detectores de radiação convencionais, para as vias β e γ ;
- um bastidor NIM com os módulos eletrônicos para amplificação dos sinais;
- um painel de conexões;
- uma placa de aquisição de dados NI PCI6132;
- um cabo de conexão entre a placa de aquisição e o painel de conexões e
- um microcomputador com barramento PCI sob sistema operacional Windows XP.

Figura 3. 1 - Sistema de aquisição de dados (DAQ).

A placa de aquisição da National Instruments [31] modelo NI PCI6132, ilustrada na FIG. 3.2, instalada em slot PCI, inclui:

- 4 canais de entradas analógicas, em modo comum (terra comum);
- conversores A/D com resolução de 14 bits;
- taxa de amostragem de 2,5 MS/s;
- 2 contadores de 24 bits;
- memória interna com capacidade para 16 MS;
- driver para LabVIEW.

Figura 3. 2 - Placa de aquisição – NI PCI-6132.

A placa de aquisição possui uma taxa de amostragem de 2,5 MS/s por canal, o registro do arquivo é executado pelo LabVIEW em blocos de 1 segundo. O tempo total de aquisição corresponde ao tempo necessário para que o sistema digitalize o número de segundos selecionado no painel frontal. Considerando-se os 4 canais da placa, para cada segundo, necessita-se de um espaço de armazenamento para 10 MS (10 milhões de amostragens). A memória disponível na placa de aquisição possui capacidade para armazenar 16 MS, suficiente para ~1,6 segundos de registro.

Nas medidas realizadas neste trabalho utilizaram-se 3 canais, necessitando-se de um espaço de 7,5 MS para 1 segundo de aquisição. Desta forma, a memória suporta até 2 segundos de registro (15 MS).

Quando a capacidade total de memória é atingida, os dados são transferidos para o microcomputador. Essa tarefa é executada por DMA (*Direct Memory Access*), independente da velocidade do barramento de dados. Os dados são, então, salvos em arquivos, tarefa mais lenta, devido aos acessos ao disco.

No projeto SCS, a configuração de laços no diagrama em blocos do LabVIEW mostram que, ao final de cada segundo, os dados são salvos nos arquivos, garantindo que as informações referentes ao tempo selecionado sejam preservadas em sua totalidade, como se constata pelos arquivos de dados.

O tempo total de medida corresponde à somatória dos tempos de amostragem (o total de segundos) e dos tempos de arquivamento. Os arquivos guardam somente a amplitude e tempo de cada pico e não todos os pontos amostrados, isto reduz o tempo de arquivamento. O número de picos registrados depende da taxa de contagem, assim como o tempo necessário para arquivamento.

Pode-se esquematizar o processo acima descrito da seguinte forma:

- digitalização dos sinais de cada canal, no período de 1 segundo: dados das amostragens enviados à memória *on-board*;
- registro dos tempos e alturas de cada pico: as amostragens referentes aos picos salvas em arquivos.

Para taxas pequenas, próximas aos valores máximos previstos em projeto, ~3000 cps, o tempo transcorrido de medida não difere significativamente do tempo de amostragem selecionado.

O painel de conexões, ilustrado na FIG. 3.3, dispõe de conectores para os sinais de entrada, neste caso, provenientes dos amplificadores de espectroscopia. Os conectores de entradas analógicas são do tipo BNC e possuem chave para seleção do modo de entrada (comum ou diferencial). No SCS os três canais estão configurados em modo comum.

Figura 3. 3 - Pannel de conexão BNC-2110.

O cabo que conecta o painel de conexão à placa de aquisição é mostrado nas FIG. 3.4, 3.5 e 3.6.

Figura 3. 4 - Cabo de conexão SH-68-EP.

Figura 3. 5 - SH-68-EP conectado à PCI6132, inserida no microcomputador.

Figura 3. 6 - Cabo SH-68-EP conectado no painel de conexões BNC-2110.

O diagrama em blocos da placa de aquisição é apresentado na FIG.3.7, válido para os modelos NI PCI6132 (4 conversores A/D) e NI PCI6133 (8 conversores A/D). O sistema SCS emprega a placa com 4 A/D.

Figura 3. 7 - Diagrama em blocos das placas NI PCI6132 / NI PCI6133.

O conector da placa de aquisição NI PCI6132 possui 68 pinos, conforme ilustrado na FIG. 3.8. Cada pino é identificado com o sinal correspondente.

AI 0 –	34	68	AI 0 +
AI 1 +	33	67	AI 0 GND
AI 1 GND	32	66	AI 1 –
AI 2 –	31	65	AI 2 +
AI 3 +	30	64	AI 2 GND
AI 3 GND	29	63	AI 3 –
AI 4 + ¹	28	62	NC
AI 4 GND ¹	27	61	AI 4 – ¹
AI 5 – ¹	26	60	AI 5 + ¹
AI 6 + ¹	25	59	AI 5 GND ¹
AI 6 GND ¹	24	58	AI 6 – ¹
AI 7 – ¹	23	57	AI 7 + ¹
NC	22	56	AI 7 GND ¹
NC	21	55	NC
NC	20	54	NC
P0.4	19	53	D GND
D GND	18	52	P0.0
P0.1	17	51	P0.5
P0.6	16	50	D GND
D GND	15	49	P0.2
+5 V	14	48	P0.7
D GND	13	47	P0.3
D GND	12	46	AI HOLD COMP
PFI 0/AI START TRIG	11	45	EXT STROBE*
PFI 1/AI REF TRIG	10	44	D GND
D GND	9	43	PFI 2/AI CONV CLK
+5 V	8	42	PFI 3/CTR 1 SOURCE
D GND	7	41	PFI 4/CTR 1 GATE
PFI 5	6	40	CTR 1 OUT
PFI 6	5	39	D GND
D GND	4	38	PFI 7/AI SAMP CLK
PFI 9/CTR 0 GATE	3	37	PFI 8/CTR 0 SOURCE
CTR 0 OUT	2	36	D GND
FREQ OUT	1	35	D GND

NC = No Connect
¹ NC on NI 6122/6132

Figura 3. 8 - Conector da placa NI PCI-6132.

3.4.2. Software de aquisição desenvolvido em LabVIEW

O *software* adotado para controle de aquisição de dados é o LabVIEW 8.5 (*Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench*) [31], uma linguagem de programação gráfica, desenvolvida pela National Instruments.

O LabVIEW difere de linguagens de programação usuais como C, C++ ou Java, porque utiliza blocos gráficos interconectáveis, em lugar de linhas de código, constituindo, portanto, uma linguagem gráfica, conhecida como linguagem

“G” (for *graphical* –composta de muitos nodos conectáveis). O LabVIEW tem um compilador gráfico aperfeiçoado para maximizar o desempenho do sistema, e seu ambiente de desenvolvimento opera em computadores sob plataformas Windows, Mac, OSX ou Linux. Através do LabVIEW podem-se criar, ainda, programas executáveis em plataformas Pocket PC, Palm OS, e uma variedade de plataformas embarcadas, incluindo *Field Programmable Gate Arrays* (FPGAs), *Digital Signal Processors* (DSPs), e microprocessadores.

Os programas desenvolvidos em LabVIEW são chamados de instrumentos virtuais (VIs—*Virtual Instruments*). Os VIs contêm três componentes principais: o painel frontal, o diagrama de bloco e o painel de ícones e conectores.

Utilizando-se o LabVIEW pode-se desenvolver uma grande variedade de instrumentos, utilizando computadores pessoais (instrumentos virtuais, ou VI's). O LabVIEW contém um conjunto completo de ferramentas para a aquisição, análise, visualização e armazenamento de dados, bem como ferramentas para ajudar a solucionar problemas no código.

Com o LabVIEW, a interface do usuário, ou painel frontal, pode ser desenvolvido, incluindo os controles necessários (entradas de dados, botões, etc) e dados indicadores (numéricos, gráficos, LED's, etc.), podem ser adicionados VI's e estruturas de controle do painel frontal, o diagrama de bloco contém esse código, pode-se afirmar que o diagrama de bloco assemelha-se a um fluxograma.

Implementam-se aplicações de ensaio e medição, aquisição de dados, controle de instrumento, registro de dados, análise de medição e geração de relatório [31].

O painel frontal é a interface com o usuário, elaborado com controles e indicadores, que são os terminais interativos de entrada e saída do VI, respectivamente. Os controles simulam dispositivos de entrada de instrumentos e fornecem dados para o diagrama de bloco do VI. Os indicadores simulam dispositivos de saída de instrumentos e exibem os dados de programa, de acordo com a necessidade.

A FIG. 3.9 exibe um fragmento da versão atual do painel frontal (controles), utilizado no presente projeto de aquisição de dados, dispondo de mostradores gráficos (não visíveis na FIG. 3.9) para os pulsos nucleares e espectros de energias depositadas, para cada canal. O projeto deste painel pode evoluir, de forma a atender diferentes necessidades que possam surgir, em qualquer tempo.

Após a elaboração do painel frontal, utilizando representações gráficas de funções, desenvolveu-se o código para controlar os objetos do painel frontal, ou seja, o diagrama em blocos [31].

Figura 3. 9 - Painel frontal do sistema de aquisição de dados.

O diagrama em blocos é composto por nós, terminais e ligações, conforme ilustrado na FIG. 3.10. *Nós*: são objetos do diagrama de entrada ou saída e executam operações quando o VI é invocado. Assemelham-se a declarações, operadores, funções e sub-rotinas em linguagens de programação baseadas em texto. *Terminais* e *ligações*: são portas de entrada e saída, canais de troca de informações entre os elementos representados graficamente no painel

frontal e no diagrama em bloco. Os *terminais* são semelhantes a parâmetros e constantes em linguagens de programação baseadas em texto [31].

Transferem-se dados entre objetos do diagrama de bloco através de *ligações*. *Ligações* são semelhantes a variáveis em linguagens de programação baseadas em texto. Cada ligação tem uma única fonte de dados, mas pode-se ligá-la a vários VIs e funções que fazem o processamento dos dados. As ligações são representadas em cores, estilos e espessuras diferentes, de acordo com o tipo da informação (inteiro, ponto flutuante, sinal lógico, etc.) e da quantidade dessa informação (valor único, vetor, matriz, etc.) [31].

Figura 3. 10 - Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados.

3.4.3 *Software* para análise

O cálculo de atividade radioativa no sistema de coincidência é feito pelo *software* de análise, desenvolvido no LMN. Nos três sistemas de coincidência: convencional, TAC e SCS utilizaram-se respectivamente os programas DILUI 8 [32], CONTAC 20 [33] e SCTAC 2 [34]. O programa DILUI 8 foi desenvolvido em BASIC, os programas CONTAC 20 e SCTAC 2 foram desenvolvidos em linguagem FORTRAN, nos quais em todos os programas estão incorporadas as correções aplicadas para determinação da atividade: correção para radiação de fundo (BG), correção para o tempo morto do sistema de detecção $4\pi(\text{PC})\text{-NaI(TI)}$, correção para o decaimento da fonte e correção para as coincidências acidentais.

Os *softwares* convencionais recebem informações relacionadas à fonte analisada: meia-vida do radionuclídeo em dias e sua incerteza em porcentagem, data e hora de referência do radionuclídeo, o número de contagens β , γ e de coincidências, informações sobre BG e tempo de medida, de forma a determinar o valor da atividade em Becquerel e respectiva incerteza percentual.

4. PARTE EXPERIMENTAL

4.1. Medida com sistema convencional

No sistema de coincidência convencional descrito no Capítulo 2.2, foram feitas medidas com uma fonte de ^{60}Co , confeccionada no LMN conforme descrito no Capítulo 2.7, determinando-se sua atividade de forma absoluta. A eletrônica associada é simples se comparada ao sistema TAC; contadores registram as contagens das vias beta, gama e coincidência, utilizando dois módulos contadores, ambos para bastidor BIN, o primeiro da marca ORTEC (*dual counter / timer*), modelo 994 (*master*) e o segundo da marca ORTEC (*counter*), modelo 773 (*slave*), o contador *master* possui as características de contador e gerenciador do cronômetro, responsável pelo controle do tempo de coleta dos dados.

Para realizar qualquer medição, devem-se polarizar os detectores com as tensões estabelecidas no Capítulo 2.6. Em todos os sistemas (convencional, TAC e SCS) utilizam-se as mesmas condições de polarização dos detectores (β e γ) e ajustes dos amplificadores de espectroscopia (β , γ e pulsador). Em seguida, deve-se introduzir a fonte radioativa no detector proporcional através da prateleira deslizante, ilustrada na FIG. 2.7 [35].

Posteriormente, foram estabelecidas as condições de medida, tanto da via beta como da via gama, para os sistemas de medidas: convencional, TAC e SCS, conforme descrito a seguir:

● Ajuste das condições eletrônicas da via β

Para a escolha do ganho adequado de amplificação, evitando situações indesejadas como, por exemplo, saturação dos pulsos e verificação do nível de discriminação para eliminação do ruído, utilizou-se um sistema eletrônico auxiliar, ilustrado na FIG. 4.1.

Figura 4.1 - Sistema eletrônico auxiliar.

Neste sistema, o sinal do amplificador é enviado simultaneamente para um módulo de atraso (*delay amplifier*) e para o discriminador, passando pelo gerador de porta e atraso. Estes sinais necessitam de análise, e são enviados ao MCA (*Multi Channel Analyzer*), no qual pode ser visualizado o espectro beta diretamente do amplificador ou após passar pela discriminação. Esta seleção é feita no MCA, com o módulo porta (*gate*) posicionando em medida direta ou em medida em coincidência.

O módulo de atraso é utilizado para permitir que o sinal direto do amplificador e o sinal do gerador cheguem ao mesmo tempo no MCA [35].

● Ajuste das condições eletrônicas da via γ

Neste sistema, utilizando-se dois cristais de NaI(Tl), inicialmente faz-se o ajuste dos ganhos dos amplificadores de espectroscopia, para que os espectros gama sejam coincidentes. Este procedimento é obtido, conectando-se o sinal de um detector gama (γ_1) no MCA, verificando em qual canal se encontram os picos de absorção total, em seguida retira-se o sinal (γ_1) e conecta-se o gama (γ_2). O

mesmo procedimento deve-se repetir com medidas de 30 segundos, até que os sinais estejam coincidentes. Posteriormente estes sinais são enviados para o módulo eletrônico somador.

Posteriormente, utiliza-se o sistema eletrônico apresentado na FIG. 4.1 para discriminação dos níveis de energia dos picos de absorção total selecionados para a medida. Utiliza-se o MCA de modo semelhante ao descrito para a via beta.

O tempo de cada medida foi ajustado no contador mestre para 4000 segundos. A medida de radiação de fundo (BG) é feita de modo análogo, retirando-se a fonte do detector, com um tempo de 1000 segundos

A atividade específica da fonte e a radiação de fundo são obtidas pelo *software* de análise DILUI 8 [32].

4.2. Medida com sistema *Time to Amplitude Converter* (TAC)

Para a padronização do radionuclídeo no sistema de coincidência TAC, descrito no Capítulo 2.3, utilizou-se a mesma fonte de ^{60}Co (Capítulo 2.7), determinando-se sua atividade específica.

A eletrônica associada é a mais complexa dos três sistemas (convencional, TAC e SCS), conforme diagrama ilustrado na FIG. 2.2.

Realizam-se os ajustes das vias β e γ idênticos aos do sistema convencional. Em seguida, faz-se a escolha dos tempos de atraso das duas vias, de modo que os sinais enviados ao TAC produzam uma saída adequada à obtenção das contagens necessárias em um espectro de contagens, por meio do MCA, sem superposição entre as mesmas.

O tempo de cada medida foi fixado em 4000 segundos, no MCA. A medida da radiação de fundo é feita de modo análogo, retirando-se a fonte do detector, o tempo de medida da radiação de fundo é da ordem de 1000 segundos.

Os espectros resultantes das medidas da fonte e da radiação de fundo são gravados no computador acoplado ao MCA.

A atividade específica da fonte e a radiação de fundo são obtidas pelo *software* de análise CONTAC 20 [33], utilizando o método de Extrapolação Linear [6].

4.3. Medida com Sistema de Coincidência por *Software* (SCS)

Para as medidas realizadas com o sistema SCS, utilizaram-se três canais em modo comum, sendo o canal A0 conectado ao sinal do amplificador de espectroscopia do canal β , o canal A1 ao sinal do amplificador de espectroscopia do canal γ e o canal A2 ao sinal do pulsador de 60 Hz, para determinação do tempo morto do sistema.

A amplitude de entrada na placa de aquisição de dados dos sinais analógicos provenientes dos amplificadores de espectroscopia dos canais (A0, A1 e A2) devem estar entre 0 e 10 V, configurada em modo comum, ou seja, todas as entradas devem estar no mesmo ponto (terra), deve-se utilizar as saídas unipolar dos amplificadores. Sinais com amplitudes até 11 V são registrados (acima de 10 V ocorre a saturação), situação não desejada, neste caso o *software* de aquisição pode registrar mais de um evento, o que deve ser tratado pelo *software* de análise. Os ajustes da tensão máxima e mínima são realizados no painel frontal, conforme mostrado na FIG. 4.2.

Figura 4.2 - Tensão de entrada (Máxima e Mínima.) dos canais analógicos.

O tempo de coleta da medida é inserido conforme ilustrado na FIG. 4.3 e o nível de discriminação do ruído independente para cada canal (β , γ e pulsador), ilustrado na FIG. 4.4, localizado no painel frontal, desenvolvido com o LabVIEW 8.5.

Figura 4.3 - Ajuste do tempo de aquisição e indicador do tempo corrente.

Figura 4.4 - Discriminação do ruído.

Figura 4.5 - Taxa de contagem e taxa de amostragem.

O painel frontal ainda dispõe de mostradores gráficos para os pulsos nucleares e espectros de energias depositadas, para cada canal. Uma amostra gráfica pode-se verificar na FIG. 4.6.

Figura 4.6 – Diagrama de ocorrências no intervalo de 1 ms dos canais β (A0), γ (A1) e pulsador nuclear (A2).

5. RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados da padronização de uma amostra do radionuclídeo ^{60}Co , comparada aos resultados obtidos com os sistemas convencional e TAC, descritos nos capítulos 2.2 e 2.3, e os resultados observados entre os tempos selecionado e transcorrido nas medidas.

A título ilustrativo, trechos dos arquivos de dados são apresentados nas TAB. 5.1 (canal β), TAB. 5.2 (canal γ) e TAB. 5.3 (canal do pulsador de 60Hz), cada linha refere-se a um pico detectado, registrando-se a amplitude e instante de ocorrência.

Os arquivos dos canais β , γ e pulsador são gerados em blocos de 1 segundo, instante em que o contador de tempo é zerado e um novo segundo iniciado, o registro de todos os segundos (tempo total da medida) são gravados seqüencialmente, gerando um arquivo de dados para cada canal de aquisição.

Tabela 5.1- Fragmento do arquivo de dados de aquisição do canal β .

Instante de Ocorrência	Amplitude (Volts)	Instante de Ocorrência (s)
797,297122	4,413276	3,189E-04
955,721719	1,765276	3,823E-04
3165,299308	0,905695	1,266E-03
4341,584768	3,322861	1,737E-03
4666,203052	2,721636	1,866E-03
4684,750000	0,063629	1,874E-03
5266,649693	3,457039	2,107E-03
6868,709677	0,489778	2,747E-03

Tabela 5.2 - Fragmento do arquivo de dados de aquisição do canal γ .

Instante de Ocorrência	Amplitude (Volts)	Instante de Ocorrência (s)
795,813830	0,409565	3,183E-04
12120,046978	7,371883	4,848E-03
14157,706822	3,106311	5,663E-03
25585,726926	3,903930	1,023E-02
55857,863890	3,096406	2,234E-02
71948,249672	2,079544	2,878E-02
78014,321817	6,152143	3,121E-02
97715,010039	6,144133	3,909E-02

Tabela 5.3 - Fragmento do arquivo de dados do pulsador de 60 Hz.

Instante de Ocorrência	Amplitude (Volts)	Instante de Ocorrência (s)
11914,935662	9,389196	4,766E-03
53597,020994	9,420935	2,144E-02
95243,426145	9,462130	3,810E-02
136897,704932	9,313219	5,476E-02
178557,050500	9,429564	7,142E-02
220216,386392	9,467989	8,809E-02
261876,253905	9,471579	1,048E-01
303552,851623	9,360948	1,214E-01
345213,249920	9,471474	1,381E-01
386766,265303	9,475052	1,547E-01

Processando os dados dos canais β e γ , utilizando-se o *software* SCTAC 2 [34], programa desenvolvido para converter a amplitude dos pulsos digitalizados em canal, no SCS utilizou-se uma resolução de 1 k (1024 canais). Obtiveram-se os espectros de altura de pulso, ilustrados nas FIG 5.1 e FIG. 5.2.

Figura 5.1 - Espectro de altura de pulso da via β .

Figura 5.2 - Espectro de altura de pulso da via γ .

Os dados digitalizados do canal do pulsador conforme demonstrados na TAB. 5.3, são importantes para demonstrar que os pulsos não estão sendo perdidos na aquisição, utilizando-se um pulsador nuclear com frequência de 60 Hz sincronizado com a rede elétrica, deve-se obter pulsos com um período de 16,67 ms, valor obtido pela expressão:

$$T = \frac{1}{f} \quad (5.1)$$

onde:

T = período em segundos;

f = frequência do pulso em Hertz.

O *software* de análise efetua a correção para a radiação de fundo (BG) para o cálculo da atividade. Para tanto, realizou-se uma medida de 1000 segundos utilizando-se os mesmos ajustes eletrônicos, sem fonte radioativa, obtendo-se os dados para o BG. A TAB. 5.4 apresenta um fragmento do arquivo de BG.

Tabela 5.4 - Fragmentos de arquivos da medida da radiação de fundo (BG) dos canais β e γ .

Canal β			Canal γ		
Instante de Ocorrência	Amplitude (Volts)	Instante de Ocorrência (s)	Instante de Ocorrência	Amplitude (Volts)	Instante de Ocorrência (s)
420171,820158	0,764272	1,681E-01	29505,233703	0,967639	1,180E-02
540352,043478	0,251571	2,161E-01	38267,967650	0,982008	1,531E-02
1260656,026316	0,113541	5,043E-01	44508,645161	0,577668	1,780E-02
1658819,654595	3,874730	6,635E-01	69190,120656	1,249440	2,768E-02
606070,201754	0,144238	2,424E-01	279221,427759	2,427705	1,117E-01
1606070,201754	0,144238	6,424E-01	359003,081395	0,311102	1,436E-01
259118,150000	1,041992	1,036E-01	425423,021710	3,391968	1,702E-01
1259118,150000	1,041992	5,036E-01	481743,669872	0,350344	1,927E-01
2259118,150000	1,041992	9,036E-01	514138,964076	4,340239	2,057E-01
367168,971698	0,155055	1,469E-01	549375,500000	10,974731	2,198E-01

Realizou-se uma medida com a fonte #14.109 de ^{60}Co para determinar a diferença de tempo de aquisição entre os canais β (A0) e γ (A1), conectando-se o mesmo sinal do detector de radiação em ambos os canais, esta medida foi realizada com o sinal do detector β , em razão da maior taxa de contagem, obtendo-se a diferença de tempo conforme ilustrado na TAB. 5.5.

Tabela 5.5 - Sincronismo de tempo entre os canais β (Canal 0) e γ (Canal 1).

Canal 0			Canal 1			
Instante de Ocorrência	Amplitude (V)	Instante de Ocorrência (s)	Instante de Ocorrência	Amplitude (V)	Instante de Ocorrência (s)	Diferença de Tempo entre os Canais (s)
359,010121	0,843521	1,436E-04	359,003968	0,845950	1,436E-04	2,461E-09
1837,097080	4,525703	7,348E-04	1837,088235	4,534131	7,348E-04	3,538E-09
3219,021536	3,717343	1,288E-03	3219,013539	3,723264	1,288E-03	3,199E-09
4599,977238	4,597585	1,840E-03	4599,968892	4,604050	1,840E-03	3,338E-09
5014,157143	0,451329	2,006E-03	5014,154412	0,448756	2,006E-03	1,092E-09
5469,619205	4,544232	2,188E-03	5469,605714	4,549093	2,188E-03	5,396E-09
5617,044828	0,950063	2,247E-03	5617,038194	0,948743	2,247E-03	2,654E-09
8187,405213	0,640043	3,275E-03	8187,400943	0,639697	3,275E-03	1,708E-09
8488,835719	5,778492	3,396E-03	8488,825945	5,785201	3,396E-03	3,910E-09
8514,372420	3,403229	3,406E-03	8514,364613	3,407215	3,406E-03	3,123E-09

Na FIG. 5.3 é apresentado o comportamento do tempo real de contagem (tempo de relógio), como função do número de pulsos coletados na via beta. Observa-se um comportamento aproximadamente linear com coeficientes linear e angular iguais a $(119,40 \pm 0,25)$ s e $(25,82 \pm 0,0,42)$ $\mu\text{s/pulso}$. Este resultado indica que o tempo de aquisição (*clocktime*) é maior que o tempo considerado no processamento (*livetime*).

As consequências desta diferença deverão ser motivo de pesquisas futuras e servirão de base para uma otimização do software em LabVIEW que está sendo utilizado. Como o decaimento da fonte radioativa segue o tempo de aquisição, esta diferença deve ser considerada para a correção de decaimento durante a medida.

Figura 5.3 – Comportamento do tempo real de contagem como função do número de pulsos de entrada no canal.

Os resultados da padronização comparativa da fonte de ^{60}Co #14.109 são sintetizados na Tabela 5.6, para a data de referência 09/09/08 às 0 hs. Apresentam-se os valores finais, corrigidos para a radiação de fundo (BG), desintegração da fonte radioativa e tempo morto, para cada um dos sistemas utilizados.

Tabela 5.6 - Resultados dos três sistemas de medida de coincidência (convencional, TAC e SCS).

^{60}Co 14109	Atividade / Incerteza (Bq/g)		Diferença (%)
Sistema			
Contadores	1561,10	3,9	0,00
TAC	1562,80	3,9	0,10
SCS	1570,99	3,9	0,63

Observa-se uma diferença de 0,63% entre o valor obtido com SCS e o do sistema convencional com contadores. Concluiu-se que essa discrepância é devida a problemas intrínsecos da aquisição de dados, onde pulsos saturados

(> 10 V) e pulsos empilhados podem originar o registro de mais de um pulso, conforme demonstrado na TAB. 5.7, principalmente na via β , onde a taxa de contagem é muito maior devido à eficiência do detector (contador proporcional em geometria 4π).

Tabela 5.7 - Fragmento do arquivo de dados do ^{60}Co , mostrando no caso (a) pulsos normais, (b) pulsos saturados e (c) pulsos empilhados.

Instante de Ocorrência	Amplitude (V)	Instante de Ocorrência	Amplitude (V)	Instante de Ocorrência	Amplitude (V)
172147,064581	2,501912	29216,919878	5,479227	18643,620567	0,617859
173969,311927	1,366224	32863,382353	1,596904	19235,698413	0,520911
175214,375000	2,010498	33229,564677	2,491510	19620,675439	0,712899
175335,811005	0,789469	34312,500000	10,418243	19975,131818	0,716445
176373,398265	4,075393	34316,500000	10,309906	20403,670732	0,292020
176458,304632	3,144624	37153,500000	10,143585	22571,850404	1,377138
178323,744604	5,026611	37154,500000	10,025787	22879,746667	1,179964
(a) Pulsos normais		(b) Pulsos saturados		(c) Pulsos empilhados	

Verificou-se que 6% do total dos pulsos beta estão saturados, contra 2% do total dos pulsos gama, conforme ilustrado nas FIG. 5.4.

Figura 5.4 - Espectros beta (a) e gama (b) obtidos na padronização do ^{60}Co , indicando a saturação dos pulsos.

Na FIG. 5.5 observar-se o sinal da saída do amplificador de espectroscopia do canal β , obtido com um osciloscópio digital Tektronix. Pode-se observar que no caso (a) o sinal está bem definido e no caso (b) temos uma situação de pulsos empilhados,

Figura 5.5 – Saída do amplificador de espectroscopia do canal β , (a) pulsos normais e bem definidos e (b) pulsos empilhados.

Pode-se definir que os pulsos estão bem definidos quando a separações de tempo entre eles for maior de $1,5 \mu\text{s}$.

Na FIG.5.6, em (a) observa-se em linha verde três pulsos empilhados e em pontos vermelho uma condição imaginária de formação dos três pulsos, um tempo de $1 \mu\text{s}$ entre eles, em (b) observa-se um pulso saturado com duração de $1 \mu\text{s}$.

(a) Pulsos empilhados

(b) pulsos saturados

Figura 5.6 – Sinal da saída do amplificador de espectroscopia do canal β com degradação dos picos.

Foi introduzido no algoritmo de análise um tempo morto por *software*, denominado de TMS, com o objetivo de descartar pulsos empilhados e saturados, para o cálculo da atividade do radionuclídeo.

Os resultados da padronização comparativa da fonte de ^{60}Co #14.109 são sintetizados na Tabela 5.8. Apresentam-se os valores finais, corrigidos para a radiação de fundo (BG), desintegração da fonte radioativa e tempo morto, para cada um dos sistemas utilizados, com a implementação do TMS.

Tabela 5.8 - Resultados dos três sistemas de medida de coincidência (convencional, TAC e SCS) com o TMS.

^{60}Co 14109	Atividade / Incerteza (Bq/g)		Diferença (%)
Sistema			
Contadores	1561,10	3,9	0,00
TAC	1562,80	3,9	0,10
SCS	1568,70	3,9	0,48

Estes resultados estão em razoável acordo entre si, indicando boa confiabilidade do novo sistema. É possível que o valor ligeiramente maior obtido no sistema SCS possa ser resultado de alguma influência da diferença entre o tempo de aquisição (clocktime) e o tempo de processamento (livetime), causando um tempo morto não considerado, embora não haja uma indicação direta pelos dados apresentados. Esta possibilidade deverá ser investigada em medidas futuras.

6. CONCLUSÕES

O objetivo proposto neste trabalho, desenvolvimento de um sistema eletrônico com registro simultâneo de amplitude e instante de ocorrência dos pulsos aplicado ao método de coincidências $4\pi\beta\text{-}\gamma$, foi atingido. Os valores medidos na padronização de radionuclídeos, como é o caso do ^{60}Co , apresentou resultados consistentes e com boa exatidão, comparáveis com outros sistemas de medida absoluta, podendo-se citar o sistema convencional e o atual sistema no LMN em uso o TAC. O método do SCS desenvolvido não foi utilizado por nenhum outro autor na literatura e se mostrou adequado na padronização de radionuclídeos.

Pode-se afirmar que existem muitas vantagens se comparados aos sistemas similares como: obter a curva de extrapolação em uma única medida, menor número de módulos eletrônicos, os dados são arquivados em disco permitindo uma análise posterior e utilização para referência e permitir simulações e alterações nos parâmetros de análise por *software*.

A boa concordância dos resultados é observada na comparação com os resultados apresentados por outros laboratórios participantes da Comparação Internacional, ficando dentro da incerteza ($<0,5\%$).

Desta maneira, conclui-se que o desenvolvimento deste projeto apresentou um bom desempenho, como esperado.

Para trabalhos futuros, seguindo esta linha de pesquisa e desenvolvimento, sugere-se a padronização de outros radionuclídeos que também apresentam esquemas de desintegração complexos: ^{188}Re , ^{123}I , e ^{201}Tl , e são de interesse em medicina nuclear.

Sugere-se que uma análise mais detalhada da origem da diferença entre *livetime* e *clocktime* seja feita para verificar se os resultados obtidos pelo sistema de SCS requerem ou não uma correção para este efeito.

O desenvolvimento de um *software* de análise mais aperfeiçoado será necessário, permitindo simulações, contendo um banco de dados com informações para facilitar o usuário final e manipulação dos dados com mais facilidade.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CAMPION, P. J., ***The standardization of radioisotopes by beta-gamma coincidence method using high efficiency detectors.*** *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, 4, p: 232-248, 1959.
- [2] GANDY, A., ***Mesure absolue de l'activité des radionucléides par la méthode des coïncidences beta-gamma à l'aide de détecteurs de grand efficacité - Étude des coïncidences instrumentales.*** *Int. Journ. Appl. Radiat. Isot.* 11, p: 75, 1961.
- [3] GANDY, A., ***Mesure absolue de l'activité des radionucléides par la méthode des coïncidences beta-gamma à l'aide de détecteurs de grand efficacité - Corretions de temps morts.*** *Int. Journ. Appl. Radiat. Isot.* 13, p: 501, 1962.
- [4] BAERG, A. P., ***Measurement of radioactivity disintegration rate by the coincidence method.*** *Metrologia*, 2 (1), p: 23-32, 1966.
- [5] BAERG, A. P., ***Absolute measurement of radioactivity.*** *Metrologia*, 3 (4), p: 105-108, 1967.
- [6] BAERG, A. P., ***The efficiency extrapolation method in coincidence counting.*** *Nuclear Instruments and Methods.* 112, p: 143-150, 1973.
- [7] HOUTHERMANS, H., MIGUEL, M. ***$4\pi\beta\gamma$ coincidence counting for the calibration of nuclides with complex decay schemes.*** *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 13 p:137-142 , 1962.
- [8] KAWADA, Y., ***Extended applications and improvement of the $4\pi\beta\gamma$ coincidence method in the standardization of radionuclides.*** *Res. of ETL.* Japan, ETL-730, 1972.
- [9] TAYLOR, J. G. V., ***The total internal conversion coefficient of the 279 keV transition following the decay of ^{203}Hg as measured by a new coincidence method.*** *Canad. Journ. Phys.*, 40 (4) p: 383, 1962.

- [10] MOURA, L. P., **Método de Coincidência Generalizado para a Medida Absoluta da Atividade de Radionuclídeos - Aplicação da Determinação do Coeficiente de Conversão Interna da Transição de 279 keV do ^{203}Tl** . Tese de Doutorado apresentada à Universidade de Campinas, 1969.
- [11] SIMÕES, D. **Padronização dos Radionuclídeos Multi-Emissores Gama $^{66\text{m}}\text{Ho}$ E ^{72}Ga e determinação de suas intensidades gama por desintegração..** Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/USP, 2005.
- [12] BUCKMAN, S. M.; IUS, D., **Digital coincidence counting, Nuclear Instrumentation and Methods in Physics Research.**, A 369 368-374, 1996.
- [13] HAVELKA, M.; AUERBACH, P.; SOCHOROVÁ, J., **Software coincidence counting, Applied Radiation and Isotopes.**, 56 265-268, 2002.
- [14] FRIEDLANDER, G. AND KENNEDY, J.W., **Nuclear and Radiochemistry**, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- [15] CHUNG, K.C. **Introdução À Física Nuclear.**1 ed. Rio de Janeiro, EdUERJ, 2001.
- [16] NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. **Handbook of radioactivity measurements procedures.** Report nº 58, nov. 1978.
- [17] PRICE, W.J., **Nuclear Radiation detection.** McGraw-Hill, 1958.
- [18] EISBERG, R.; RESNICK, R., **Física Quântica. Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas.** 5ed., Campus, Rio de Janeiro, 2002.
- [19] BEISER, A., **Conceitos de Física Moderna.**, 1. Ed., Edusp, São Paulo, 1969.
- [20] HARVEY, G.B. **Nuclear Chemistry.**1. ed. Universidade da Califórnia, Editora Edgard Blucher LTDA, p: 65-70, 1969.
- [21] LAGOUTINE, F.; COURAOL, N.; LEGRAND, J.; **Table de radionucléides. Laboratoire de Métrologie des Rayonnements Ionisants. Bureau National de Métrologie**, 1984.
- [22] KNOLL, G. F., **Radiation Detection and Measurement**, second Ed. (J. Wiley & Sons, 1989).

- [23] LAVRAS, W., KOSKINAS.M.F, DIAS, M.S. and FONSECA, K.A., **Primary standardization of ^{51}Cr radioactive solution. V Regional IRPA Congress – Congress on Radiation Protection and Safety, II Iberian and Latin American Congress of Radiological Protection Societies**, Recife - PE – Brasil, 04 de maio de 2001.
- [24] KELLER, C., **Radiochemie**, Ed. Editora Universitária, Universidade Federal de Pernambuco –Recife, p:129-134, 1981.
- [25] TAKEDA, M.N., **Aplicação do método de Monte Carlo no estudo da padronização de radionuclídeos com esquema de desintegração complexo em sistema de coincidência $4\pi\beta\gamma$** , Tese de doutoramento, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [26] FONSECA, K. A., **Medida Absoluta da Atividade e Determinação da Taxa de Emissão Gama por Desintegração do ^{126}I** . Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/USP, 1997.
- [27] BACCARELLI, A. M., Dias M. S., Koskinas M. F., Brancaccio F., **Standardization of ^{18}F by means of $4\pi(\text{PS})$ plastic scintillator coincidence system**, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, V. 55, No. 3, 1767-1773, 2008.
- [28] **Canberra**., Disponível em: <http://www.canberra.com/products>, Acesso em: 10 de setembro de 2009.
- [29] **Fluke**., Disponível em: <http://www.fluke.com>, Acessado em: 10 de setembro de 2009.
- [30] **Ortec**., Disponível em: <http://www.ortec-online.com/products.htm>. Acessado em: 10 de setembro de 2009.
- [31] NATIONAL INSTRUMENTS., **Curso do software - versão 6.0,código do manual 322682A-01,Ed.**, de novembro de 2001.
- [32] DIAS, M.S., 1999 – **DILUI 8**– Relatório interno, IPEN-CNEN/SP.
- [33] DIAS, M.S., 1999 – **CONTAC 20**– Relatório interno, IPEN-CNEN/SP.
- [34] DIAS, M.S., 2009 – **SCTAC 2** – Relatório interno, IPEN-CNEN/SP.
- [35] PONGE-FERREIRA, C.R.P.. **Padronização dos Radionuclídeos ^{45}Ca , ^{137}Cs , e ^{204}Tl pelo Método do Traçador Utilizando Sistema de Coincidência $4\pi\beta\gamma$** , Tese de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/USP, 2005.