



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



Thiago Royer Leão

**Aplicação do Radioisótopo Cs-137 na Técnica de Atenuação de Raios
Gama para o Monitoramento de Suspensões Aquosas de
Densidades Variadas**

UBERLÂNDIA-MG
2026

Thiago Royer Leão

**Aplicação do Radioisótopo Cs-137 na Técnica de Atenuação de Raios
Gama para o Monitoramento de Suspensões Aquosas de
Densidades Variadas**

Monografia de graduação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia como parte
dos requisitos necessários para a aprovação na
disciplina Trabalho de Conclusão de Curso, do
curso de Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca.

Coorientador (a): Dra. Flávia Marques
Fagundes.

**UBERLÂNDIA-MG
2026**



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Trabalho de Conclusão de Curso - FEQUI31033 (Turma C8 - 2025/1)				
Data:	05/09/2025	Hora de início:	9h	Hora de encerramento:	10h50
Matrícula do Discente:	11721EQU009				
Nome do Discente:	Thiago Royer Leão				
Título do Trabalho:	<i>Aplicação do Radioisótopo Cs-137 na Técnica de Atenuação de Raios Gama para o Monitoramento de Suspensões Aquosas de Densidades Variadas</i>				

A defesa do Trabalho de Conclusão de Curso ocorreu no Auditório Giulio Massarani (Sala 1K228) da Faculdade de Engenharia Química/UFU e a Banca Examinadora foi assim composta: Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno - FEQUI/UFU, Prof. Dr. Fran Sérgio Lobato - FEQUI/UFU, Dra. Flávia Marques Fagundes - PPD/FEQUI/UFU, coorientadora, e Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca - FEQUI/UFU, orientador do discente.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca - FEQUI/UFU, apresentou a Comissão Examinadora e o discente, e concedeu a este a palavra para a exposição de seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, em ordem e sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o discente. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, em sessão secreta a Banca atribuiu o resultado, considerando o discente:

Aprovado. Nota: 95 (noventa e cinco).

Nada mais havendo a tratar, foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que, após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Fabio de Oliveira Arouca, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/09/2025, às 10:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fran Sergio Lobato, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/09/2025, às 10:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Jorge Ribeiro Damasceno, Professor(a) do Magistério Superior**, em 05/09/2025, às 10:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Flávia Marques Fagundes, Usuário Externo**, em 05/09/2025, às 11:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6652084** e o código CRC **193DF2A4**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que, com amor, esforço e dedicação, batalharam incansavelmente para que eu pudesse estudar e alcançar meus objetivos. Foram eles que, com cada sacrifício e cada incentivo, tornaram possível essa conquista. A vocês, minha eterna gratidão e amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, à minha mãe, Sandra, e ao meu pai, Alicésio, pela constante prontidão, paciência, exemplos de honestidade e disciplina, e por terem investido na minha formação.

Agradeço à minha namorada, companheira e amiga, Anna Carolina, que sempre me incentivou e me deu forças para seguir em frente.

Sou grato a Deus pela oportunidade de contribuir, ainda que modestamente, para a Engenharia Química, após anos de estudo, dedicação e aprendizado.

Expresso minha gratidão aos professores que dedicam a vida à nobre missão de despertar nos outros a capacidade de superação, desenvolvimento e aprendizado. Em especial, agradeço ao Professor Fábio Arouca pela confiança, oportunidade e amizade.

Agradeço também à pós-doutoranda Flávia Fagundes por sua valiosa contribuição, orientação, disponibilidade e por acompanhar de perto meu trabalho, oferecendo o auxílio necessário, além de sua amizade.

"A educação   a arma mais poderosa que você
pode usar para mudar o mundo."

Nelson Mandela

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estabelecer as condições operacionais de um sistema de detecção de radiação gama, utilizando o radioisótopo Césio-137 de baixa atividade, aplicado à Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG) para o monitoramento de suspensões aquosas de altas densidades. Foram ajustados parâmetros experimentais como voltagem de operação, ganho fino, discriminadores de nível inferior e superior, tempo de contagem, número mínimo de contagens e tempo de resolução, visando maximizar a precisão e a reprodutibilidade do sistema. A calibração inicial permitiu centralizar o pico fotoelétrico no canal 238, enquanto uma segunda calibração posicionou o pico no canal 507, com foco na faixa central da escala do analisador multicanal. Durante os experimentos, foi determinada a constante de calibração β (1,3792), o tempo de resolução médio τ' (0,0180 segundos), e definida a região de interesse (ROI) com base no valor médio do FWHM. O sistema foi validado com testes utilizando uma suspensão de barita a 30% (v/v), inicialmente sedimentada e, posteriormente, ressuspensa por agitação mecânica. Foram realizadas leituras em diferentes alturas da coluna sedimentada, com tempo de aquisição de 1800 segundos por ponto, permitindo o monitoramento da variação da concentração volumétrica de sólidos ao longo da interface sólido-líquido. Os resultados experimentais indicaram um perfil de concentração decrescente ao longo da altura da suspensão, compatível com o comportamento esperado de sedimentação gravitacional. O sistema apresentou resposta estável e coerente com a literatura, evidenciando a viabilidade da TARG como técnica não invasiva e confiável para monitoramento de suspensões densas. Conclui-se que o uso do Césio-137 ampliou a faixa de concentrações monitoráveis e reforçou a aplicabilidade do sistema em processos industriais de separação sólido-líquido.

Palavras-chave: atenuação de raios gama; Césio-137; sedimentação; calibração; monitoramento de suspensões.

ABSTRACT

This study aimed to establish the operating conditions of a gamma radiation detection system using a low-activity cesium-137 radioisotope, applied to the Gamma-Ray Attenuation (GRA) technique for monitoring high-density aqueous suspensions. Experimental parameters, including operating voltage, fine gain, lower and upper-level discriminators, counting time, minimum number of counts, and resolution time, were systematically adjusted to maximize the precision and reproducibility of the system. The initial calibration positioned the photoelectric peak at channel 238, whereas a second calibration centered the peak at channel 507, thereby focusing on the central region of the multichannel analyzer scale. During the experiments, the calibration constant β (1.3792) and the average resolution time τ' (0.0180 s) were determined, and the Region of Interest (ROI) was defined based on the average full width at half maximum (FWHM). The system was validated through tests using a 30% (v/v) barite suspension, which was initially allowed to settle and subsequently resuspended by mechanical agitation. Measurements were conducted at different heights along the settled column, with an acquisition time of 1800 s per point, enabling the monitoring of volumetric solids concentration variations across the solid–liquid interface. The experimental results revealed a decreasing concentration profile with increasing height, consistent with the expected behavior of gravitational sedimentation. Overall, the system exhibited a stable and reproducible response in agreement with literature data, demonstrating the feasibility of the GRA technique as a non-invasive and reliable method for monitoring dense suspensions. It is concluded that the use of cesium-137 expanded the range of measurable concentrations and reinforced the applicability of the system to industrial solid–liquid separation processes.

Keywords: gamma-ray attenuation; Cesium-137; sedimentation; calibration; suspension monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação esquemática das zonas de sedimentação.....	18
Figura 2.2 - Estrutura do detector de NaI(Tl) e vários tipos de interações de raios gama que ocorrem na configuração típica de fonte-detector-escudo.....	22
Figura 2.3 - Representação esquemática das funções gerais de um sistema de espectroscopia gama com detector de NaI(Tl), sendo todas essas funções integradas no <i>digiBASE</i>	22
Figura 2.4 - <i>digiBASE All-in One PMT Base, HV</i> , Pré-amplificador, Amplificador e MCA Digital.....	23
Figura 2.5 - Interface do <i>software</i> Maestro para aquisição, visualização e análise de espectros de energia.....	24
Figura 3.1 - Ilustração da unidade de aplicação de radioisótopos.....	29
Figura 3.2 - Fotografia do sistema de detecção de radiação com <i>digiBASE</i> acoplado ao cristal de NaI(Tl).....	30
Figura 3.3 - Procedimento de verificação do alinhamento dos orifícios dos blocos de chumbo da fonte radioativa e do detector, utilizando ponteiro laser.....	31
Figura 3.4 - Aba <i>MCB Properties</i> do <i>software</i> Maestro.....	32
Figura 3.5 - Aba <i>High Voltage</i> do <i>software</i> Maestro.....	32
Figura 3.6 - Aba <i>Presets</i> do <i>software</i> Maestro.....	32
Figura 3.7 - Bloco de chumbo vedado (fonte selada) contendo, em seu interior, o radioisótopo Césio-137.....	33
Figura 3.8 - Bloco de chumbo sem a tampa (fonte aberta) contendo, em seu interior, o radioisótopo Césio-137.....	33
Figura 3.9 - Sistema de detecção com a placa de acrílico (meio atenuante A) utilizada para obter I_A	37

Figura 3.10 - Sistema de detecção com a placa de acrílico (meio atenuante B) utilizada para obter I_B	38
Figura 3.11 - Sistema de detecção com as placas de acrílico (meio atenuante AB) utilizadas para obter I_{AB}	38
Figura 3.12 - Sistema de detecção com a fonte aberta e sem meio atenuante para obter I_0	38
Figura 3.13 - Sistema de detecção com a fonte selada e sem meio atenuante para obter I_{BG}	39
Figura 3.14 - Sistema de detecção com a proveta de teste contendo apenas solução de goma xantana 0,2% m/m.....	4040
Figura 3.15 - Suspensão de $BaSO_4$ em goma xantana sendo agitada no misturador de hélice (Ika RW 20D2Mn) à 1000 rpm.....	41
Figura 3.16 - Suspensão de $BaSO_4$ em goma xantana posicionada no sistema da TARG.....	41
Figura 4.1 - Espectros obtidos com a fonte selada.....	43
Figura 4.2 - Espectros obtidos com a fonte aberta.....	44
Figura 4.3 - Espectros obtidos para voltagens de 500 a 675V.....	46
Figura 4.4 - Espectros obtidos para voltagens de 700 a 850V.....	47
Figura 4.5 - Espectros obtidos para ganho fino de 0,4 a 1,0.....	49
Figura 4.6 - Espectros obtidos para ganho fino de 1,1 a 1,2.....	50
Figura 4.7 - Espectros obtidos para voltagens de 654 a 675V.....	51
Figura 4.8 - Espectros obtidos para voltagens de 671 a 628V e ganho fino de 0,4 a 0,7.....	53
Figura 4.9 - Espectros obtidos para voltagens de 654 e 640V e ganho fino de 0,5 e 0,6 respectivamente.....	55

Figura 4.10 - Espectros obtidos com a fonte selada e nos intervalos de 10 a 1023 e de 194 a 284.....	56
Figura 4.11 - Análise do desvio padrão amostral das contagens de pulsos, sendo considerada a área líquida (Net).....	58
Figura 4.12 - Médias e desvios padrão das contagens (<i>Net</i>) de pulsos em diferentes intervalos de tempo.....	60
Figura 4.13 - Variações percentuais nas contagens (<i>Net</i>) de pulsos em diferentes intervalos de tempo.....	61
Figura 4.14 - Espectro obtido para voltagem de 720V e ganho 0,5x.....	66
Figura 4.15 - Espectro obtido para voltagem de 725V e ganho 0,5x.....	66
Figura 4.16 - Espectro final obtido após os ajustes de voltagem, ganho, discriminadores e ROI, com o pico do Césio-137 centralizado na faixa de operação.....	68
Figura 4.17 - Meios atenuantes utilizados no sistema experimental.....	70
Figura 4.18 - Sistema de detecção com o meio atenuante (A) utilizado para obter I_A	70
Figura 4.19 - Sistema de detecção com o meio atenuante (B) utilizado para obter I_B	71
Figura 4.20 - Sistema de detecção com o meio atenuante (AB) utilizado para obter I_{AB}	71
Figura 4.21 - Materiais utilizados como anteparos adicionais para reforço da blindagem: tampa de chumbo e placas de aço.....	72
Figura 4.22 Sistema de detecção montado com a fonte selada e os anteparos adicionais instalados.....	72
Figura 4.23 - Sistema de detecção de radiação gama com a proveta posicionada na TARG, indicando os níveis de leitura da região clarificada, da suspensão ressuspena e da interface dos sólidos sedimentados.....	74
Figura 4.24 - Curva de calibração da suspensão.....	75

Figura 4.25 - Sistema montado para a análise do sedimento da suspensão de barita a 30% (v/v), com a proveta posicionada entre o detector e a fonte de radiação gama.....77

Figura 4.26 - Perfil da concentração volumétrica de sólidos em função da distância da base da proveta, obtido na análise da sedimentação da suspensão de barita.....79

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição e quantidades utilizadas no preparo da solução de goma xantana (GX) a 0,2% (m/m).....	40
Tabela 4.1 - Resultados de contagens nos canais com maiores picos.....	42
Tabela 4.2 - Resultados para determinação da voltagem ótima.....	45
Tabela 4.3 - Resultados para determinação do ganho fino.....	48
Tabela 4.4 - Resultados para determinação da voltagem ótima.....	50
Tabela 4.5 - Resultados do número de contagens para aumento do ganho fino e redução da voltagem.....	52
Tabela 4.6 - Repetições dos testes para ganho fino de 0,5 e voltagem de 654V.....	54
Tabela 4.7 - Repetições dos testes para ganho fino de 0,6 e voltagem de 640V.....	54
Tabela 4.8 - Valores de <i>Lower</i> e <i>Upper Level Discriminator</i> para o canal central 238.....	56
Tabela 4.9 - Valores médios de contagens (<i>Net</i>) de pulsos em diferentes intervalos de tempo...	59
Tabela 4.10 - Valores médios utilizados na estimativa do tempo de resolução do sistema, obtidos a partir das contagens <i>Net</i>	62
Tabela 4.11 - Resultados do número do canal, contagens, valor do FWHM e distância entre o pico de ruído e o pico do Césio-137.....	65
Tabela 4.12 - Resultados das dez repetições para o número do canal do segundo pico, contagens e FWHM, com voltagem de 721 V e ganho de 0,5x.....	68
Tabela 4.13 - Espessuras e tipo de material dos meios atenuantes que foram utilizados no sistema.....	69
Tabela 4.14 - Resultados das áreas líquidas (<i>Net</i>) obtidas nas diferentes condições experimentais e tempo de resolução calculado para o sistema.....	73

Tabela 4.15 - Valores da intensidade de radiação, corrigida pelo tempo de resolução, por segundo e do primeiro termo da Equação 2.7 em função da concentração volumétrica de sólidos da suspensão.....	75
Tabela 4.16 - Alturas das regiões de leitura para a análise da sedimentação da suspensão de barita a 30% (v/v).....	77
Tabela 4.17 - Resultados experimentais obtidos na análise da sedimentação: distância em relação à base da proveta, área líquida, intensidade de radiação corrigida (R) e concentração volumétrica de sólidos.....	78

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos.....	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
1.2	Estrutura do Trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Sedimentação	17
2.1.1	Fundamentos da Sedimentação em Suspensões Newtonianas	17
2.1.2	Sedimentação em Suspensões Não Newtonianas	18
2.1.3	Estudo da Sedimentação em Batelada de Fluidos de Perfuração	19
2.2	Técnica de Atenuação de Raios Gama	20
2.2.1	Radiação Gama e Atividade de Fontes Radioativas	20
2.2.2	Sistema de Detecção com Cristal de Iodeto de Sódio Ativado com Tálho NaI(Tl)	21
2.2.3	Análise da Sedimentação via TARG	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Unidade de aplicação de raios gama (TARG)	29
3.2	Aprimoramento dos parâmetros da Técnica de Atenuação de Raios Gama.....	30
3.2.1	Método de análise dos espectros.....	31
3.2.2	Método de determinação da voltagem ótima do sistema	34
3.2.3	Método de determinação do ganho ideal	34
3.2.4	Método de determinação dos discriminadores de nível superior e inferior	35
3.2.5	Método de determinação da quantidade mínima de contagens	36
3.2.6	Método de determinação do tempo de resolução do sistema	37
3.2.7	Método de determinação do intervalo de tempo das contagens de pulsos	39
3.2.8	Método de determinação da curva de calibração do sistema.....	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41

4.1	Análise do espectro	42
4.2	Determinação da voltagem ótima do sistema	44
4.3	Determinação do ganho ideal	47
4.3.1	Nova determinação da voltagem ótima	50
4.3.2	Ajustes no ganho e na voltagem ótima	52
4.4	Determinação do <i>lower e upper level discriminator</i>	55
4.5	Determinação da quantidade mínima de contagens.....	57
4.6	Determinação do intervalo de tempo das contagens de pulsos.....	58
4.7	Determinação do tempo de resolução do sistema.....	61
4.8	Avaliação Alternativa da Calibração com o Pico do Césio-137 no Canal 507	63
4.8.1	Determinação da voltagem ótima do sistema	64
4.9	Nova determinação do tempo de resolução do sistema	69
4.10	Determinação da curva de calibração	73
4.10.1	Teste de análise da sedimentação	75
5	CONCLUSÕES	80
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	81
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é um ativo estratégico para a economia brasileira, gerando renda, empregos e promovendo o desenvolvimento regional. Segundo a ANP (2021), o Brasil se destaca como um dos principais produtores de petróleo na América Latina, refletindo sua relevância nas relações comerciais internacionais. Além disso, a indústria petrolífera cria milhares de empregos, especialmente nas regiões Sudeste e Nordeste, contribuindo para o crescimento econômico e para a redução das desigualdades regionais (MENDES, 2020).

A exploração de petróleo envolve uma série de etapas, sendo a perfuração dos poços uma das mais importantes. Essa etapa ocorre em diversos estágios devido aos diferentes tipos de formações rochosas e às condições de pressão, exigindo o uso de fluidos especialmente formulados para esse processo (CARDOSO, 2005). Durante a perfuração, ocorrem paradas operacionais, durante as quais o fluxo do fluido de perfuração é interrompido. Nessas condições, as partículas que estavam sendo transportadas à superfície pelo fluxo ascendente do fluido no espaço anular entre a broca e a parede do poço tendem a se depositar. Esse acúmulo pode causar danos ao equipamento e ao poço, resultando na obstrução da broca e no aumento do torque necessário para reiniciar a perfuração (CAENN *et al.*, 2017).

Com o crescimento da produção de petróleo na camada do pré-sal brasileira e os potenciais problemas operacionais que podem surgir, como a obstrução do poço, riscos à segurança e elevação dos custos, torna-se fundamental aprofundar o conhecimento sobre a sedimentação de partículas durante as paradas operacionais.

Nesse contexto, a Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG) tem sido empregada há anos na análise de sedimentação pelo Laboratório de Aplicação de Radioisótopos da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Essa metodologia, consolidada em diversas dissertações (AROUCA, 2003; FAGUNDES, 2015; SANTOS, 2017) e teses (AROUCA, 2007; MOREIRA, 2014; FAGUNDES, 2019), comprovou sua eficácia ao permitir o monitoramento de suspensões concentradas sem comprometer a estabilidade do meio.

Dessa forma, o sistema atualmente em uso emprega o Amerício-241 como fonte radioativa. No entanto, esse radioisótopo apresenta limitações para o estudo de fluidos de perfuração com elevadas concentrações de sulfato de bário, devido à significativa atenuação

dos feixes de raios gama pelo material. Em contrapartida, o Césio-137, com energia de aproximadamente 660 keV, é cerca de 11 vezes mais energético que o Amerício-241. Essa característica permite a obtenção de resultados confiáveis em suspensões contendo sólidos como o sulfato de bário, amplamente utilizado na formulação de fluidos de perfuração.

Portanto, este trabalho propõe estudar as condições operacionais ótimas do sistema de direcionamento e detecção de raios gama provenientes do Césio-137 de baixa atividade, conforme detalhado nos objetivos a seguir.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho de conclusão de curso foi determinar as condições operacionais ótimas do sistema de direcionamento e detecção de raios gama provenientes do Césio-137 de baixa atividade (10 μCi).

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- i. determinar a voltagem de operação ideal do sistema de detecção;
- ii. definir o intervalo de energia adequado para a emissão de raios gama pelo Césio-137;
- iii. estabelecer o número de contagens necessário para um monitoramento eficiente;
- iv. determinar a duração ideal de cada contagem de raios gama;
- v. calcular o tempo de resolução adequado para o sistema de detecção;
- vi. realizar o monitoramento de suspensões aquosas de sulfato de bário, utilizando o sistema de detecção de raios gama.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado como segue: no capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o assunto; no capítulo 3 são destacados os materiais e métodos que foram empregados no estudo; os resultados são apresentados no capítulo 4; já as conclusões estão exibidas no capítulo 5.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta informações sobre a sedimentação gravitacional em batelada, considerando fluidos newtonianos e não newtonianos, além disso, aborda pesquisas sobre a Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG) aplicada à análise da sedimentação.

2.1 Sedimentação

2.1.1 Fundamentos da Sedimentação em Suspensões Newtonianas

A sedimentação de partículas sob a ação da gravidade é um processo amplamente estudado desde os trabalhos pioneiros de Coe e Clevenger (1916). Em suspensões homogêneas, inicialmente, as partículas sedimentam a uma velocidade constante, formando posteriormente uma camada de sólidos consolidada pelo peso das partículas, promovendo a expulsão do líquido através dos poros do sedimento.

Esses autores identificaram quatro zonas distintas de sedimentação: zona de clarificado, zona de concentração constante, zona de concentração variável e zona de compactação. A seguir a Equação 2.1 apresenta a expressão proposta por Coe e Clevenger (1916) para a velocidade superficial de sólidos alimentados:

$$q_s = \frac{v_{s_0}}{\frac{1}{\epsilon_{s_0}} - \frac{1}{\epsilon_{s_u}}} \quad (2.1)$$

em que q_s representa a velocidade superficial dos sólidos, v_{s_0} a velocidade de sedimentação das partículas na região de concentração constante, ϵ_{s_0} a concentração inicial de sólidos e ϵ_{s_u} a concentração de retirada da lama.

Posteriormente, Comings (1940) observou que essa teoria é aplicável apenas para partículas incompressíveis. Para sedimentos compressíveis, a altura da zona de compactação passa a ser uma variável relevante. Kynch (1952) propôs uma teoria de sedimentação baseada em balanço de massa, considerando a dependência exclusiva da velocidade de sedimentação com a concentração local de sólidos.

As principais hipóteses incluem a uniformidade da concentração em planos horizontais e a desprezível influência de efeitos de parede. A sedimentação foi dividida por Kynch (1952)

em quatro regiões: líquido clarificado, sedimentação livre, transição e formação do sedimento. A Figura 2.1 ilustra esquematicamente essas zonas.

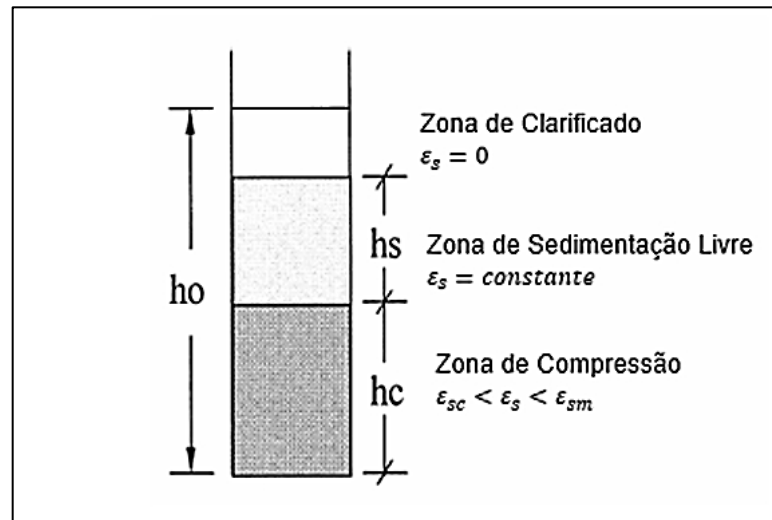


Figura 2.1 - Representação esquemática das zonas de sedimentação. Fonte: adaptado de ROCHA (2018).

2.1.2 Sedimentação em Suspensões Não Newtonianas

Allen e Uhlherr (1989) investigaram a sedimentação em fluidos newtonianos e não-newtonianos. Os autores identificaram que, no caso dos fluidos newtonianos, o fenômeno apresenta uma distribuição homogênea no recipiente; contudo, a sedimentação em meios não newtonianos é fortemente influenciada pelas propriedades reológicas, como a pseudoplasticidade, a tixotropia e a viscoelasticidade.

Segundo Daugan et al. (2002a e 2002b), a complexidade do processo é ampliada em função da dependência da viscosidade com a taxa de deformação, da tensão inicial de escoamento e da possível formação de estruturas internas.

Em fluidos pseudoplásticos e tixotrópicos, partículas isoladas tendem a criar canais de escoamento preferenciais que facilitam a sedimentação local, resultando em regiões com diferentes concentrações de partículas (DAUGAN et al., 2004). A formação desses canais reduz a resistência à sedimentação em áreas adjacentes, mas pode retardar o processo em regiões de menor concentração de partículas, onde o fluido tende a recuperar sua estrutura original.

Além disso, em fluidos com limite de escoamento, observa-se o fenômeno de aglomeração de partículas durante a sedimentação. Essa aglomeração ocorre devido às

perturbações no campo de tensão do fluido provocadas pela movimentação de uma partícula, que induz a aproximação de partículas vizinhas (GUESLIN et al., 2006).

Outro aspecto relevante é a influência do diâmetro das partículas: partículas maiores sedimentam mais rapidamente, mesmo em fluidos de alta viscosidade (BOBROFF; PHILLIPS, 1998). A concentração de sólidos também impacta o comportamento: suspensões mais concentradas apresentam maior viscosidade aparente e menor velocidade de sedimentação (ALLEN; UHLERR, 1989).

Em fluidos tixotrópicos, o reestabelecimento da estrutura interna do fluido após a deformação inicial pode retardar ainda mais a sedimentação, prolongando o tempo necessário para a completa separação das fases (MILLER; MELIK, 1996).

De maneira geral, a sedimentação em suspensões não newtonianas envolve a competição entre a força gravitacional, a resistência viscosa do fluido e os efeitos de interação entre partículas, exigindo a consideração de fatores como pseudoplasticidade, elasticidade e tixotropia para a correta modelagem do processo (LARUCCIA, 1990; CHHABRA; RICHARDSON, 2008).

2.1.3 Estudo da Sedimentação em Batelada de Fluidos de Perfuração

A tese de Fagundes (2019) trouxe contribuições relevantes para o entendimento da sedimentação gravitacional em batelada de partículas presentes em fluidos de perfuração. O estudo envolveu a caracterização reológica de suspensões contendo carboximetil celulose (CMC) e hematita, utilizando a Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG) como ferramenta de monitoramento não destrutivo da concentração volumétrica de sólidos ao longo do tempo.

Foram propostas equações constitutivas para a pressão nos sólidos e para a permeabilidade dos sedimentos formados. Os resultados indicaram que a adição de CMC e de hematita aumentou a estabilidade das partículas em suspensão, retardando a sedimentação e formando sedimentos mais compactos. A permeabilidade foi observada como função predominantemente da concentração volumétrica de sólidos, apresentando pouca dependência da altura de monitoramento.

As análises reológicas mostraram que fluidos com maiores características de pseudoplasticidade e tixotropia apresentaram melhor capacidade de manutenção de sólidos

suspensos, sendo este comportamento essencial para mitigar problemas operacionais durante paradas de circulação na perfuração de poços de petróleo.

2.2 Técnica de Atenuação de Raios Gama

2.2.1 Radiação Gama e Atividade de Fontes Radioativas

A radiação gama consiste em fótons de alta energia emitidos por núcleos atômicos instáveis, sendo uma forma de radiação eletromagnética que se distingue por sua elevada frequência e alto poder de penetração. Essa radiação é frequentemente associada à desexcitação nuclear, ocorrendo após processos de decaimento alfa ou beta, nos quais o núcleo resultante se encontra em um estado excitado e libera o excesso de energia por meio de fótons gama (CANDU OWNERS GROUP, 2005; DAMASCENO, 2005).

A interação da radiação gama com a matéria se dá de forma indireta, sendo os principais mecanismos o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares. Tais interações ocorrem pontualmente, com transferência localizada de energia. Devido à sua natureza eletromagnética e ausência de carga elétrica, os fótons gama são altamente penetrantes, exigindo materiais densos e de alto número atômico, como chumbo ou concreto, para uma blindagem eficaz. O conceito de camada de meia-espessura, *Half Value Layer* (HVL), é utilizado para indicar a espessura necessária de material que reduz pela metade a intensidade da radiação incidente (CANDU OWNERS GROUP, 2005).

Além de processos de decaimento, os fótons gama também pode ser gerados por reações de captura radiativa, como nas reações (n, γ) , nas quais o núcleo absorve um nêutron e libera o excesso de energia como radiação gama. Tais fenômenos são fundamentais em aplicações industriais, médicas e em técnicas de monitoramento de processos (DAMASCENO, 2005).

Um conceito correlato essencial é o de atividade radioativa, que expressa a taxa de desintegração nuclear de uma amostra. A unidade do Sistema Internacional para atividade é o Becquerel (Bq), correspondente a uma desintegração por segundo, sendo o Curie (Ci), equivalente a $3,7 \times 10^{10}$ Bq, ainda amplamente utilizado.

A atividade decresce ao longo do tempo, conforme os núcleos instáveis se transformam em estáveis, seguindo uma lei de decaimento exponencial. Esse comportamento é caracterizado pela meia-vida ($T_{1/2}$), que representa o tempo necessário para que a atividade de uma amostra

se reduza à metade (DAMASCENO, 2005; CANDU OWNERS GROUP, 2005).

A compreensão integrada desses conceitos, radiação gama e atividade, é fundamental para o desenvolvimento de sistemas de detecção, blindagem e monitoramento em engenharia nuclear, além de ser base conceitual para técnicas como a atenuação de raios gama aplicadas em processos industriais e científicos.

2.2.2 Sistema de Detecção com Cristal de Iodeto de Sódio Ativado com Tálcio NaI(Tl)

O detector de iodeto de sódio ativado com tálcio NaI(Tl) destaca-se na espectroscopia gama por sua elevada eficiência de detecção, simplicidade de operação e custo acessível, sendo amplamente empregado em aplicações científicas, industriais e médicas (ORTEC, 2009; ORTEC, 2011).

Seu princípio de funcionamento, apresentado na Figura 2.2, baseia-se no fenômeno da cintilação, quando um fóton gama interage com o cristal, elétrons são excitados a estados energéticos superiores e, ao retornarem ao estado fundamental, liberam fótons de luz visível. Esses fótons são captados pelo fotocátodo de um tubo fotomultiplicador (PMT).

O cristal de NaI(Tl) contém tálcio como dopante, responsável por introduzir níveis energéticos intermediários na banda proibida (*band gap*) do material. Esse ajuste viabiliza a emissão de luz em comprimento de onda compatível com a sensibilidade do fotocátodo, maximizando a eficiência quântica do sistema (ORTEC, 2011). Os fótons emitidos atingem o fotocátodo do PMT, promovendo a emissão de fotoelétrons pelo efeito fotoelétrico. Esses elétrons são acelerados e multiplicados em uma série de dínodos, amplificando a corrente elétrica inicial em até 10^6 vezes (ORTEC, 2009; ORTEC, 2011).

O sinal elétrico gerado no ânodo do PMT é conduzido a um pré-amplificador, cuja função é preservar a forma do pulso e reduzir interferências elétricas. Em seguida, o sinal passa por um amplificador linear, que ajusta sua amplitude para compatibilidade com o Analisador Multicanal (MCA), responsável por processar os sinais elétricos e transformá-los em informações espectrais (ORTEC, 2011). A Figura 2.3, a seguir, apresenta a estrutura eletrônica modular utilizada com o detector NaI(Tl), enquanto a Figura 2.4 exibe o equipamento *digiBASE*, que integra todas as funções representadas na Figura 2.3.

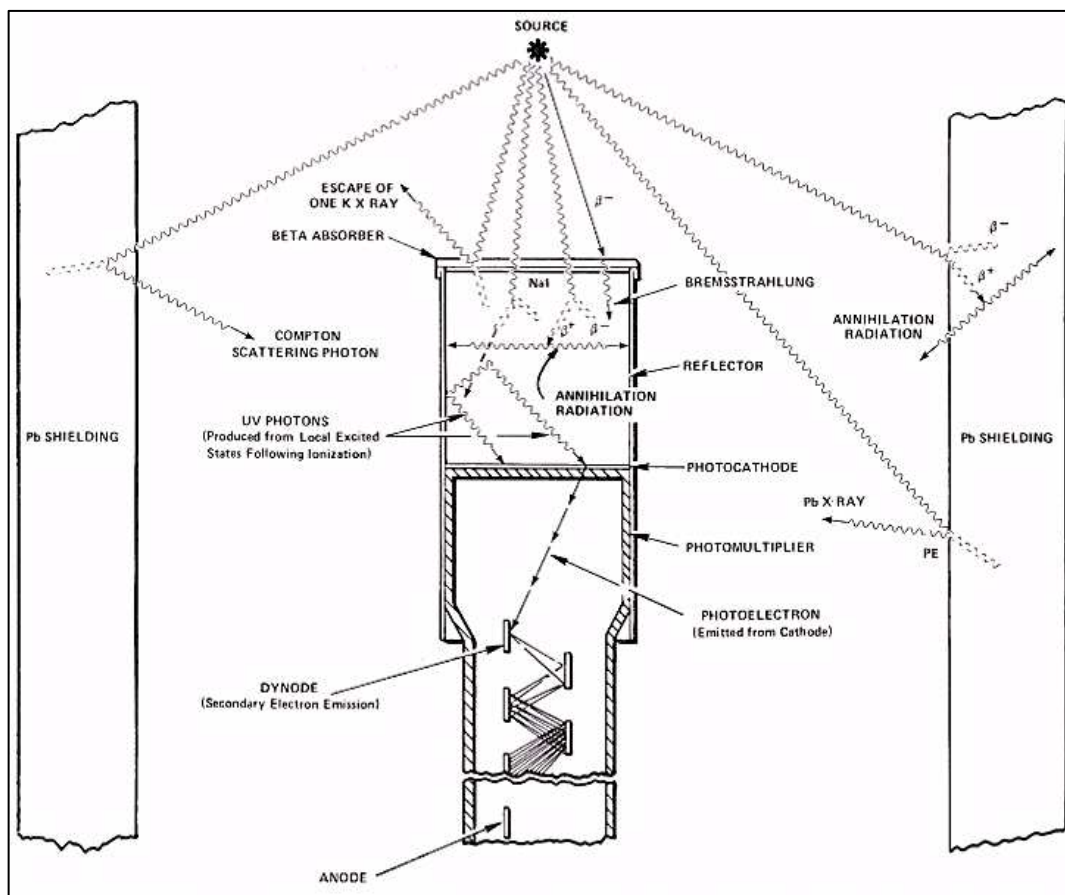


Figura 2.2 - Estrutura do detector de NaI(Tl) e vários tipos de interações de raios gama que ocorrem na configuração típica de fonte-detector-escudo. Fonte: ORTEC (2009).

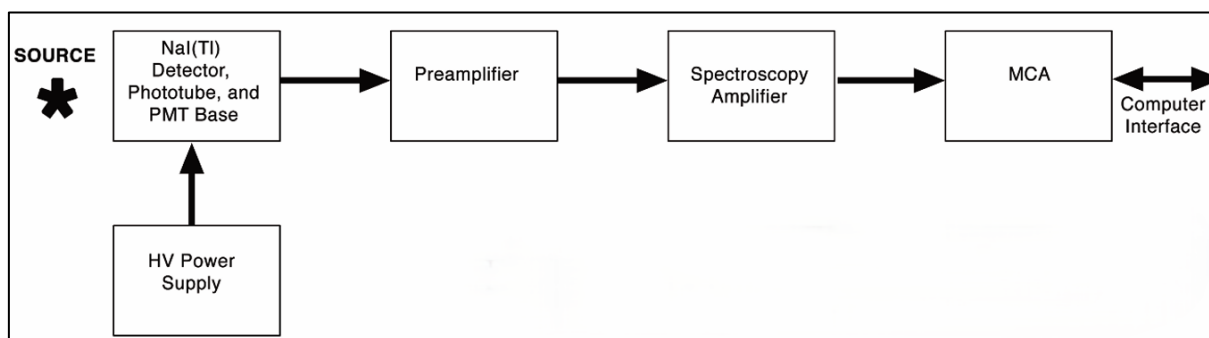


Figura 2.3 - Representação esquemática das funções gerais de um sistema de espectroscopia gama com detector de NaI(Tl), sendo todas essas funções integradas no *digiBASE*. Fonte: ORTEC (2009).



Figura 2.4 - *digiBASE All-in One PMT Base, HV, Pré-amplificador, Amplificador e MCA Digital*. Fonte: ORTEC (2009).

O Analisador Multicanal (MCA) desempenha papel central no sistema de detecção, sendo responsável por classificar os pulsos elétricos recebidos de acordo com sua amplitude. Cada pulso é atribuído a um canal específico, o qual representa uma faixa discreta de energia. Assim, o MCA constrói um histograma no qual o eixo horizontal corresponde à energia (ou número do canal) e o eixo vertical indica o número de contagens para cada canal, formando o espectro de energia da radiação detectada (ORTEC, 2011).

O MCA integra um Conversor Analógico-Digital (ADC), que transforma os sinais analógicos amplificados em valores digitais, permitindo sua contagem e registro. O Analisador de Altura de Pulso (PHA) mede a amplitude de cada pulso, vinculando-a diretamente à energia depositada no cristal. O Controlador Multicanal (MCB) gerencia a aquisição de dados e os parâmetros de análise, incluindo o tempo de aquisição, calibração e controle da interface do sistema (ORTEC, 2009).

Cada canal do espectro representa uma faixa específica de energia, e o número total de canais disponíveis determina a resolução espectral do sistema. Quanto maior o número de canais, maior a capacidade de discriminar picos próximos no espectro, garantindo maior precisão e detalhamento analítico (ORTEC, 2011).

O *software* Maestro atua como interface fundamental para a aquisição, visualização e análise dos espectros de energia gerados pelo sistema de detecção, conforme ilustrado na Figura 2.5. Entre suas principais funcionalidades, destaca-se a possibilidade de definir Regiões de Interesse (ROI), ou seja, faixas específicas do espectro destinadas à análise dos picos energéticos (ORTEC, 2007). Além disso, o número do canal (*marker*), bem como o número de

contagens correspondente ao canal analisado, pode ser visualizado na parte inferior da janela principal do *software*, também apresentado na Figura 2.5.

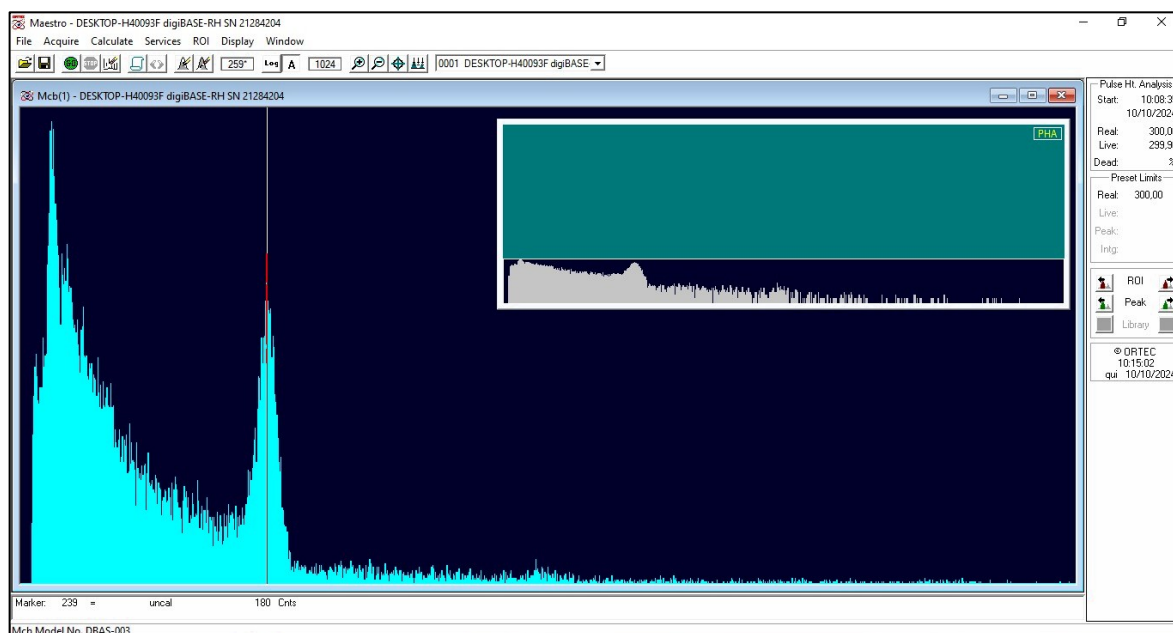


Figura 2.5 - Interface do *software* Maestro para aquisição, visualização e análise de espectros de energia. Fonte: realizado pelo autor.

A partir da definição da ROI, o Maestro calcula dois parâmetros fundamentais: a Área Bruta (*Gross Area*), que corresponde ao total de contagens registradas sob o pico, incluindo as contribuições da radiação de fundo, e a Área Líquida (*Net Area*), obtida por meio da subtração do *background* (fundo). A Equação 2.2 representa esse cálculo:

$$A_{\text{Net}} = A_{\text{Gross}} - bg \quad (2.2)$$

sendo A_{Net} e A_{Gross} representam, respectivamente, área líquida e área bruta, bg é o valor estimado de *background*. O *background* é determinado por interpolação linear das contagens nas extremidades da ROI, garantindo uma estimativa representativa da radiação de fundo não associada diretamente ao pico analisado (ORTEC, 2007). Esses valores são calculados automaticamente no *software* Maestro, as informações detalhadas de como esse *software* obtém esses dados podem ser encontradas no manual do usuário (*Maestro® Software User's Manual*).

A utilização da área líquida (*Net Area*) é preferida na análise espectroscópica por proporcionar uma medição mais precisa da intensidade real do pico, eliminando as contagens de ruídos causados pela radiação de fundo. A correta definição da ROI é essencial para isolar o pico de interesse e evitar a inclusão de contagens oriundas de regiões adjacentes, assegurando

maior precisão na integração da área (ORTEC, 2011).

Além disso, o *software* Maestro implementa a correção de tempo morto, compensando o período no qual o sistema permanece temporariamente inativo após o registro de um evento. Essa correção é crucial em medições com altas taxas de contagem, prevenindo a subestimação do número real de eventos detectados (ORTEC, 2007).

A calibração do sistema de detecção é uma etapa essencial para garantir que os canais do Analisador Multicanal (MCA) correspondam corretamente às energias reais da radiação detectada. Esse processo utiliza fontes radioativas padrão, como o Césio-137 (^{137}Cs) e o Cobalto-60 (^{60}Co), cujos picos energéticos são conhecidos e utilizados para construir uma curva de calibração (canal *versus* energia). Essa curva assegura que as medições subsequentes sejam precisas e confiáveis, ajustando o sistema para que os picos observados correspondam às energias reais da radiação incidente (ORTEC, 2011). Outro parâmetro relevante é o ajuste da tensão de operação do tubo fotomultiplicador (PMT). Tensões mais elevadas aumentam o ganho eletrônico, resultando em pulsos de maior amplitude, mas também elevam o ruído eletrônico e podem saturar o sistema. Tensões mais baixas reduzem o ganho, comprometendo a detecção de eventos de baixa energia. Assim, o ajuste da tensão deve buscar um equilíbrio entre sensibilidade, resolução energética e relação sinal-ruído, garantindo a qualidade e a estabilidade do espectro obtido (ORTEC, 2009; ORTEC, 2011).

Além desses ajustes, o sistema incorpora recursos como os discriminadores de nível inferior (LLD) e superior (ULD). Os discriminadores definem os limites inferior e superior de energia aceitáveis, eliminando sinais indesejados de baixa energia ou ruídos eletrônicos, restringindo a análise apenas à faixa de interesse (ORTEC, 2009). Dessa forma, o sistema de detecção com cristal NaI(Tl), associado ao *software* Maestro e aos componentes eletrônicos como MCA, MCB, ADC e PHA, configura uma plataforma robusta, versátil e precisa para a análise espectroscópica de radiação gama. Sua aplicação abrange desde pesquisas em física nuclear e engenharia até o controle de qualidade industrial, radioproteção e diagnóstico médico, destacando-se como ferramenta indispensável em diversas áreas do conhecimento (ORTEC, 2009; ORTEC, 2011; ORTEC, 2007).

2.2.3 Análise da Sedimentação via TARG

A Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG) é amplamente reconhecida como um método não destrutivo e não invasivo, sendo empregada com alta confiabilidade em diversas áreas, incluindo odontologia (Abbosova et al., 2019), medicina (Koksal et al., 2019), agronomia (Pires, 2018) e engenharia química, especialmente em estudos sobre sedimentação de partículas em fluidos de perfuração (FAGUNDES, 2019).

A aplicação da TARG requer o uso de uma fonte radioativa e um sistema de detecção. As fontes mais utilizadas são o Amerício-241 e o Césio-137, cujos picos energéticos são, respectivamente, 60 keV e 660 keV. Assim, os raios gama emitidos pelo Césio-137 possuem uma energia cerca de 11 vezes maior que os emitidos pelo Amerício-241. Além da energia, considera-se também a atividade da fonte radioativa, ou seja, a quantidade de radiação emitida (DAMASCENO, 1992; GARDNER; ELY-JR, 1967).

Segundo Fagundes (2019), a TARG permite monitorar a variação da concentração volumétrica de sólidos em diferentes alturas e tempos sem alterar a configuração física do sistema. Seu princípio baseia-se na comparação entre a intensidade inicial dos feixes de raios gama emitidos por uma fonte radioativa e a intensidade detectada após atravessar o meio, sendo esta atenuação dependente do coeficiente de atenuação mássico, densidade e espessura do material (Gardner e Ely-Jr, 1967). A equação de Lambert (Equação 2.3) expressa essa relação:

$$I(E) = I_0 \exp(-\sigma(E)\rho y) \quad (2.3)$$

em que I_0 e I representam, respectivamente, as intensidades do feixe de radiação antes e depois da atenuação, $\sigma(E)$ é o coeficiente de atenuação mássico do material, ρ é a densidade e y indica a espessura do meio.

No caso específico em que o meio atenuante é uma suspensão sólido-líquido, a equação de Lambert assume a seguinte forma (Equação 2.4) (GARDNER; ELY-JR, 1967):

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \beta \varepsilon_s \quad (2.4)$$

Na qual, o parâmetro β corresponde a uma constante experimental, e ε_s representa a concentração volumétrica de sólidos. Conforme Damasceno (1992), isso demonstra que o logaritmo da atenuação sofrida por um feixe de raios gama ao atravessar um tubo com uma

suspensão é uma função linear da concentração volumétrica dos sólidos presentes.

Portanto, é necessário calibrar o sistema experimental para associar uma determinada atenuação à correspondente concentração de sólidos. A calibração é realizada medindo as atenuações causadas por várias suspensões com concentrações conhecidas e, em seguida, aplicando uma regressão para determinar o coeficiente β .

Todo sistema de contagem de pulsos possui um tempo de resolução (τ'), também chamado de tempo morto, durante o qual nenhuma nova contagem pode ser registrada, pois o sistema não consegue distinguir se a radiação detectada provém de uma ou de várias emissões simultâneas da fonte (GARDNER; ELY-JR, 1967).

A fração de tempo em que não ocorre contagem é o produto entre a intensidade de radiação e o tempo de resolução ($I_i \tau'$). Assim, a fração de tempo disponível para contagem é $(1 - I_i \tau')$. Dessa forma, a contagem corrigida (R_i) é obtida dividindo-se a intensidade de radiação detectada (I_i) pela fração de tempo disponível, conforme a Equação 2.5 (GARDNER; ELY-JR, 1967):

$$R_i = \frac{I_i}{(1 - I_i \tau')} \quad (2.5)$$

em que R_i é a intensidade corrigida e I_i a intensidade de radiação detectada antes da correção pelo tempo de resolução do sistema (τ').

A determinação de τ' pode ser realizada pelo método proposto por Damasceno (1992), como alternativa ao procedimento com dois radioisótopos descrito por Gardner e Ely-Jr (1967), utilizando dois meios atenuantes distintos. Primeiramente, mede-se a intensidade da radiação no sistema sem a presença de qualquer material atenuador, resultando no valor (I_0). Em seguida, realiza-se a medição da intensidade de radiação com a introdução de um meio atenuador, denominado A, posicionado entre a fonte radioativa e o detector. Assim, subtrai-se essa contagem de I_0 , obtendo-se I_A . O mesmo procedimento é repetido para as demais configurações: com o atenuador B e após, com ambos os atenuadores (A e B) posicionados simultaneamente obtendo-se, respectivamente, I_B e I_{AB} . Além dessas medições, realiza-se a contagem de radiação de fundo I_{bg} (*background*), obtida ao selar a fonte radioativa com uma placa de chumbo. A partir desses valores experimentais, é possível calcular o tempo de resolução do sistema de detecção (τ'), por meio da Equação 2.6 (GARDNER; ELY-JR, 1967):

$$\tau' = \frac{I_{AB} - I_A - I_B + I_{bg}}{I_A^2 + I_B^2 - I_{AB}^2} \quad (2.6)$$

Nessa equação, I_{AB} , I_A , I_B e I_{bg} representam as intensidades de radiação medidas nas diferentes configurações experimentais descritas no procedimento.

Com as contagens corrigidas, a relação entre a intensidade inicial (R_0) e a intensidade medida (R) é descrita pela Lei de Lambert, expressa na Equação 2.7 (GARDNER E ELY-JR, 1967):

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = \beta \epsilon_s \quad (2.7)$$

em que R e R_0 representam, respectivamente, a contagem corrigida de pulsos detectados pelo sistema na presença e na ausência de sólidos.

De acordo com Fagundes (2015) e Fagundes (2019), a curva de calibração do sistema pode ser obtida a partir de dois pontos experimentais, com base na concentração inicial de sólidos (ϵ_{sh}) e na ausência de sólidos ($\epsilon_s = 0$), utilizando as expressões logarítmicas correspondentes:

- $\ln\left(\frac{R_0}{R_h}\right)$ para a concentração volumétrica de sólidos inicial (ϵ_{sh}), e
- $\ln\left(\frac{R_0}{R_0}\right) = 0$ para a concentração volumétrica de sólidos zero ($\epsilon_s = 0$).

Esses pontos permitem construir uma relação linear entre $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ e ϵ_s , possibilitando determinar a constante β (FAGUNDES, 2019). Dessa forma, a Técnica de Atenuação de Raios Gama demonstra grande potencial na caracterização de suspensões, fornecendo informações valiosas para o estudo da sedimentação em sistemas sólido-líquido.

Assim, a revisão bibliográfica deste capítulo abordou a perspectiva teórica e os estudos mais relevantes que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. No próximo capítulo, são apresentados os materiais e métodos utilizados para obter os resultados do capítulo 4.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são apresentados os equipamentos, assim como, as metodologias que foram empregadas, de forma que, fosse possível obter os objetivos mencionados na seção 1.1.

3.1 Unidade de aplicação de raios gama (TARG)

A unidade de aplicação de raios gama era composta por uma estrutura metálica, uma fonte radioativa e um sistema de detecção, conforme apresentado na Figura 3.1.

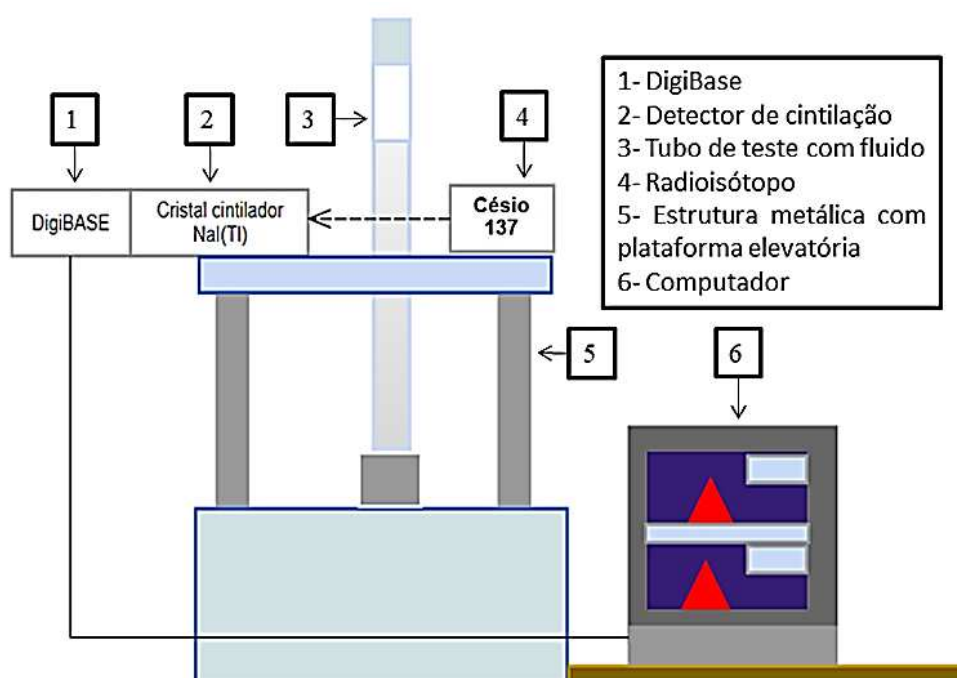


Figura 3.1 - Ilustração da unidade de aplicação de radioisótopos. Fonte: adaptado de FAGUNDES (2019).

A estrutura metálica continha uma plataforma móvel. Nessa plataforma, uma peça cúbica de chumbo contendo o Césio-137 foi acoplada em um dos lados, enquanto o sistema de detecção de radiação foi instalado no lado oposto. A radiação emitida pelo Césio-137 foi colimada por um orifício cilíndrico de 5 mm no meio atenuante, alinhado com o sistema de detecção.

O sistema de detecção de radiação (Figura 3.2) era composto por:

- i. um cristal cintilador de iodeto de sódio (NaI) ativado por Tálcio;
- ii. um *digiBASE*; e

- iii. um computador equipado com o *software* Maestro.



Figura 3.2 - Fotografia do sistema de detecção de radiação com *digiBASE* acoplado ao cristal de NaI(Tl). Fonte: adaptado de FAGUNDES (2019).

Para realizar os experimentos de medição da concentração volumétrica de sólidos, foi necessário, primeiramente, definir os parâmetros ideais de operação da unidade TARG com o Césio-137, além de determinar o tempo de resolução do sistema e a constante da curva de calibração.

Na próxima seção, são descritos os procedimentos, com base no manual *AN34 Experiments in Nuclear Science Laboratory Manual* e em Arouca (2007), para a definição da voltagem de operação e do intervalo ideal de emissão, utilizando o *digiBASE*. Também é apresentado o método alternativo proposto por Damasceno (1992) para a determinação do tempo de resolução e dos parâmetros necessários à calibração do sistema. Com as configurações aprimoradas, foram realizadas medições das contagens atenuadas por suspensões de sulfato de bário em goma xantana, variando-se as concentrações volumétricas de sólidos.

3.2 Aprimoramento dos parâmetros da Técnica de Atenuação de Raios Gama

A metodologia foi estruturada para assegurar precisão e confiabilidade nos resultados, seguindo etapas lógicas. Inicialmente, analisou-se o espectro de emissão, identificando os picos

de contagem de pulsos. Em seguida, ajustou-se a voltagem ótima do sistema de detecção com base no ganho fino, definindo os parâmetros ideais para as medições.

Com os ajustes realizados, delimitou-se a região de interesse (ROI), estabelecendo os limites superior e inferior do discriminador de nível. Determinou-se a quantidade mínima de contagens necessária para um desvio padrão aceitável e o intervalo de tempo ideal para medições, garantindo estabilidade nos dados. Após isso, avaliou-se o tempo de resolução do sistema e, por fim, determinou-se a curva de calibração, obtendo a constante beta.

3.2.1 Método de análise dos espectros

Antes da execução dos testes, realizou-se a verificação do alinhamento do equipamento, conforme ilustrado na Figura 3.3, com o propósito de assegurar o alinhamento entre o orifício do bloco de chumbo que continha a fonte radioativa e o orifício do bloco de chumbo que sustenta o detector com o cristal cintilante, garantindo a incidência dos feixes colimados de radiação gama sobre o detector. Para essa verificação, utilizou-se um ponteiro laser, permitindo a visualização direta do alinhamento entre os orifícios.



Figura 3.3 - Procedimento de verificação do alinhamento dos orifícios dos blocos de chumbo da fonte radioativa e do detector, utilizando ponteiro laser. Fonte: elaborado pelo autor.

Dessa forma, após a instalação do *software* Maestro no computador e a conexão do *digiBASE* via porta USB, com a comunicação devidamente estabelecida, os procedimentos subsequentes foram realizados a partir da janela *MCB Properties*, acessada por meio da aba *Acquire*, localizada na parte superior da interface principal do *software*. A seguir, as Figuras

3.4, 3.5 e 3.6 apresentam as abas da janela *Acquire* do *software* Maestro, que permitem o acesso aos controles do *digiBASE*.

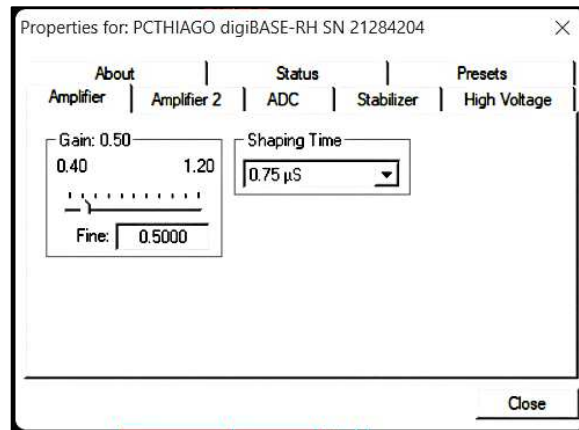


Figura 3.4 - Aba MCB *Properties* do *software* Maestro. Fonte: realizado pelo autor.

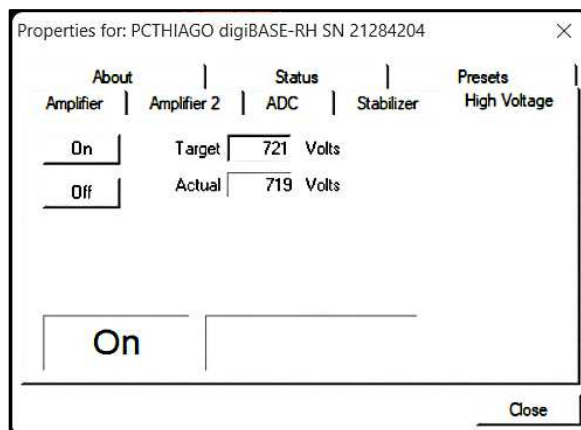


Figura 3.5 - Aba *High Voltage* do *software* Maestro. Fonte: realizado pelo autor.

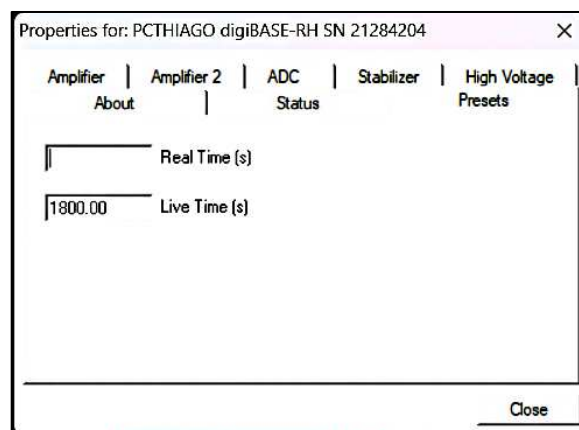


Figura 3.6 - Aba *Presets* do *software* Maestro. Fonte: realizado pelo autor.

Os espectros foram analisados nas condições de fonte selada (tampada com placa de chumbo) e fonte aberta, como ilustrado, respectivamente, nas Figuras 3.7 e 3.8.



Figura 3.7 - Bloco de chumbo vedado (fonte selada) contendo, em seu interior, o radioisótopo Césio-137. Fonte: elaborado pelo autor.



Figura 3.8 - Bloco de chumbo sem a tampa (fonte aberta) contendo, em seu interior, o radioisótopo Césio-137. Fonte: elaborado pelo autor.

Para a análise dos espectros, foram mantidos os valores padrão de fábrica: ganho grosso em 1x, ganho fino em 0,5x, *shaping time* de 0,75 μ s, *conversion gain* de 1024 canais e discriminadores de nível inferior e superior ajustados em 10 e 1023, respectivamente. A tensão de 700 V foi selecionada com base nos parâmetros da unidade utilizada com o radioisótopo Amerício-241. O tempo de contagem foi fixado em 300 segundos, visando permitir múltiplas análises diárias e reduzir a variação nas contagens. Posteriormente, esses parâmetros foram ajustados conforme a necessidade experimental.

3.2.2 Método de determinação da voltagem ótima do sistema

A calibração da voltagem ótima do sistema de detecção foi conduzida conforme o procedimento descrito no manual *AN34* (ORTEC, 2009). Inicialmente, consultou-se o manual do tubo fotomultiplicador (PMT) e a etiqueta do detector para verificar a tensão de operação recomendada pelo fabricante. Na ausência dessa informação, adotou-se uma tensão inicial intermediária, dentro da faixa típica de operação do PMT.

Embora o manual da *Ametek Ortec* indicasse uma faixa de operação do *digiBASE* entre 800 V e 1300 V, os experimentos foram iniciados com uma tensão de 500 V, valor ligeiramente abaixo do ponto médio da faixa. De acordo com o manual, recomenda-se limitar a tensão máxima a 1200 V, enquanto o representante técnico da *Ortec* sugeriu não ultrapassar 900 V. Em vista dos resultados obtidos, os testes foram conduzidos até uma tensão máxima de 850 V.

A configuração da tensão foi realizada no *software* Maestro, acessando a aba MCB *Properties* e, posteriormente, o menu *High Voltage*. A tensão desejada foi inserida no campo *Target*, a alta tensão foi ativada por meio do comando *On* e a tensão aplicada foi monitorada no campo *Actual*. Os demais parâmetros operacionais descritos na subseção 3.2.1, exceto a voltagem, foram mantidos com os mesmos valores previamente definidos.

Em seguida, foi adquirido um espectro de radiação gama no *software* Maestro, permitindo a identificação do pico fotoelétrico correspondente à energia de 662 keV. O ajuste da voltagem foi realizado até que o pico fosse posicionado no canal 238, valor de referência recomendado pelo manual *AN34 Experiments in Nuclear Science Laboratory Manual* (Ortec, 2011).

A tensão que posicionou o pico na energia calibrada foi registrada como a voltagem ótima do sistema, assegurando equilíbrio entre a resolução energética e a estabilidade do ganho. Esse valor foi documentado para garantir a reprodutibilidade das medições subsequentes.

3.2.3 Método de determinação do ganho ideal

A determinação do ganho fino (*Fine Gain*) foi realizada conforme os procedimentos descritos no manual *AN34* e no manual do *digiBASE* (ORTEC, 2009; ORTEC, 2011). Com a alta tensão previamente ajustada, adquiriu-se um espectro de radiação gama no *software* Maestro. O pico fotoelétrico correspondente à energia de 662 keV foi então identificado no

espectro, registrando-se o canal associado ao seu valor máximo.

O ajuste do ganho fino foi realizado no *software* Maestro, acessando a aba *Amplifier* e utilizando o campo numérico (faixa de operação de 0,4 a 1,2), de modo a deslocar o pico para o canal de referência 238, conforme recomendado no manual *AN34* (ORTEC, 2009). Após cada ajuste, um novo espectro foi adquirido para verificar a posição do pico, repetindo-se o processo até o correto posicionamento no canal 238. Adicionalmente, considerou-se o número de contagens registradas no canal do pico, buscando-se um ajuste que posicionasse o pico no canal 238 e simultaneamente maximizasse o número de contagens.

Assim como na subseção anterior, os demais parâmetros operacionais descritos na subseção 3.2.1, exceto o ganho fino, foram mantidos com os mesmos valores previamente definidos. Esse procedimento permitiu o alinhamento da escala de energia do espectro, assegurando a calibração energética adequada para as análises subsequentes. O valor final do ganho fino foi registrado para garantir a reprodutibilidade das medições.

O ajuste do ganho grosso exige a desmontagem física do *digiBASE*. Para evitar alterações estruturais no equipamento, o ganho grosso foi mantido no valor padrão de fábrica, equivalente a 1x.

3.2.4 Método de determinação dos discriminadores de nível superior e inferior

A determinação dos valores dos discriminadores de nível inferior (LLD) e superior (ULD) foi realizada conforme os procedimentos descritos no manual *AN34* (ORTEC, 2009). Para essa calibração, o sistema foi operado com uma fonte selada de Césio-137, mantendo as condições previamente estabelecidas: tempo de aquisição (*real time*) de 300 segundos, ganho fino ajustado em 0,6, voltagem de 640 V, *conversion gain* de 1024 canais e ULD inicial configurado em 1023.

O ajuste dos discriminadores teve como objetivo delimitar a faixa de energia de interesse, eliminando contagens indesejadas, tais como ruídos eletrônicos e eventos de baixa energia, garantindo que apenas os picos relevantes fossem processados.

O espectro obtido no *software* Maestro foi analisado com foco no pico fotoelétrico da energia de 662 keV, previamente centralizado no canal 238. Essa centralização no canal 238,

recomendada pelo manual *AN34* (ORTEC, 2009), permite o alinhamento adequado da escala energética, garantindo que a faixa útil de análise esteja corretamente posicionada e evitando que picos de maior energia, como o do Cobalto-60, ultrapassem os limites superiores do sistema multicanal.

A partir da centralização do pico, identificaram-se os canais adjacentes ao canal 238 com o menor número de contagens: um canal imediatamente à esquerda, definido como o LLD, e um canal imediatamente à direita, definido como o ULD. Esses valores foram inseridos no *software* Maestro, na aba ADC, configurando os limites de aceitação dos pulsos processados pelo sistema de detecção.

Esse procedimento permitiu o ajuste criterioso dos parâmetros de discriminação, assegurando uma análise espectroscópica mais precisa, com redução de ruídos e maior confiabilidade dos dados obtidos pelo sistema de detecção com cristal NaI(Tl) acoplado ao *digiBASE* (ORTEC, 2009).

3.2.5 Método de determinação da quantidade mínima de contagens

Para analisar o erro na contagem de pulsos devido à variabilidade do equipamento, investigou-se o comportamento das distribuições amostrais nos experimentos.

Com base no Teorema do Limite Central, mencionado em Arouca (2007), quanto maior o número de observações, mais a média amostral se aproxima da média populacional, com desvio mínimo. Assim, é possível identificar um número mínimo de medidas em que o desvio padrão seja reduzido ao mínimo necessário para garantir uma representação precisa da média.

O método de Arouca (2007) avalia a representatividade da média de pulsos de radiação, analisando a relação entre o desvio padrão de amostras de diferentes tamanhos e o desvio padrão da amostra completa de 100 pontos.

Diante disso, foram realizados testes em triplicata, com a fonte aberta e sem anteparos entre a fonte e o detector, nas condições ideais previamente determinadas para o equipamento.

Seguindo a metodologia adotada por Arouca (2007), foram coletados 100 pontos, repetindo a mesma medida de contagem de pulsos no detector. Esse conjunto amplo de dados foi considerado representativo, aproximando-se de uma população de interesse.

Cada teste consistiu em 100 contagens, com um tempo de 30 segundos por contagem. Os dados coletados foram organizados em uma planilha, onde foram calculados, considerando a média dos três testes, os desvios padrão para diferentes tamanhos de amostra (a partir de 3 contagens) e o desvio padrão da população (100 contagens).

3.2.6 Método de determinação do tempo de resolução do sistema

De acordo com o que foi apresentado na seção 2.2, a determinação do tempo de resolução ou tempo morto do sistema deu-se conforme o método de Damasceno (1992). Que propõe uma forma alternativa para determinar o tempo de resolução do sistema, utilizando dois meios atenuantes diferentes, em vez de dois radioisótopos, como sugerido por Gardner e Ely-Jr (1967).

O procedimento consiste em medir a intensidade de radiação sem meio atenuante (I_0), com um meio atenuante A (I_a), com ambos os meios A e B (I_{ab}), e apenas com o meio B (I_b), além da contagem com a fonte selada por chumbo (I_{bg}). Para obtenção das medidas I_A , I_B e I_{AB} , subtraiu-se do valor I_0 , as contagens I_a , I_b e I_{ab} , respectivamente. O tempo de resolução do sistema foi calculado por meio da Equação 2.6:

$$\tau' = \frac{I_{AB} - I_A - I_B + I_{bg}}{I_A^2 + I_B^2 - I_{AB}^2} \quad (2.6)$$

Nas Figuras 3.9, 3.10 e 3.11 estão representados, respectivamente, os meios atenuantes (placas de acrílico) A, B e AB que foram utilizadas no sistema. E nas Figuras 3.12 e 3.13 são retratados os sistemas de detecção de raios gama, sem meios atenuantes e com as fontes nas condições aberta e fechada, respectivamente.



Figura 3.9 - Sistema de detecção com a placa de acrílico (meio atenuante A) utilizada para obter I_A . Fonte: elaborado pelo autor.



Figura 3.10 - Sistema de detecção com a placa de acrílico (meio atenuante B) utilizada para obter I_B . Fonte: elaborado pelo autor.

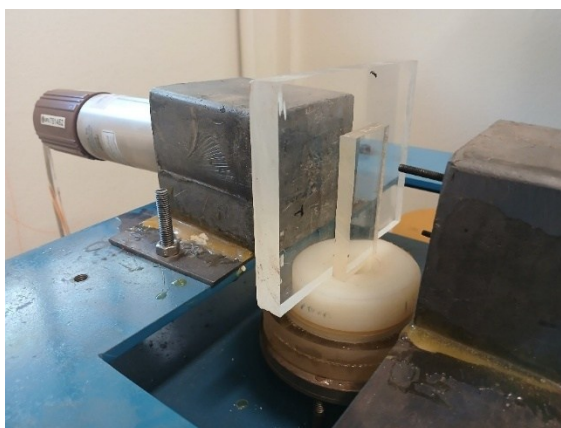


Figura 3.11 - Sistema de detecção com as placas de acrílico (meio atenuante AB) utilizadas para obter I_{AB} . Fonte: elaborado pelo autor.



Figura 3.12 - Sistema de detecção com a fonte aberta e sem meio atenuante para obter I_0 . Fonte: elaborado pelo autor.



Figura 3.13 - Sistema de detecção com a fonte selada e sem meio atenuante para obter I_{BG} .
Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.7 Método de determinação do intervalo de tempo das contagens de pulsos

Para analisar a variabilidade nas contagens de pulsos em diferentes intervalos de tempo, foi utilizado o mesmo método adotado por Arouca (2007).

Assim, empregou-se um sistema composto por uma fonte radioativa e um detector, sem a presença de um anteparo atenuador entre eles. As contagens de pulsos (CP) foram realizadas em intervalos de tempo de 3, 5, 10, 12, 15, 20, 30, 50, 90, 120 e 150 segundos. Para cada intervalo, foram efetuadas 60 medições, permitindo o cálculo da média e do desvio padrão de cada amostra. Os valores obtidos foram padronizados em pulsos por segundo ao serem divididos pelo tempo real de aquisição dos dados.

3.2.8 Método de determinação da curva de calibração do sistema

Conforme descrito na seção 2.2, a relação entre os pulsos de radiação registrados pelo sistema de detecção, composto pelo cristal cintilador e o *digiBASE*, e ajustados pelo tempo de resolução do sistema está vinculada às concentrações volumétricas de sólidos por meio de uma constante denominada β , conforme a Equação 2.6.

Para os ensaios com a suspensão de barita ($BaSO_4$), foi preparada, em laboratório, uma solução de goma xantana (GX) a 0,2% (m/m), conforme o procedimento descrito por Moreira (2014). A formulação utilizou água destilada, formaldeído e goma xantana, com adição sequencial dos componentes, seguindo a ordem e as quantidades apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Composição e quantidades utilizadas no preparo da solução de goma xantana (GX) a 0,2% (m/m).

Componente	Quantidade
Água destilada	998 ml
Formaldeído 36,5 – 38% m/m	2,0 ml
Goma xantana	2,0 g

Fonte: Elaborado pelo autor.

A solução foi agitada em um agitador mecânico de hélice (Ika RW 20D2Mn) a 1800 rpm por 30 minutos. O formaldeído foi adicionado para evitar a proliferação de micro-organismos e garantir a estabilidade reológica do fluido (Moreira, 2014). Por fim, a solução foi deixada em repouso por 24 horas para hidratação (Bicalho, 2015).

Após preparada a solução de goma xantana, foi realizado um primeiro teste com uma proveta contendo 500 ml dessa solução, conforme ilustrado na Figura 3.14.



Figura 3.14 - Sistema de detecção com a proveta de teste contendo apenas solução de goma xantana 0,2% m/m. Fonte: elaborado pelo autor.

Após esse teste, foi preparada a suspensão de sulfato de bário com 30% em volume. Essa suspensão foi agitada, em um béquer, a 1000 rpm, por 5 minutos, utilizando o mesmo misturador de hélice descrito anteriormente (Figura 3.15). Em seguida, a suspensão foi transferida do béquer para uma proveta de testes e rapidamente posicionada no sistema TARG, garantindo a mesma posição da proveta em todos os testes (Figura 3.16).



Figura 3.15 - Suspensão de BaSO₄ em goma xantana sendo agitada no misturador de hélice (Ika RW 20D2Mn) à 1000 rpm. Fonte: elaborado pelo autor.



Figura 3.16 - Suspensão de BaSO₄ em goma xantana posicionada no sistema da TARG. Fonte: elaborado pelo autor.

Este capítulo descreveu os materiais, métodos e equipamentos utilizados na realização deste trabalho. No próximo capítulo, são apresentados os resultados obtidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos nos ensaios

experimentais, estruturados em dez partes que seguem a sequência em que os experimentos foram realizados. A análise e discussão dos resultados foram realizadas utilizando técnicas estatísticas apropriadas, assegurando a confiabilidade dos parâmetros.

4.1 Análise do espectro

O primeiro passo dos testes foi a análise dos espectros da fonte nas duas condições: selada e aberta, utilizando os valores mencionados na Seção 3.2.1. A Tabela 4.1 apresenta os números dos canais e as contagens correspondentes aos maiores picos do espectro.

Tabela 4.1 - Resultados de contagens nos canais com maiores picos.

Fonte	Repetição	Nº do canal do pico maior	Nº de contagens do canal maior	Nº do canal do pico menor	Nº de contagens do canal menor
Selada	1	52 e 57	130	-	-
Selada	2	55	127	-	-
Selada	3	54	128	-	-
Aberta	1	50 e 52	148	413	99
Aberta	2	51	146	408 e 418	96
Aberta	3	52	149	408	111

Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam, respectivamente, imagens do *software* Maestro para as condições de fonte selada e aberta. A linha vertical em cada gráfico indica a maior contagem em cada pico.

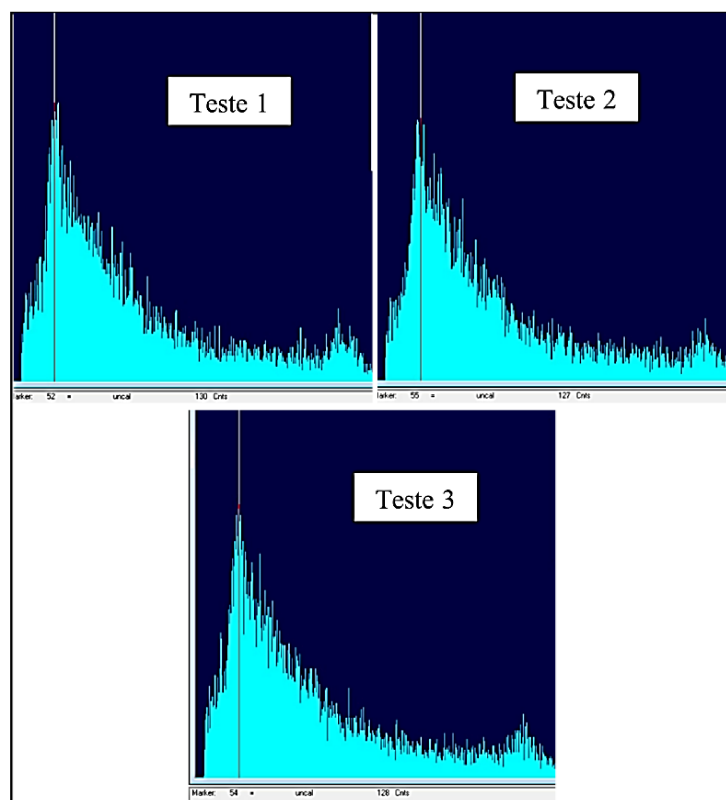


Figura 4.1 - Espectros obtidos com a fonte selada. Fonte: elaborado pelo autor.

Ao analisar a Tabela 4.1 e os espectros apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2, constatou-se que o espectro obtido com a fonte selada apresentou um pico de contagens no canal 55, com aproximadamente 130 contagens registradas durante 300 segundos de coleta. Com a fonte aberta, observou-se o mesmo pico, mas com um leve aumento nas contagens, que passaram de 130 para 148. Além disso, na condição de fonte aberta, foi identificado um segundo pico no espectro, que era menor em comparação com o pico observado na condição de fonte selada.

Com base nessas observações, acredita-se que o primeiro pico esteja relacionado à radiação proveniente do ambiente ou a algum ruído do sistema. Dessa forma, infere-se que os experimentos de atenuação de raios gama por sólidos devem considerar apenas o segundo pico, por este estar associado à detecção dos feixes de radiação emitidos pelo cézio-137.

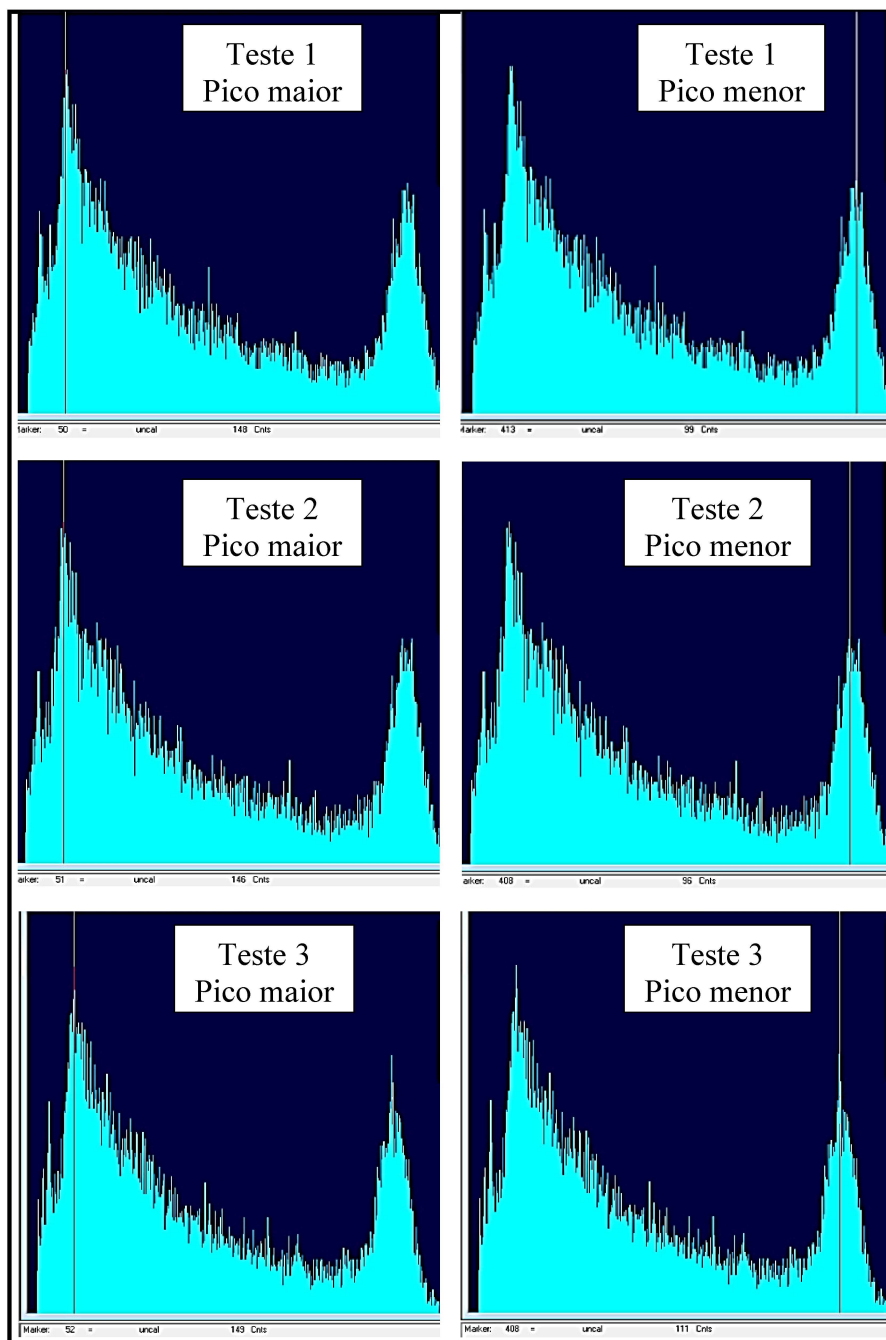


Figura 4.2 - Espectros obtidos com a fonte aberta. Fonte: elaborado pelo autor.

4.2 Determinação da voltagem ótima do sistema

Após analisados os espectros da fonte, o passo seguinte consistiu na determinação da voltagem ótima, realizada conforme as instruções do *AN34 Experiments in Nuclear Science - Laboratory Manual* e considerando os valores mencionados na seção 3.2.2.

A Tabela 4.2 apresenta os números dos canais e as respectivas contagens correspondentes ao segundo pico observado no espectro, o qual está associado à detecção dos

feixes de radiação emitidos pelo césio-137. Esses valores foram utilizados na determinação da voltagem ótima do sistema de detecção.

Tabela 4.2 - Resultados para determinação da voltagem ótima.

Fonte	Voltagem (V)	Nº do canal do menor pico	Nº de contagens do canal do menor pico
Aberta	500	13	548
Aberta	600	119	314
Aberta	650	227	182
Aberta	654	237	176
Aberta	655	246	176
Aberta	675	310	135
Aberta	700	413	99
Aberta	750	712	55
Aberta	800	-	-
Aberta	850	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

A faixa de operação dos canais variam de 10 a 1023. Na voltagem de 500V, esperava-se que o maior pico ocorresse antes do canal 13. No entanto, devido ao corte realizado no canal 10, esse pico não foi registrado, o que resultou na predominância do pico à direita sobre o da esquerda. Nas voltagens de 800V e 850V, verificou-se uma tendência de deslocamento do pico para a direita, de modo que o segundo pico não foi observado dentro da faixa de canais.

Assim, os picos registrados nessas condições correspondem à radiação de fundo ou a ruídos do sistema, e não à radiação emitida pelo césio-137. Os espectros obtidos com o sistema operando entre 500V e 850V são apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4.

Embora o manual da *Ametek Ortec* indique uma faixa de operação do *digiBASE* entre 800 e 1300 V, os experimentos foram iniciados com 500 V. Ressalta-se que o manual recomenda limitar a voltagem a 1200 V, enquanto o representante técnico da *Ortec* sugeriu não ultrapassar 900 V. Por precaução, os testes foram interrompidos em 850 V, tanto para evitar danos ao equipamento quanto pela constatação de que, a partir de 800 V, o pico do césio-137 não era registrado dentro da faixa de canais do equipamento.

Durante os testes, foi observado que, com as configurações utilizadas, o segundo pico

esperado para o Césio-137 não aparece no gráfico quando a voltagem está acima de 750 V. Além disso, conforme o manual *AN34* (página 6), o pico do Césio-137 deve estar no canal 238. Com base nessas informações e na análise do menor pico exibido nos gráficos, a voltagem de 654 V foi definida como a ideal. Em seguida, realizou-se a determinação do ganho ideal.

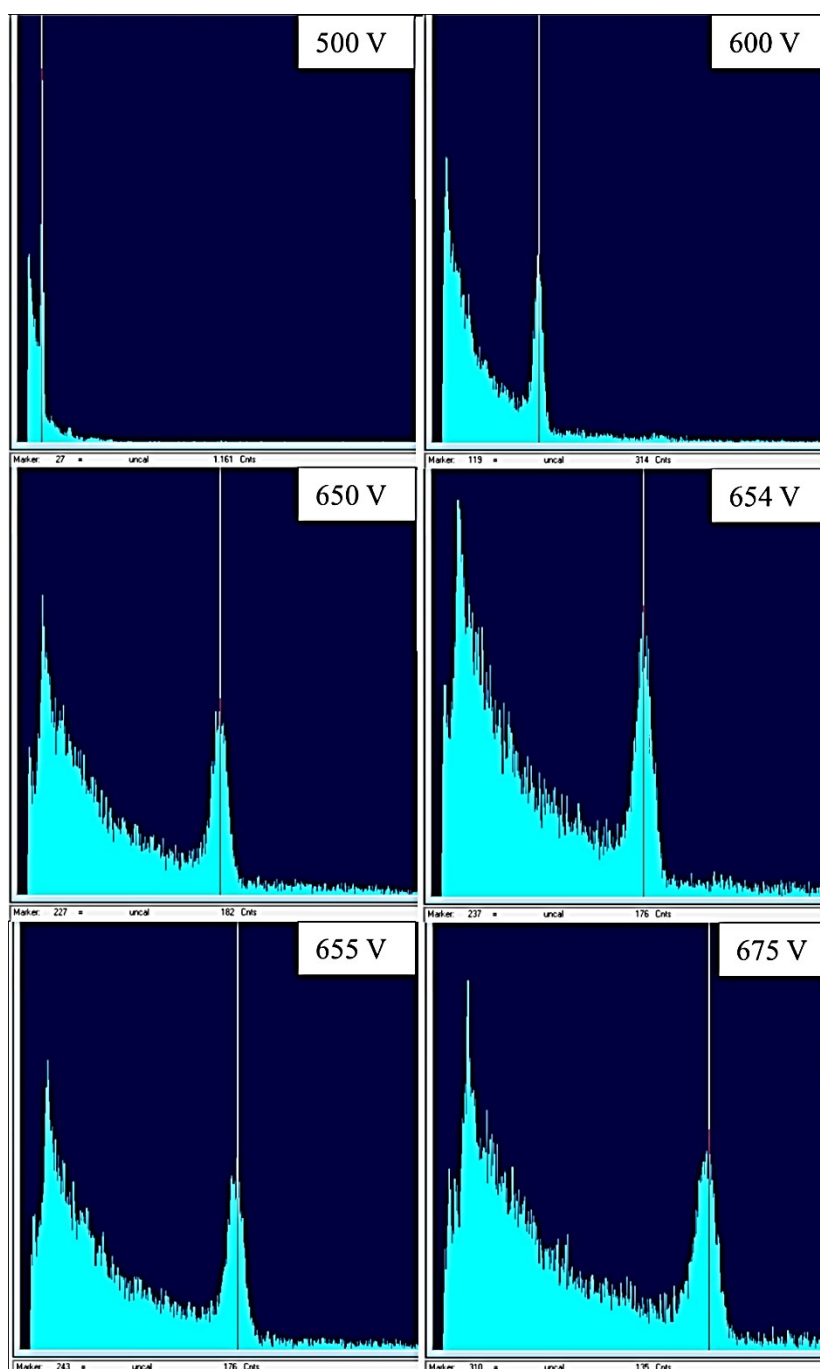


Figura 4.3- Espectros obtidos para voltagens de 500 a 675V. Fonte: elaborado pelo autor.

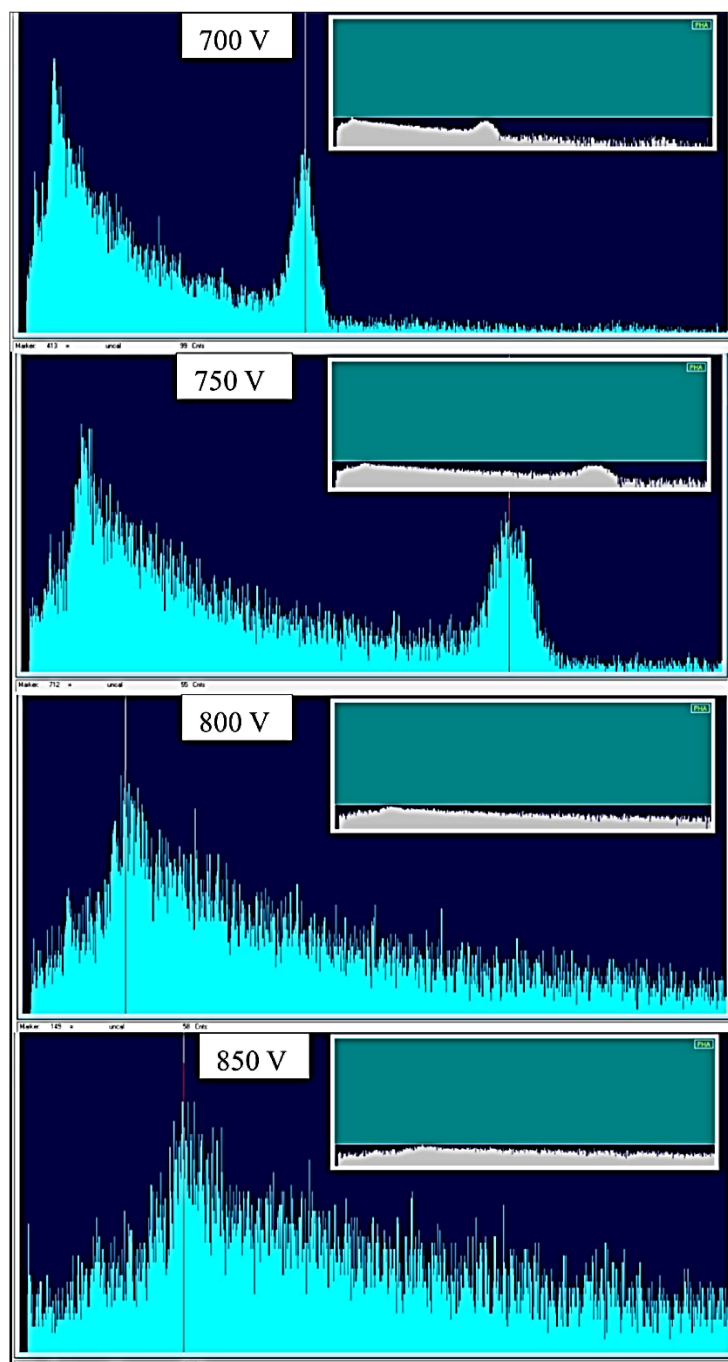


Figura 4.4 - Espectros obtidos para voltagens de 700 a 850V. Fonte: elaborado pelo autor.

4.3 Determinação do ganho ideal

A determinação do ganho ideal foi realizada de acordo com as orientações do *AN34 Experiments in Nuclear Science – Laboratory Manual*, sendo que os valores dos parâmetros utilizados corresponderam àqueles apresentados na Seção 3.2.3.

A Tabela 4.3 apresenta os números dos canais e as contagens dos principais picos, usados para determinar o ganho fino.

Tabela 2.3 - Resultados para determinação do ganho fino.

Fonte	Ganho fino	Nº do canal menor	Nº de contagens do canal menor
Aberta	0,4	189	204
Aberta	0,5	237	176
Aberta	0,6	286	138
Aberta	0,7	332	123
Aberta	0,8	378	115
Aberta	0,9	432	99
Aberta	1,0	476	93
Aberta	1,1	522	87
Aberta	1,2	567	68

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos resultados obtidos e na limitação do equipamento, cujo menor ganho fino permitido é 0,4, este valor foi escolhido como o mais adequado para os experimentos. A decisão se justifica pela maior contagem observada no pico do Césio. Assim, realizou-se uma nova determinação da voltagem ótima considerando esse ajuste no ganho fino. As Figura 4.5 e 4.6 apresentam os gráficos obtidos para os ganhos finos de 0,4 a 1,0.

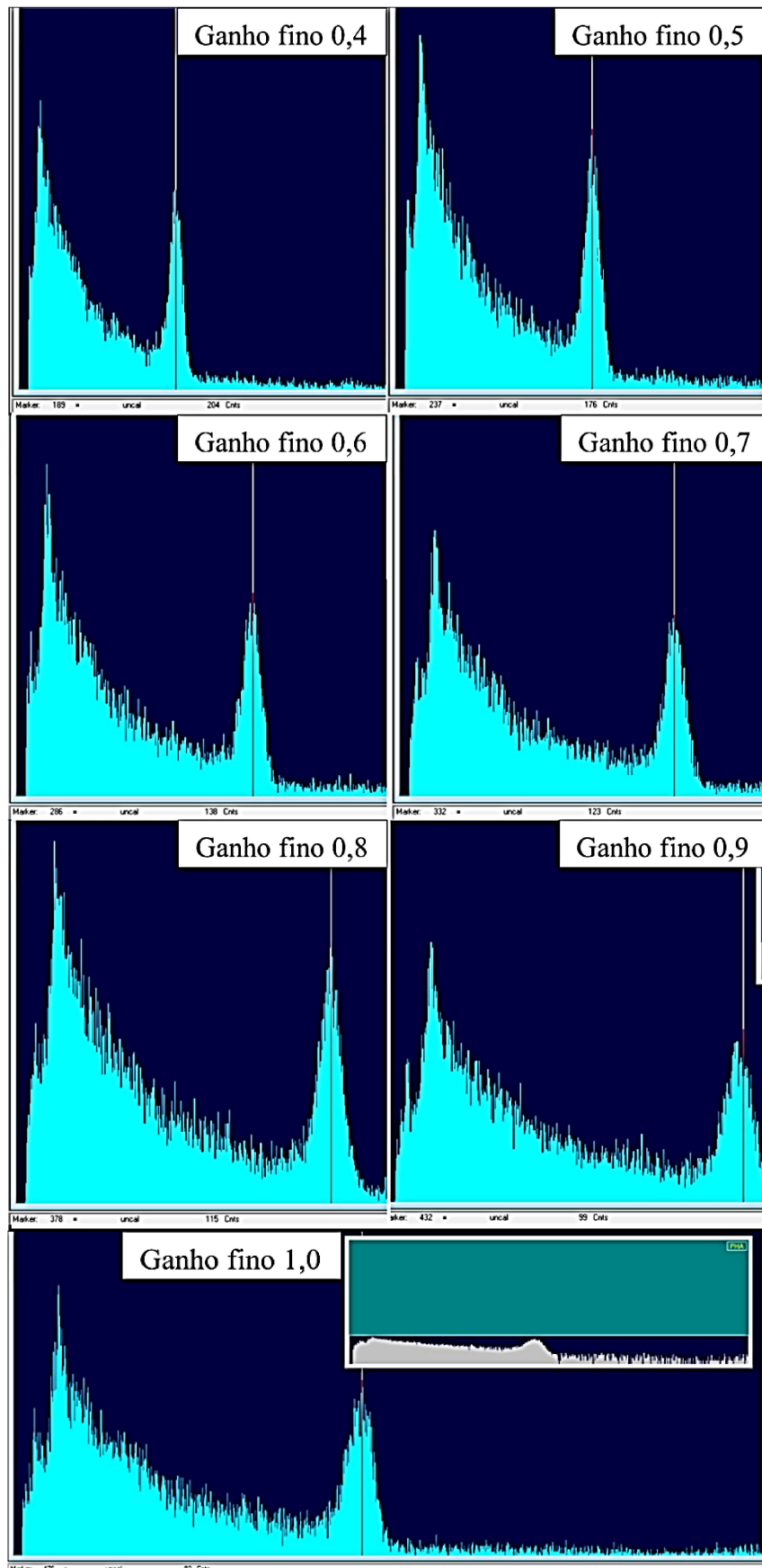


Figura 4.5 - Espectros obtidos para ganho fino de 0,4 a 1,0. Fonte: elaborado pelo autor.

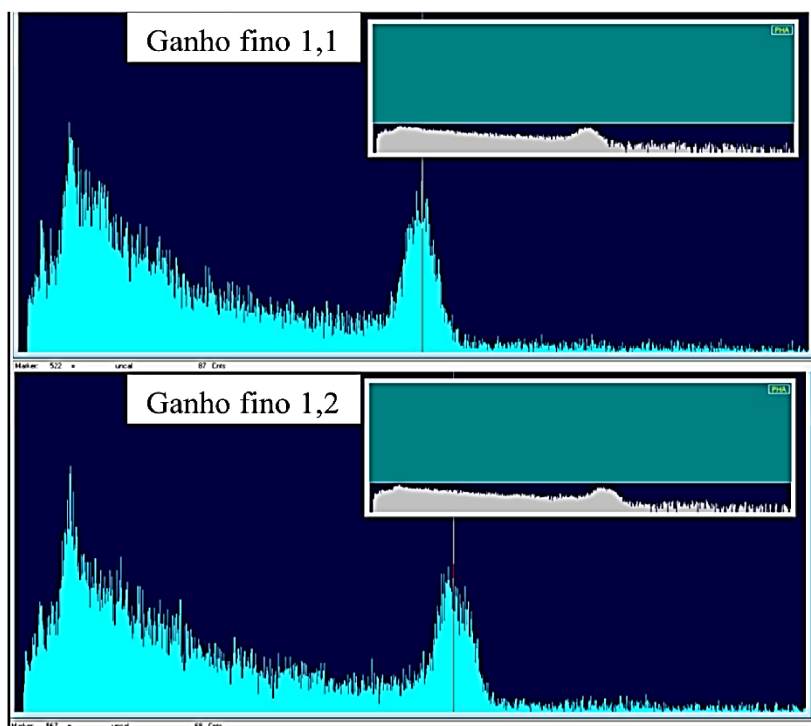


Figura 4.6 - Espectros obtidos para ganho fino de 1,1 a 1,2. Fonte: elaborado pelo autor.

4.3.1 Nova determinação da voltagem ótima

Para a nova determinação da voltagem ótima, foram mantidos os parâmetros da análise anterior, exceto pelo ajuste do ganho fino, que foi reduzido de 0,5 para 0,4.

A Tabela 4.4 apresenta os números dos canais e as contagens dos maiores picos (próximos ao canal 238) utilizados na determinação da voltagem ótima.

Tabela 4.4 - Resultados para determinação da voltagem ótima.

Fonte	Voltagem (V)	Nº do canal do menor pico	Nº de contagens do canal do menor pico
Aberta	654	189	204
Aberta	670	228	177
Aberta	671	237	169
Aberta	672	239	169
Aberta	675	245	165

Fonte: Elaborado pelo autor.

Espectros obtidos com o sistema operando em voltagens de 654 a 675V com o ganho fino de 0,4 são apresentados na Figura 4.7.

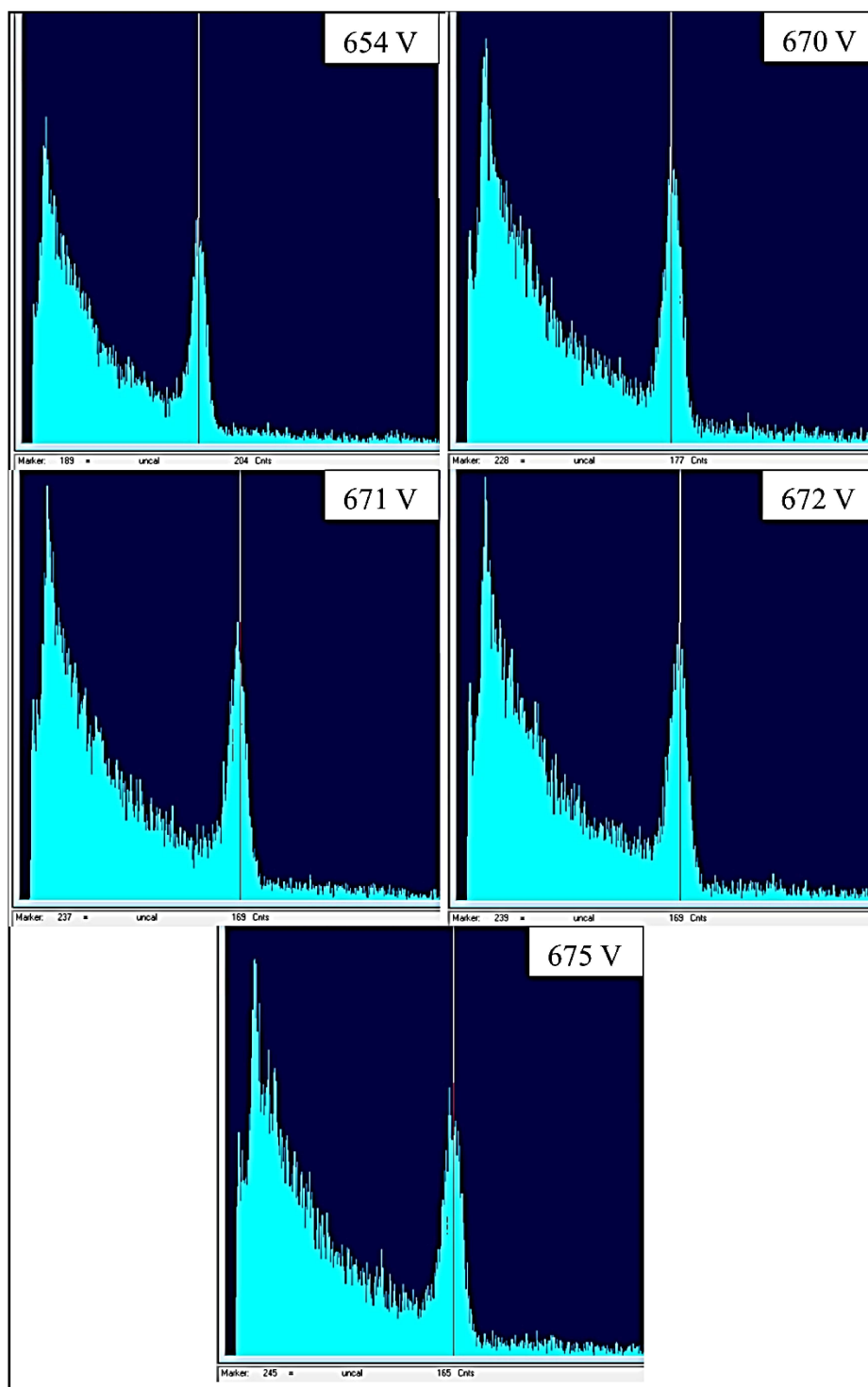


Figura 4.7 - Espectros obtidos para voltagens de 654 a 675V. Fonte: elaborado pelo autor.

Assim, a voltagem ideal para o ganho fino de 0,4 foi determinada como 671V, uma vez que posiciona o pico do Césio próximo ao canal 238.

4.3.2 Ajustes no ganho e na voltagem ótima

Com ganho fino de 0,4 e voltagem de 671V, o número de contagens registrado foi 169. Já com ganho fino de 0,5 e voltagem de 654V, o número de contagens foi 176. Dessa forma, foram realizados mais testes, aumentando o valor do ganho e diminuindo o valor da voltagem, a fim de, verificar se haveria um aumento no número de contagens.

Na Tabela 4.5, são exibidos os números de contagens para cada incremento do ganho fino e redução da voltagem, assim como, seus respectivos canais.

Tabela 4.5 - Resultados do número de contagens para aumento do ganho fino e redução da voltagem.

Fonte	Ganho fino	Voltagem (V)	Nº do canal menor	Nº de contagens do canal menor
Aberta	0,4	671	237	169
Aberta	0,5	654	237	176
Aberta	0,6	640	239	180
Aberta	0,7	628	237	173

Fonte: Elaborado pelo autor.

Espectros obtidos com o sistema operando em voltagens de 671 a 628V e ganho fino de 0,4 a 0,7, respectivamente, são apresentados na Figura 4.8.

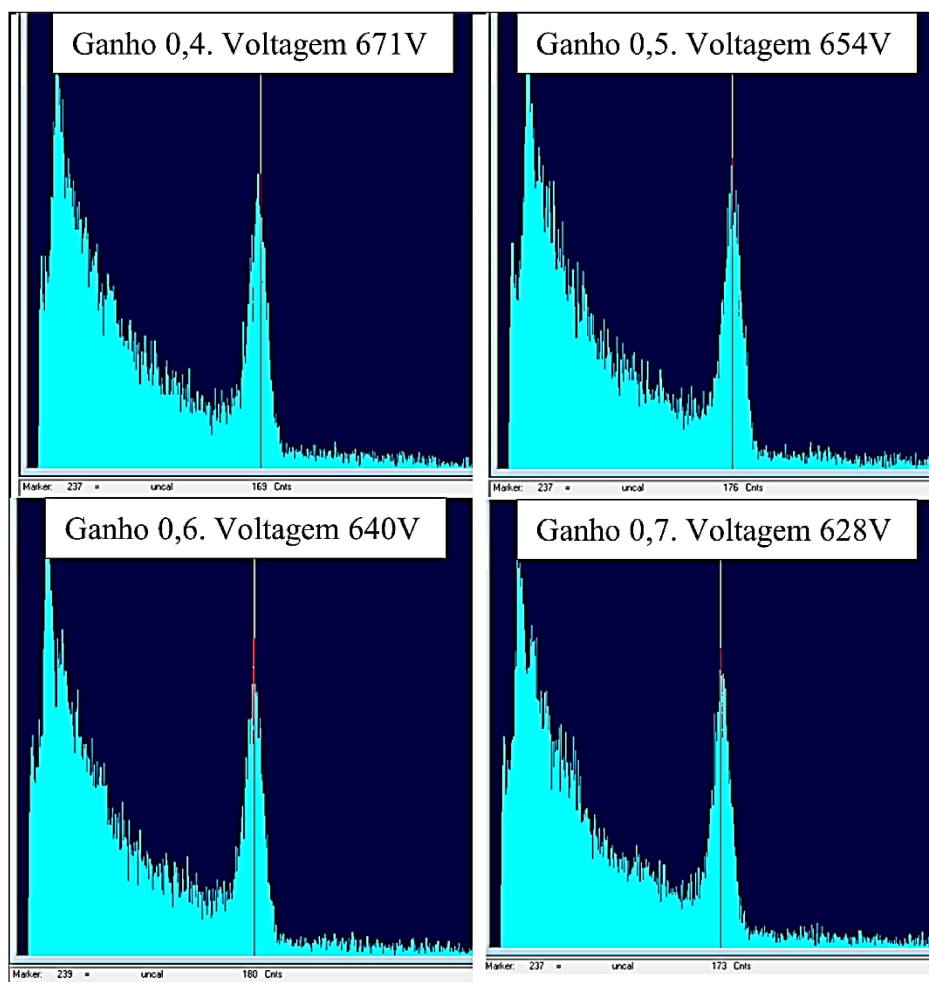


Figura 4.8 - Espectros obtidos para voltagens de 671 a 628V e ganho fino de 0,4 a 0,7. Fonte: elaborado pelo autor.

Como o número de contagens, na condição de ganho fino em 0,5 e voltagem de 654V, foi próximo ao de contagens com ganho fino de 0,6 e 640V e ambos os picos ficaram perto do canal 238, foram feitos novos testes em triplicata para ambas as condições, com a intenção de verificar em qual condição haveria a maior média do número de contagens.

As repetições das combinações de ganho fino e voltagens que resultaram em picos próximos ao canal 238 estão detalhadas nas Tabelas 4.6 e 4.7. Já a Figura 4.9 apresenta os espectros obtidos para essas repetições, considerando ambas as condições de operação mencionadas anteriormente.

Tabela 4.6 - Repetições dos testes para ganho fino de 0,5 e voltagem de 654V.

Fonte	Repetição	Ganho fino	Voltagem (V)	Nº do canal do pico menor	Nº de contagens do canal do pico menor
Aberta	1	0,5	654	237	176
Aberta	2	0,5	654	233	171
Aberta	3	0,5	654	234	168
Média		0,5	654	234,67	171,67

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.7 - Repetições dos testes para ganho fino de 0,6 e voltagem de 640V.

Fonte	Repetição	Ganho fino	Voltagem (V)	Nº do canal do pico menor	Nº de contagens do canal do pico menor
Aberta	1	0,6	640	239	180
Aberta	2	0,6	640	240	168
Aberta	3	0,6	640	237	175
Média	-	0,6	640	238,67	174,33

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, foram definidos o ganho de 0,6x e a voltagem de 640 V, visto que, sob essas condições, foi registrada a maior contagem média nas três repetições dos testes. Com o ganho fino fixado em 0,6x, o ganho grosso mantido no valor original de fábrica (1x) e a voltagem estabelecida em 640 V, o passo seguinte consistiu na definição dos discriminadores de nível inferior e superior (*lower and upper level discriminator*).

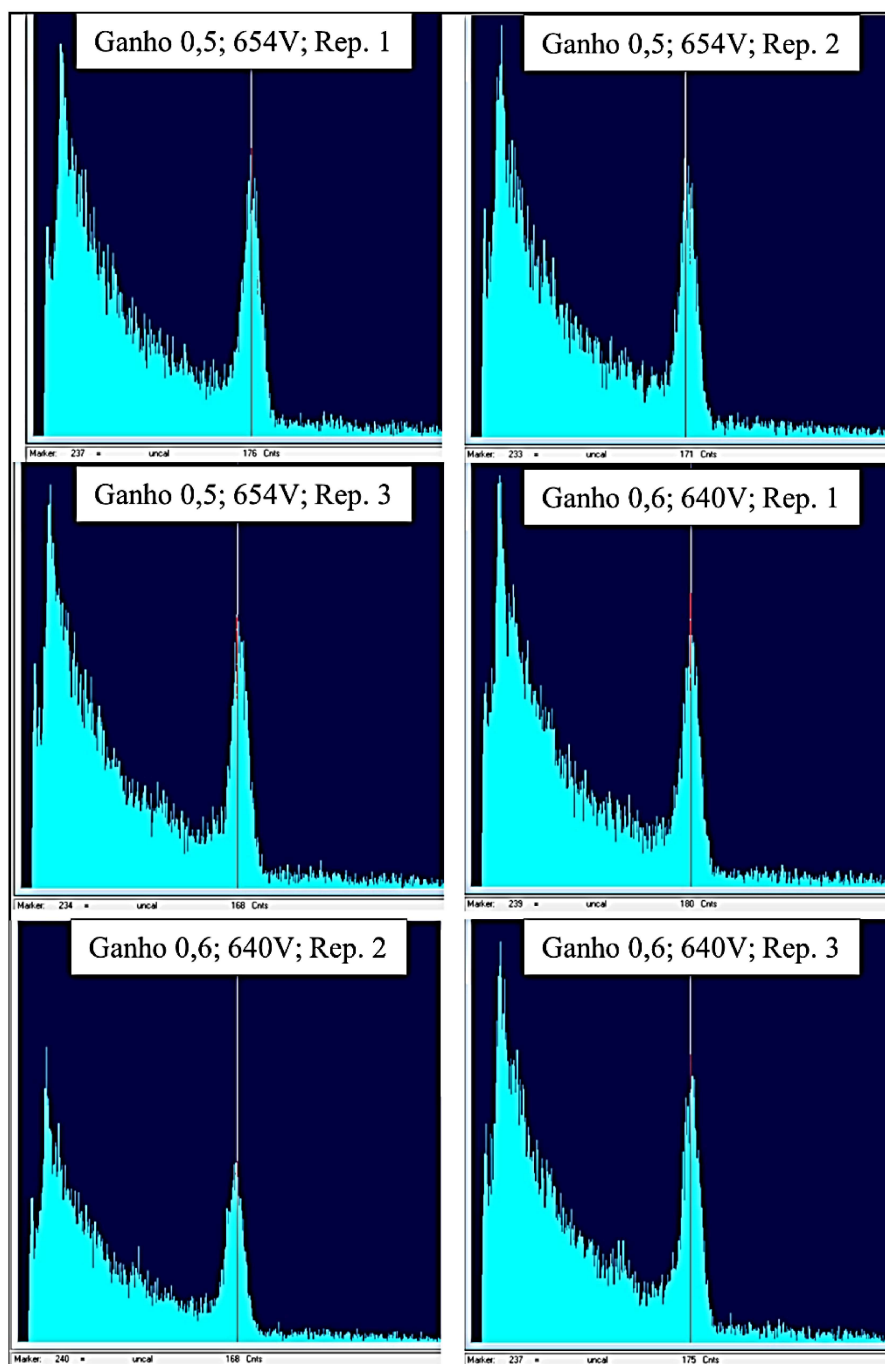


Figura 4.9 - Espectros obtidos para voltagens de 654 e 640V e ganho fino de 0,5 e 0,6 respectivamente. Fonte: elaborado pelo autor.

4.4 Determinação do *lower* e *upper level discriminator*

A determinação dos discriminadores de nível superior e inferior (*upper and lower level discriminator*) foi conduzida de acordo com as orientações do *AN34 – Experiments in Nuclear Science – Laboratory Manual*. Para essa definição, o sistema foi operado com a fonte selada, sob as seguintes condições previamente estabelecidas: tempo real de 300 segundos, ganho fino

ajustado para 0,6, voltagem de 640 V, *conversion gain* de 1024 e *upper level discriminator* configurado em 1023.

Na Tabela 4.8 são apresentados os valores de cada um desses canais, o *dead time* e as contagens registradas no canal 238, estando a fonte selada.

Tabela 4.8 - Valores de *Lower e Upper Level Discriminator* para o canal central 238.

Fonte	<i>Lower Level Discriminator</i>	<i>Upper Level Discriminator</i>	<i>Dead time</i>	Nº do canal analisado	Nº de contagens do canal
Selada	10	1023	7,6%	238	31
Selada	194	284	7,6%	238	34

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 4.10, são mostrados os espectros obtidos da fonte selada nos intervalos de 10 a 1023 e de 194 a 284, correspondentes ao *Lower e Upper Level Discriminator* respectivamente.

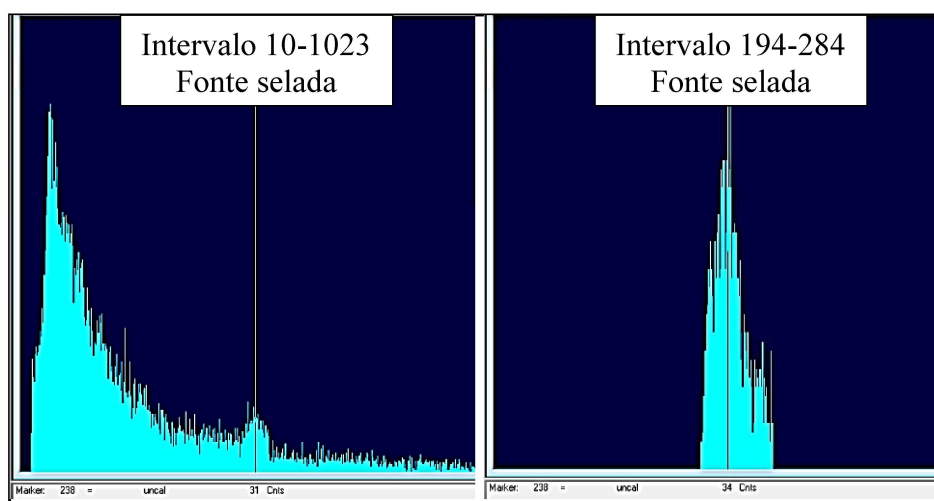


Figura 4.10 - Espectros obtidos com a fonte selada e nos intervalos de 10 a 1023 e de 194 a 284. Fonte: elaborado pelo autor.

Com a região de interesse (ROI) delimitada entre os canais 194 e 284, procedeu-se ao ajuste dos discriminadores de nível inferior e superior (*lower e upper level discriminator*), de modo a restringir a contagem de pulsos exclusivamente à faixa energética correspondente ao pico fotoelétrico do Césio-137. Essa configuração permitiu a eliminação de ruídos de fundo e sinais indesejados, assegurando que apenas os eventos relacionados à radiação de interesse fossem processados pelo sistema. Dessa forma, foram estabelecidas as condições ideais para a

coleta de contagens com maior precisão e menor variabilidade, garantindo maior confiabilidade nas medições subsequentes.

4.5 Determinação da quantidade mínima de contagens

Conforme descrito na seção 3.2.5, para avaliar o erro associado à contagem de pulsos decorrente da variabilidade do equipamento, foram coletados 100 pontos no detector, seguindo a metodologia proposta por Arouca (2007). Esse conjunto de dados foi considerado representativo da população.

A partir do Teorema do Limite Central, analisou-se a relação entre o desvio padrão de amostras de diferentes tamanhos e o desvio padrão da amostra total (100 pontos), conforme o método de Arouca (2007). Para tal, realizaram-se testes em triplicata, com a fonte aberta e sem anteparos, sob as condições ideais de operação. Cada teste consistiu em 100 contagens com tempo de 30 segundos.

Os dados obtidos foram organizados em planilha para o cálculo dos desvios padrão em diferentes tamanhos amostrais (a partir de 3 contagens) e do desvio padrão populacional. Os resultados encontram-se apresentados nos gráficos da Figura 4.11.

As análises foram realizadas com base na área líquida (*Net Area*), já conceituada na revisão bibliográfica, garantindo maior precisão ao excluir a contribuição do fundo. No *software* Maestro, essa informação é acessada na linha de informações suplementares ou pelo comando “*Peak Info*”. A utilização da área líquida foi fundamental para assegurar a confiabilidade e a reprodutibilidade das medições realizadas nesta etapa.

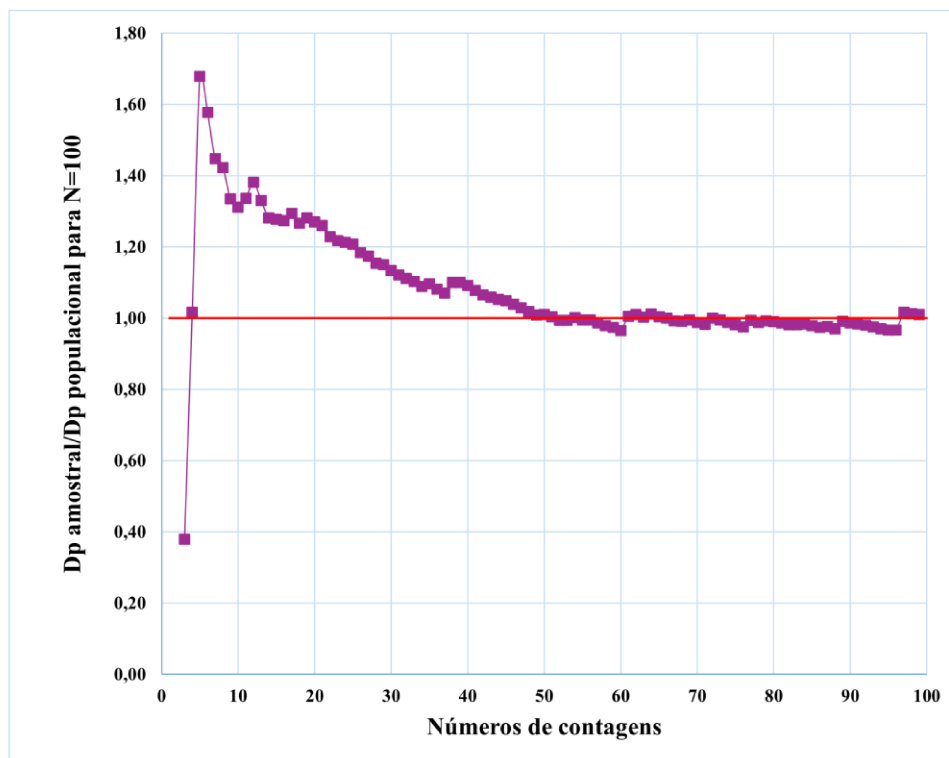


Figura 4.11 - Análise do desvio padrão amostral das contagens de pulsos, sendo considerada a área líquida (Net). Fonte: elaborado pelo autor.

A observação da Figura 4.11 demonstra que, com 60 pontos amostrados, a distribuição de erros tende à normalidade, com predominância de desvios pequenos em relação a desvios maiores. Esse comportamento assegura que a média amostral se aproxime adequadamente do valor real.

Observa-se ainda que, a partir de 55 pontos, há uma redução significativa na amplitude das oscilações em torno da unidade. Assim, qualquer amostragem com 60 pontos ou mais revela-se, graficamente, suficiente para representar com precisão a média utilizada no cálculo da concentração local de sólidos.

Concluída essa etapa, procedeu-se à determinação do menor intervalo de tempo de contagem de pulsos capaz de garantir a melhor reprodutibilidade dos ensaios.

4.6 Determinação do intervalo de tempo das contagens de pulsos

Para a determinação do intervalo de tempo das contagens de pulsos, seguiu-se o método descrito por Arouca (2007), conforme apresentado na seção 3.2.7. Para isso, o sistema foi operado com a fonte radioativa e o detector, sem a presença de anteparo atenuador. As

contagens de pulsos (CP) foram realizadas em intervalos de 3 a 150 segundos, com 60 medições para cada intervalo, permitindo o cálculo da média e do desvio padrão.

Os resultados foram padronizados em pulsos por segundo, por meio da divisão das contagens pelo tempo de aquisição. A Tabela 4.9 apresenta os valores das contagens de pulsos, calculados a partir das médias e desvios das 60 medições realizadas para cada intervalo de tempo avaliado.

Tabela 4.9 - Valores médios de contagens (*Net*) de pulsos em diferentes intervalos de tempo.

t_c (s)	CP (s⁻¹)	d_v (s⁻¹)	d% (%)
3	12	3,78	31,02
5	13	2,19	17,46
10	13	1,53	12,05
12	13	1,64	13,04
15	12	1,30	10,41
20	13	1,18	9,38
30	13	0,92	7,31
50	12	0,76	6,12
90	13	0,47	3,74
120	12	0,45	3,65
150	12	0,43	3,47

Fonte: Elaborado pelo autor.

A metodologia adotada seguiu os mesmos princípios descritos por Arouca (2007), que recomenda a realização de múltiplas medições em diferentes intervalos de tempo, de forma a minimizar os desvios estatísticos e aprimorar a precisão da média amostral.

Como não havia meio atenuador entre a fonte radioativa e o detector, todas as medições em diferentes intervalos de tempo deveriam resultar em um mesmo valor médio de contagens de pulsos, exceto pelas variações naturais das amostras. Com base nessa hipótese, o valor médio geral calculado a partir de 11 intervalos de tempo, cada um com 60 medições, foi de aproximadamente (13 ± 1) pulsos por segundo. A Figura 4.12 apresenta a análise gráfica das centralidades de cada intervalo em relação à média geral e suas variabilidades.

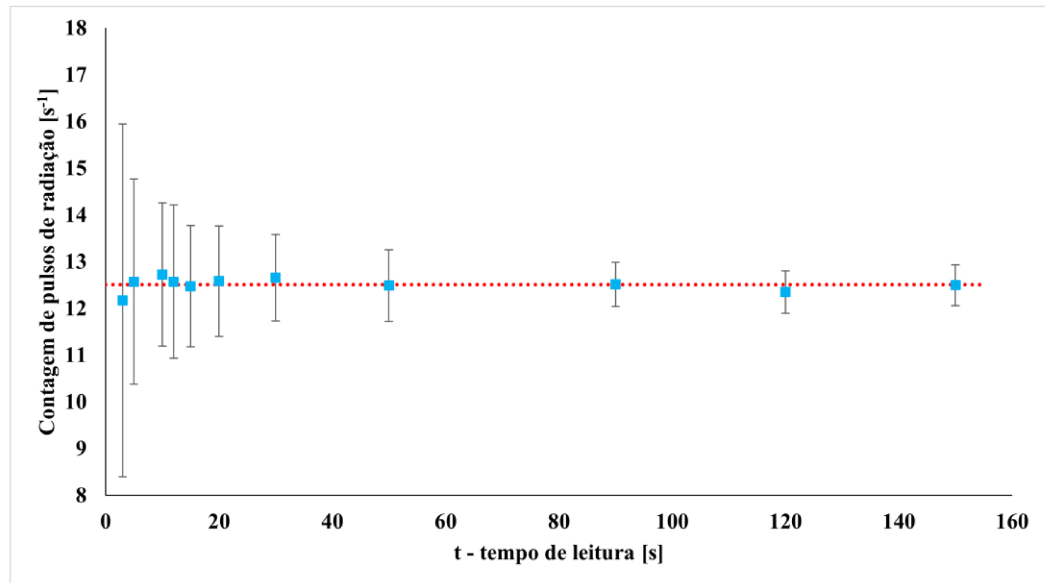


Figura 4.12 - Médias e desvios padrão das contagens (*Net*) de pulsos em diferentes intervalos de tempo. Fonte: elaborado pelo autor.

A linha tracejada na Figura 4.12 representa a média geral das contagens de pulsos. Observa-se que, embora os intervalos de 3 a 20 segundos permitam coletar mais pontos em menos tempo, eles apresentam desvios significativamente maiores. Além disso, as médias das amostras de 3 segundos exibiram os maiores desvios em relação à média geral. A Figura 4.13 exibe os desvios percentuais.

Mesmo que, intervalos de 150 segundos ofereçam maior precisão em relação à medida real, eles são inviáveis em testes dinâmicos, onde a concentração de sólidos varia com o tempo. Assim, o intervalo ideal deve equilibrar menor tempo com menores desvios, adaptando-se às características específicas de cada teste.

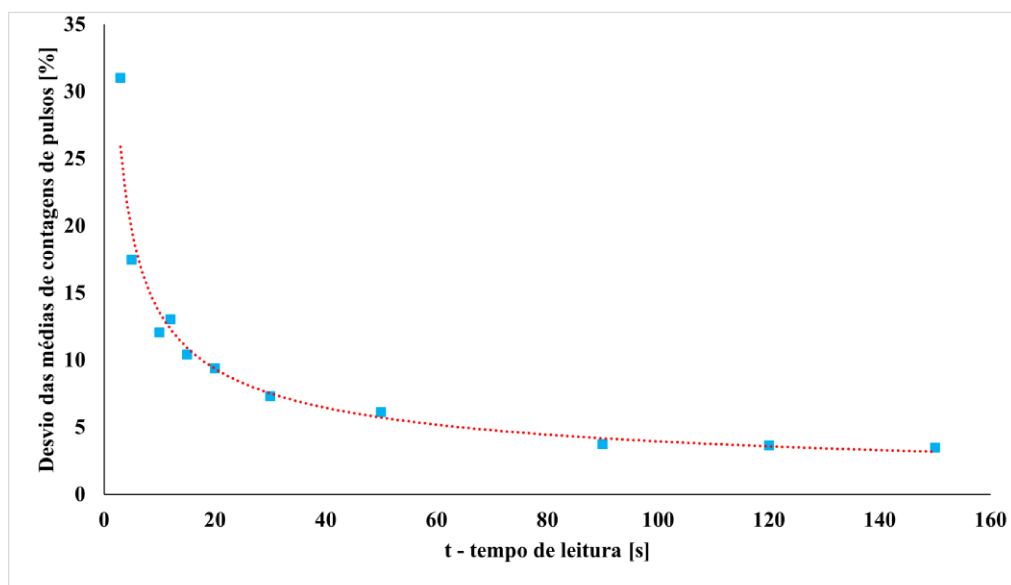


Figura 4.13 - Variações percentuais nas contagens (*Net*) de pulsos em diferentes intervalos de tempo. Fonte: elaborado pelo autor.

Com base nos resultados obtidos, estabeleceu-se o intervalo de 120 segundos para as contagens de pulsos, em razão do baixo desvio percentual observado (3,65%). Esse intervalo mostrou-se adequado para ensaios com altas concentrações de sólidos e presença de viscosificantes, uma vez que, nessas condições, a sedimentação ocorre de forma mais lenta.

Conforme destacado por Arouca (2007), o aprimoramento da aquisição de dados contribui para aumentar a representatividade e a reprodutibilidade dos ensaios laboratoriais, promovendo maior precisão. Com base nesses resultados, procedeu-se ao cálculo do tempo de resolução (tempo morto) do sistema.

4.7 Determinação do tempo de resolução do sistema

Para a determinação do tempo de resolução do sistema, utilizou-se o método mencionado nas seções 2.2 e 3.2.6.

A Tabela 4.10 apresenta os resultados obtidos com base na média aritmética das contagens realizadas para as fontes A e B individualmente, para ambas combinadas e para a fonte selada (I_{bg}).

Tabela 4.10 - Valores médios utilizados na estimativa do tempo de resolução do sistema, obtidos a partir das contagens Net.

Fonte	Contagem de Pulsos (s ⁻¹)
I₀	12,66
I_A	1,76
I_B	1,30
I_{AB}	2,64
I_{bg}	2,97

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos dados da Tabela 4.10 e na Equação 2.6, foi calculado o tempo de resolução médio (τ') a partir das contagens obtidas na área líquida (*Net*):

$$\tau' = \frac{I_{AB} - I_A - I_B + I_{bg}}{I_A^2 + I_B^2 - I_{AB}^2} \quad (2.6)$$

resultando em um valor de $-1,16$ segundos. Por ser negativo, esse valor não possui significado físico e, portanto, não representa o verdadeiro tempo de resolução do sistema.

Esse resultado pode ser atribuído ao elevado nível de radiação de fundo (I_{bg}), cujo valor, neste experimento, foi de $2,97 \text{ s}^{-1}$, sendo superior às atenuações promovidas individualmente pelos meios A, B e até mesmo pela combinação AB. Além disso, observa-se que, na Equação 2.6, o denominador tende a assumir valores negativos, uma vez que a soma $I_A^2 + I_B^2$ é inferior a I_{AB}^2 . Esse comportamento decorre do fato de que a utilização simultânea dos dois meios atenuantes entre a fonte e o detector resulta em maior atenuação da radiação gama do que quando os meios são aplicados isoladamente.

Para que o tempo de resolução I_{bg} seja positivo, é necessário que o módulo da soma ($I_{AB} + I_{bg}$) seja inferior ao módulo $|-I_A - I_B|$, de modo que o numerador da Equação 2.6 também seja negativo e, assim, anule-se com o sinal negativo do denominador.

Esses resultados evidenciam a necessidade de empregar meios atenuantes mais eficazes, a fim de aumentar os valores de I_A , I_B e I_{AB} . Considerando a elevada energia da radiação gama emitida pelo Césio-137 (660 keV), as placas de acrílico utilizadas mostraram-se insuficientes para atenuar significativamente a radiação.

Uma alternativa viável seria a substituição dessas placas por materiais de densidade elevada, como o aço. Ademais, o alto valor de I_{bg} sugere que a tampa de chumbo utilizada para vedar o orifício do bloco da fonte emissora não proporciona blindagem adequada, permitindo o escape parcial da radiação. Esse fato também é observado ao avaliar os valores dos discriminadores, pois nota-se que, mesmo com a fonte selada, ocorre um pico de contagens relacionado ao cério.

Como solução, recomenda-se a substituição da tampa por outra de maior espessura ou a adição de anteparos complementares, como uma segunda tampa associada a placas de aço, posicionados entre o bloco de chumbo da fonte (com o orifício de saída da radiação selado) e o bloco de chumbo do detector, a fim de assegurar que o sistema detecte apenas o *background* real proveniente do ambiente.

A seguir, será exibida uma avaliação alternativa da calibração do pico do Cério.

4.8 Avaliação Alternativa da Calibração com o Pico do Cério-137 no Canal 507

Como discutido na revisão bibliográfica, a calibração do sistema *digiBASE*, equipado com detector de NaI(Tl), baseia-se no ajuste de ganho e voltagem para associar a energia da radiação ao número de canais do analisador multicanal, garantindo a linearidade da relação energia-canais (ORTEC, 2009; ORTEC, 2010). Embora o canal 238 seja comumente utilizado como referência para centralizar o pico fotoelétrico de 662 keV do Cério-137, essa escolha visa facilitar a distribuição dos picos no espectro e evitar saturação nos limites da faixa de 1024 canais, não configurando uma exigência técnica obrigatória.

Tendo em vista essa flexibilidade, este trabalho realizou uma calibração alternativa, reposicionando o pico do Cério-137 no canal 507, próximo ao centro da faixa de operação (10 a 1023 canais). Esse ajuste experimental possibilitou redefinir a região de interesse (ROI), os parâmetros de ganho e os discriminadores de nível, permitindo avaliar os impactos desse novo posicionamento na qualidade das medições, especialmente nos ensaios de sedimentação.

A seguir, são descritos os procedimentos adotados na calibração com o pico centralizado no canal 507, bem como os resultados experimentais obtidos e sua análise comparativa em relação à configuração padrão.

4.8.1 Determinação da voltagem ótima do sistema

A determinação da voltagem ótima foi realizada conforme descrito na subseção 3.2.2 e de modo análogo aos procedimentos das subseções 4.2 e 4.3, com o foco, nesta etapa, direcionado a um novo canal de calibração. Para esta calibração, foi escolhido o canal 507 por estar situado próximo ao centro da faixa operacional dos discriminadores de nível inferior (LLD) e superior (ULD), que se estende do canal 10 ao 1023. Assim, a nova calibração do sistema foi conduzida com o objetivo de centralizar o pico do Césio-137 nesse ponto da faixa de operação.

Adicionalmente, foi medido o valor da largura total à meia altura (FWHM, *Full Width at Half Maximum*), definida como a distância, em número de canais, entre os pontos laterais do pico espectral correspondentes a 50% da contagem máxima. Esse parâmetro expressa a resolução do sistema, refletindo sua capacidade de distinguir energias próximas. A definição da região de interesse (ROI) está diretamente associada ao FWHM, uma vez que a ROI deve abranger a maior parte da área sob o pico, assegurando a inclusão da radiação de interesse e minimizando o ruído de fundo.

Para determinar a largura da ROI, recomenda-se centralizá-la no canal de máxima contagem e expandir seus limites simetricamente em torno desse ponto. Normalmente, adota-se uma largura equivalente a 2 a 3 vezes o FWHM, o que permite incluir cerca de 95% da área do pico, considerando a distribuição gaussiana típica dos espectros de energia (ORTEC, 2009). Esse critério contribui para maior precisão na determinação da área líquida, favorecendo medições mais representativas e confiáveis.

A Tabela 4.11 apresenta os resultados obtidos para o número do canal, contagens, valor do FWHM, bem como a distância entre os picos de ruído (primeiro pico) e o pico do Césio-137 (segundo pico).

Conforme apresentado na Tabela 4.11, observa-se que o aumento da voltagem ou do ganho resulta em um maior afastamento entre o pico de ruído e o pico do Césio-137, entretanto, esse aumento provoca uma redução no valor das contagens. Além disso, os dados indicam que os canais mais centralizados na faixa de operação foram obtidos com voltagens entre 720 V e 725 V, associadas a um ganho de 0,5x.

Tabela 4.11 - Resultados do número do canal, contagens, valor do FWHM e distância entre o pico de ruído e o pico do Césio-137.

Ganho	Voltagem (V)	Nº do canal 2º Pico	Contagens 2º Pico	FWHM 2º Pico	Distância dos Picos
0.55	700	429	113	36	376
0.60	705	496	94	38	432
0.65	705	548	103	36	476
0.55	710	489	100	33	427
0.60	710	540	91	35	473
0.50	715	467	102	35	412
0.55	715	520	109	38	454
0.50	720	491	100	29	430
0.55	720	544	93	36	474
0.50	721	501	99	37	438
0.52	721	518	88	36	406
0.50	721	508	92	40	445
0.50	721	508	90	36	446
0.50	722	513	97	31	450
0.50	725	532	98	37	466

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, ao variar a voltagem e o ganho aplicados ao *digiBASE*, de modo análogo aos procedimentos descritos nas subseções 4.2 e 4.3, verificou-se que o pico do Césio-137 pôde ser centralizado nesse intervalo de voltagem, como evidenciado nos espectros das Figuras 4.14 e 4.15.

Com base nessa análise, a voltagem de 721 V e o ganho de 0,5x foram selecionados como parâmetros ideais, uma vez que, sob essas condições, o pico do Césio-137 foi posicionado no canal 508, valor próximo ao canal de referência estabelecido para centralização do pico dentro da faixa operacional. Além da adequada centralização, o FWHM obtido variou de 36 a 40 canais, valor ligeiramente superior ao FWHM de 32 canais reportado no manual *AN34* (ORTEC, 2009) para condições ideais.

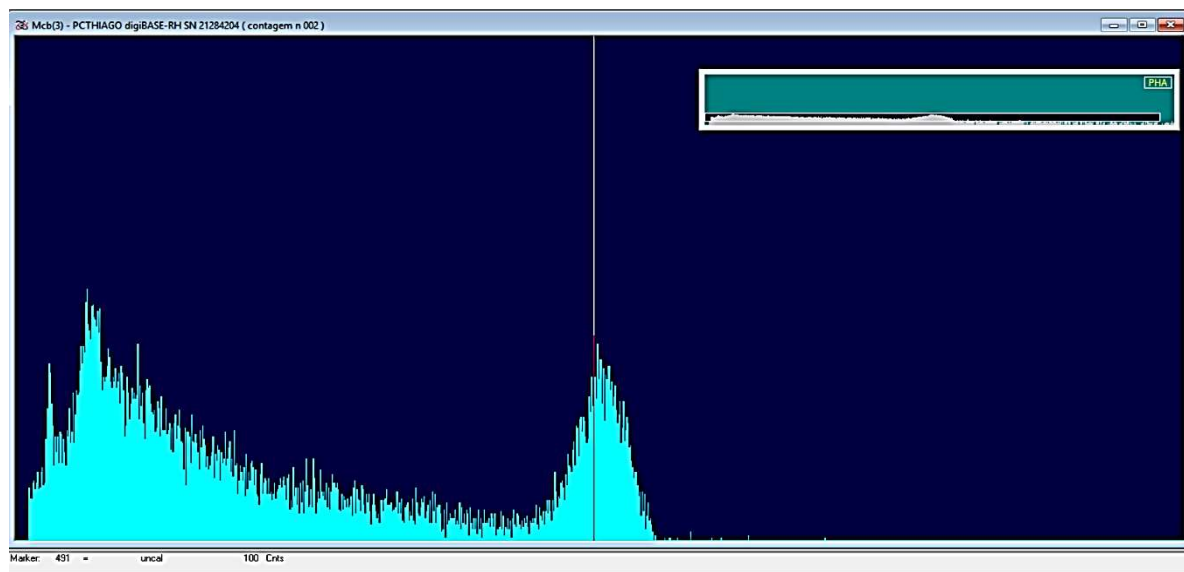


Figura 4.14 - Espectro obtido para voltagem de 720V e ganho 0,5x. Fonte: elaborado pelo autor.

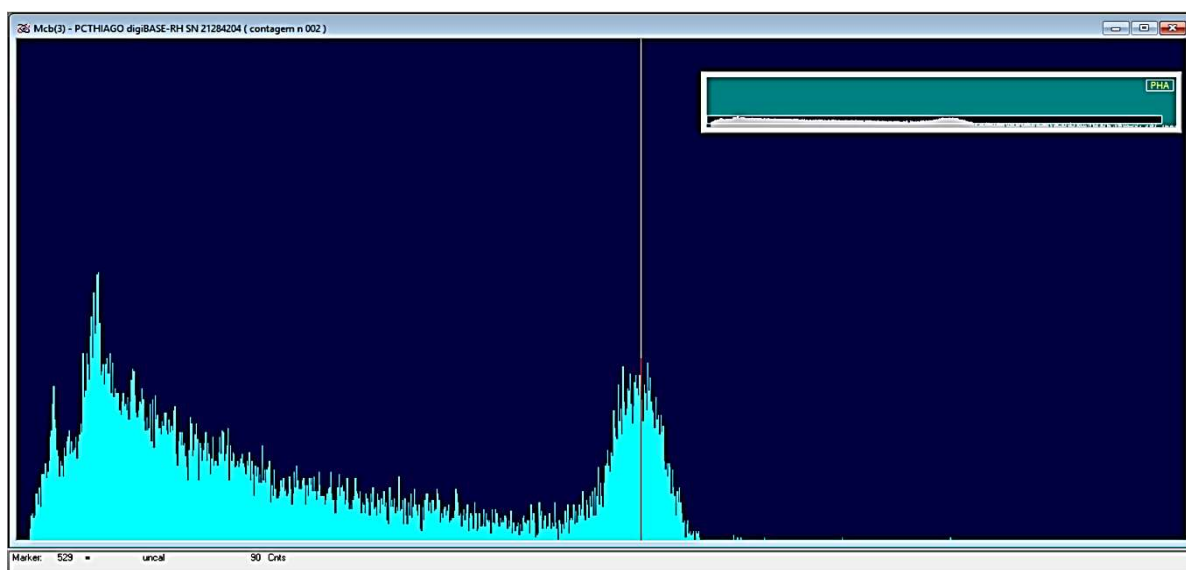


Figura 4.15 - Espectro obtido para voltagem de 725V e ganho 0,5x. Fonte: elaborado pelo autor.

Essa diferença pode estar relacionada a flutuações no ganho do fotomultiplicador, qualidade do cristal ou limitações de blindagem. Ainda assim, o valor obtido manteve-se dentro da faixa esperada para detectores NaI(Tl), conforme Knoll (2010), que aponta resoluções típicas de 7% a 10% para 662 keV. A leve ampliação do FWHM não comprometeu a definição da região de interesse (ROI), ajustada proporcionalmente para incluir cerca de 95% da área do pico (ORTEC, 2009).

Além disso, a distância entre os picos de ruído e do Césio-137 (438 a 446 canais) garantiu adequada separação espectral. Esses resultados sustentam a escolha da voltagem de 721 V e do ganho de 0,5x como parâmetros ideais para a calibração do sistema, conciliando centralização, resolução e separação espectral, e garantindo medições representativas e alinhadas aos objetivos do estudo.

Com o objetivo de avaliar a reprodutibilidade e a estabilidade dos parâmetros obtidos na calibração do sistema, foram realizadas dez repetições experimentais nas condições de voltagem de 721 V e ganho de 0,5x. Os resultados dessas medições, apresentados na Tabela 4.12, incluem o número do canal do segundo pico, as contagens associadas e os valores de FWHM. A partir dessas repetições, calcularam-se as médias e os desvios padrão de cada parâmetro, permitindo validar a consistência das medições e confirmar a adequação dos parâmetros operacionais selecionados para o posicionamento do pico do Césio-137 e a resolução espectral alcançada.

Com base nos valores médios obtidos na Tabela 4.12, foram calculados os parâmetros de configuração do sistema, incluindo os discriminadores de nível inferior (LLD) e superior (ULD) e os limites da região de interesse (ROI). Para a definição dos discriminadores, aplicou-se um ajuste prático somando e subtraindo 100 unidades de canal ao valor médio do canal do segundo pico (503), resultando em ULD igual a 403 e LLD igual a 603.

A ROI foi estabelecida como três vezes o valor médio do FWHM (38 canais), totalizando 113 canais. O limite inferior da ROI foi calculado subtraindo-se metade da ROI ($113/2$) da média do canal, obtendo-se 447, enquanto o limite superior foi obtido pela soma, alcançando 559. Esses parâmetros foram utilizados na configuração final do sistema, garantindo uma faixa de análise espectral adequada para as medições. O espectro obtido após a aplicação desses ajustes pode ser visualizado na Figura 4.16, na qual é possível observar o pico de interesse centralizado e delimitado pela ROI configurada.

Tabela 4.12 - Resultados das dez repetições para o número do canal do segundo pico, contagens e FWHM, com voltagem de 721 V e ganho de 0,5x.

Repetições Voltagem = 721V e Ganho = 0.50			
	Nº do canal 2º Pico	Contagens 2º Pico	FWHM 2º Pico
	508	92	40
	508	90	36
	501	99	37
	498	98	38
	502	93	42
	511	89	44
	499	117	28
	499	97	36
	499	93	41
	504	93	33
Média	503	96	38
Desvio Padrão	5	8	5

Fonte: elaborado pelo autor.

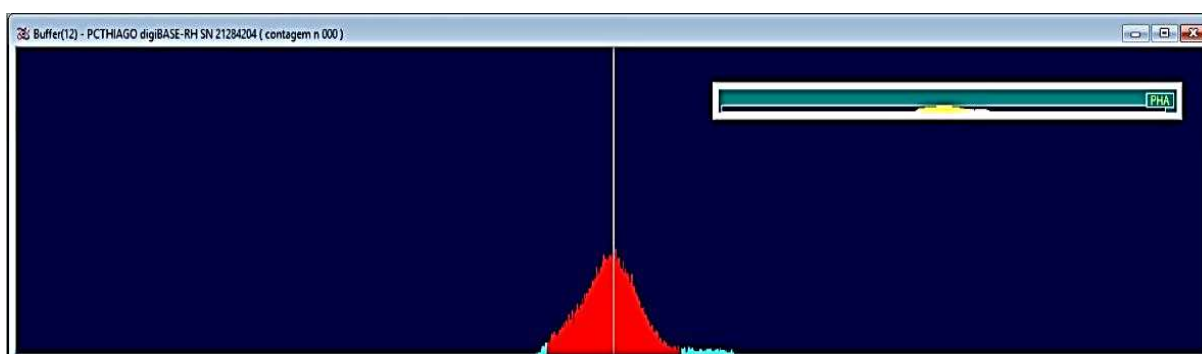


Figura 4.16 - Espectro final obtido após os ajustes de voltagem, ganho, discriminadores e ROI, com o pico do Césio-137 centralizado na faixa de operação. Fonte: elaborado pelo autor.

Os ajustes realizados permitiram configurar o sistema de detecção de modo a aprimorar a resolução espectral e centralizar o pico de interesse na faixa operacional definida. Essa configuração resultou em um espectro final estável e reproduzível, assegurando maior confiabilidade às medições subsequentes. Dessa forma, os resultados obtidos consolidam a calibração do sistema, estabelecendo uma base sólida para os experimentos de monitoramento.

Na subseção seguinte, será apresentado novos resultados do tempo de resolução do sistema, utilizando essa configuração como referência operacional.

4.9 Nova determinação do tempo de resolução do sistema

Os resultados da seção 4.7 evidenciaram a necessidade de utilizar materiais atenuantes mais densos, como aço, uma vez que as placas de acrílico não foram eficazes na atenuação da radiação gama do Césio-137. Também foi constatada a insuficiência da blindagem da tampa de chumbo da fonte, recomendando-se sua substituição por uma tampa mais espessa ou a inclusão de anteparos adicionais, a fim de reduzir o background detectado.

Com essas melhorias, prosseguiu-se para a determinação do tempo de resolução do sistema, utilizando o método descrito nas seções 2.2 e 3.2.6, com as adaptações propostas na seção 4.7. Além dessas alterações, adotou-se um tempo de contagem ampliado para 1800 segundos, equivalente às 60 contagens de 30 segundos previstas na seção 4.5, permitindo aumentar o número de contagens (área líquida) e reduzir a interferência do desvio padrão.

Optou-se, assim, por realizar os testes subsequentes com um único ciclo de 1800 segundos, substituindo os 60 ciclos de 120 segundos definido na seção 4.6, que havia sido adequado para suspensões viscosas de sedimentação mais lenta. Considerando que o objetivo final é o monitoramento de fluidos de perfuração com altas concentrações de sólidos, especialmente de barita, cuja suspensão apresenta alta estabilidade, o tempo ampliado de leitura mostrou-se mais apropriado, assegurando maior representatividade e confiabilidade nas análises.

Dessa forma, a Figura 4.17 apresenta, respectivamente, os meios atenuantes A, B e AB (conjuntos de placas de aço) utilizados no sistema experimental. As espessuras e o tipo de material correspondentes a cada meio estão descritos na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Espessuras e tipo de material dos meios atenuantes que foram utilizados no sistema.

Meio	Material	Espessura (mm)
A	Placas de aço	7
B	Placas de aço	5
AB	Placas de aço	12

Fonte: elaborado pelo autor.

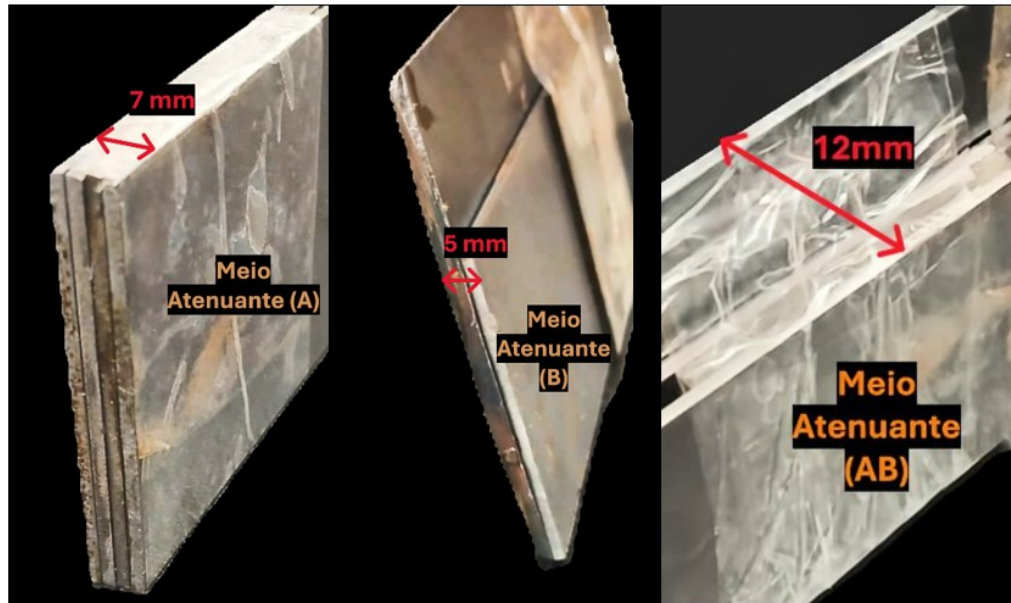


Figura 4.17 - Meios atenuantes utilizados no sistema experimental. Fonte: elaborado pelo autor.

As Figuras 4.18, 4.19 e 4.20, apresentam o sistema de detecção de raios gama montado com os meios atenuantes A, B e AB, respectivamente, utilizados para a medição das atenuações I_A , I_B e I_{AB} .

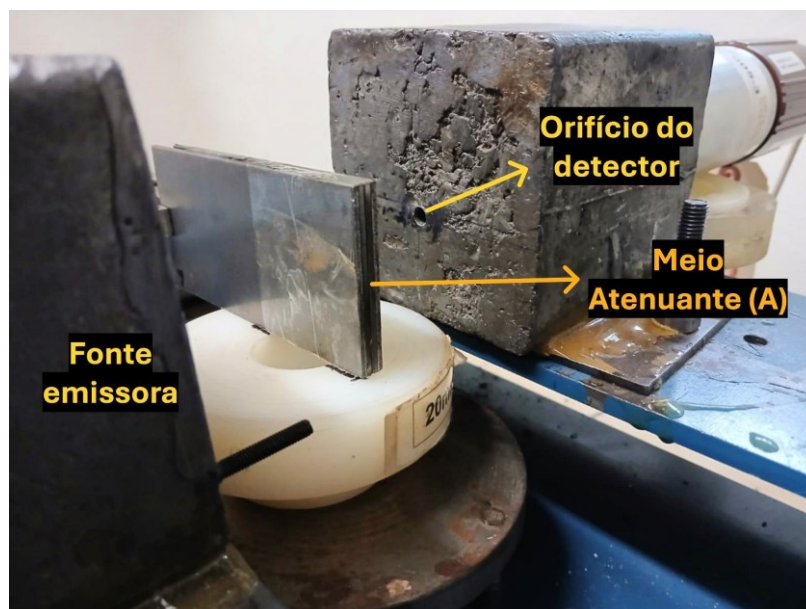


Figura 4.18 - Sistema de detecção com o meio atenuante (A) utilizado para obter I_A . Fonte: elaborado pelo autor.

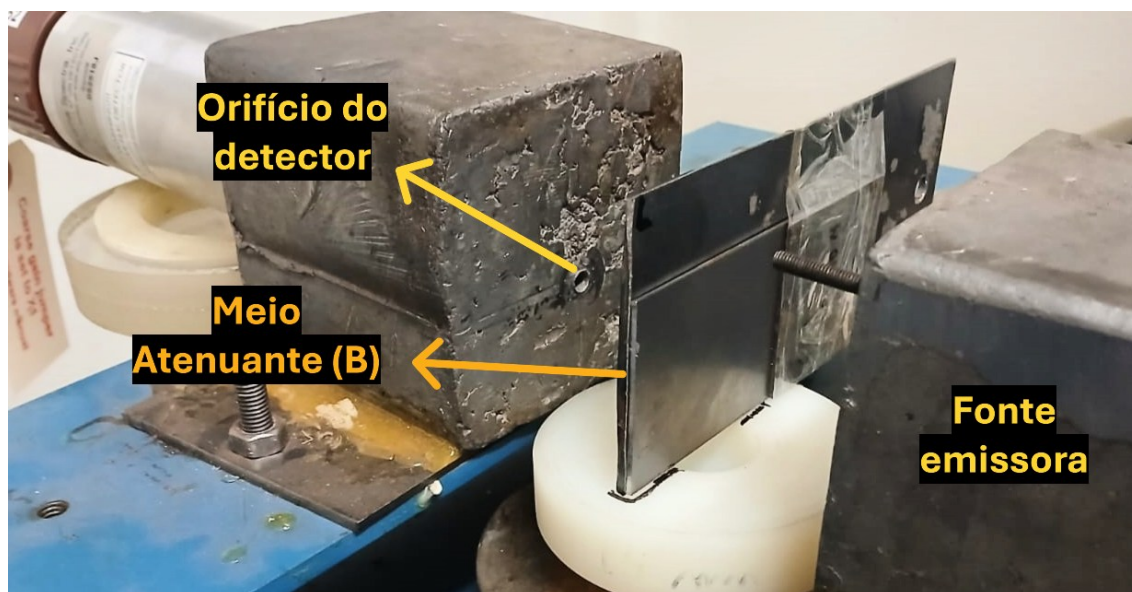


Figura 4.19 - Sistema de detecção com o meio atenuante (B) utilizado para obter I_B . Fonte: elaborado pelo autor.

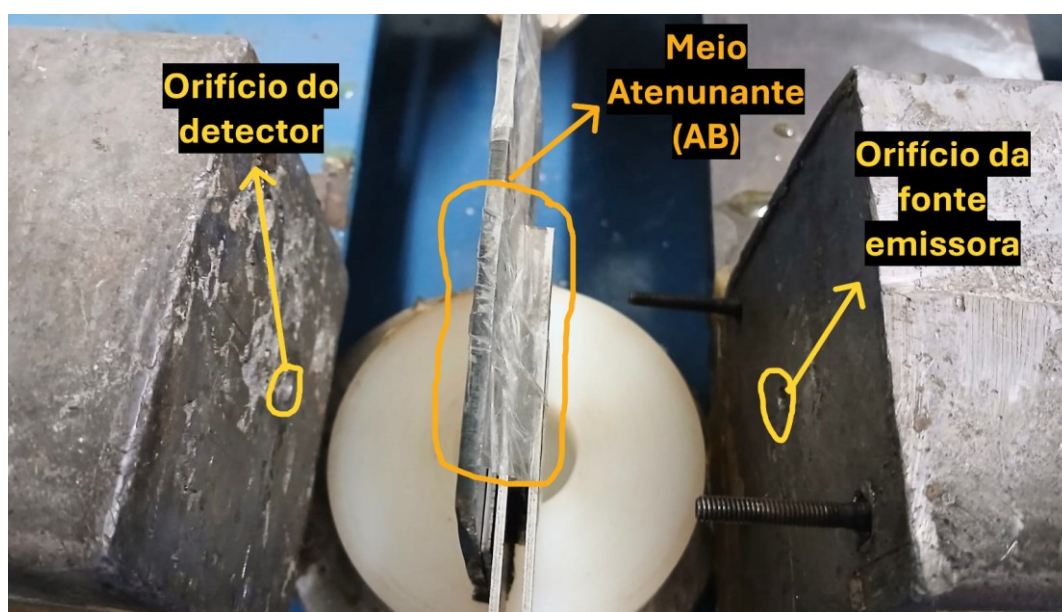


Figura 4.20 - Sistema de detecção com o meio atenuante (AB) utilizado para obter I_{AB} . Fonte: elaborado pelo autor.

Com o objetivo de reduzir o background detectado pelo sistema, foram utilizados anteparos adicionais compostos por uma tampa de chumbo e placas de aço, cuja configuração está ilustrada na Figura 4.21. Esses materiais foram selecionados por sua maior densidade e capacidade de atenuação da radiação gama, visando minimizar a radiação de fundo proveniente da fonte emissora.

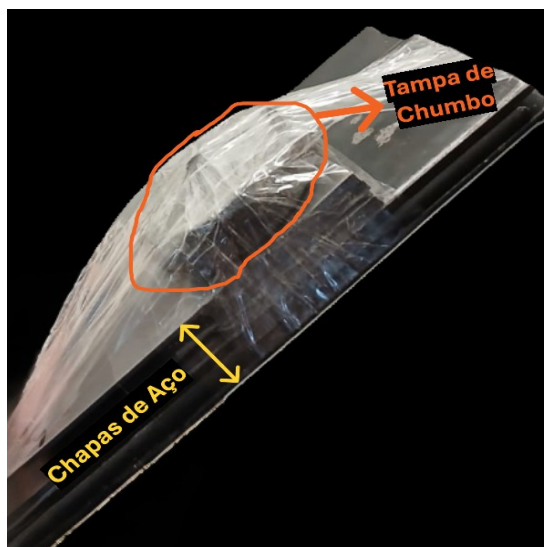


Figura 4.21 - Materiais utilizados como anteparos adicionais para reforço da blindagem: tampa de chumbo e placas de aço. Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 4.22 apresenta o sistema de detecção montado com a fonte selada e a adição desses anteparos, demonstrando a disposição dos elementos de blindagem implementados para aumentar a eficácia da proteção radiológica e assegurar maior confiabilidade nas medições.

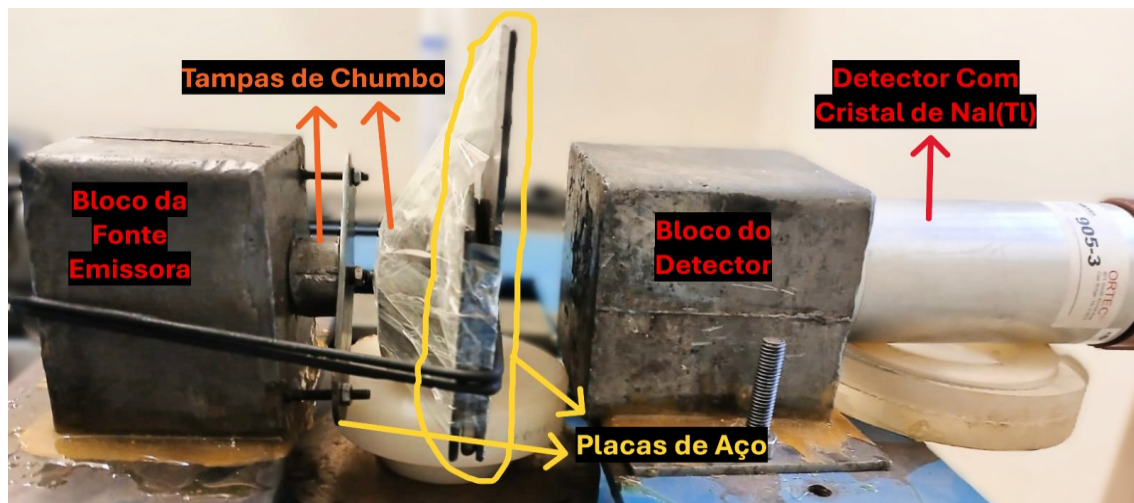


Figura 4.22 Sistema de detecção montado com a fonte selada e os anteparos adicionais instalados. Fonte: elaborado pelo autor.

Após esses ajustes, foram realizadas as medições experimentais, cujos resultados, incluindo as áreas líquidas, os valores de I_A , I_B , I_{AB} e o tempo de resolução, estão apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Resultados das áreas líquidas (*Net*) obtidas nas diferentes condições experimentais e tempo de resolução calculado para o sistema.

FONTE	Área <i>Net</i> (s⁻¹)
Fonte Fechada (<i>I_{bg}</i>)	0,23
Fonte Aberta (Sem anteparo)	12,14
Meio Atenuante A	8,64
Meio Atenuante B	9,49
Meio Atenuante AB	6,45
<i>I_A</i>	3,50
<i>I_B</i>	2,65
<i>I_{AB}</i>	5,69
Tempo de Resolução (s)	0,0180

Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos demonstram que os ajustes realizados no sistema, incluindo a implementação de anteparos adicionais e a definição dos parâmetros operacionais, foram eficazes para reduzir o background e garantir medições mais precisas e reprodutíveis. O valor calculado para o tempo de resolução de 18 ms, apresentado na Tabela 4.14, reflete a eficiência da configuração adotada, estabelecendo uma base sólida para as análises subsequentes. Com o sistema devidamente calibrado e operando sob condições ideais, a próxima etapa consistiu na determinação da curva de calibração.

4.10 Determinação da curva de calibração

A relação entre as contagens de radiação registradas pelo sistema de detecção e a concentração volumétrica de sólidos é representada pela constante β , conforme descrito na seção 2.2.3. Para essa correlação, utilizou-se a equação de Lambert, que expressa a atenuação da radiação em função da concentração, permitindo calcular a constante da curva de calibração a partir das intensidades medidas.

O teste foi realizado com a suspensão de barita a 30% de concentração volumétrica descrita na seção 3.2.8. Após permanecer em repouso por cerca de três meses, constatou-se que, aparentemente, todos os sólidos de sulfato de bário haviam sedimentado. Inicialmente, foi feita a leitura da região de líquido clarificado, a 2 cm abaixo da superfície, para obtenção da contagem corrigida de pulsos detectados pelo sistema na ausência de sólidos (R_0).

Em seguida, a suspensão foi ressuspensa por agitação mecânica a 1000 rpm, durante 30 minutos, utilizando o mesmo agitador de hélice citado na seção 3.2.8. Após a ressuspensão, a suspensão foi transferida novamente para a proveta e posicionada no sistema TARG, conforme ilustrado na Figura 4.23, para uma nova leitura, que forneceu o valor da intensidade de radiação corrigida detectada na presença de sólidos (R).



Figura 4.23 - Sistema de detecção de radiação gama com a proveta posicionada na TARG, indicando os níveis de leitura da região clarificada, da suspensão ressuspensa e da interface dos sólidos sedimentados. Fonte: Elaborado pelo autor.

As contagens foram corrigidas pelo tempo de resolução do sistema, garantindo maior precisão nas análises. Com esses valores corrigidos, foi possível determinar a intensidade de radiação corrigida (R_i) para cada concentração de sólidos, bem como o primeiro termo da Equação 2.7, expresso como $\ln(R_0/R)$. Os resultados dessas medições estão apresentados na Tabela 4.15, que serviu de base para o ajuste da curva de calibração e a determinação da constante β .

Tabela 4.15 - Valores da intensidade de radiação, corrigida pelo tempo de resolução, por segundo e do primeiro termo da Equação 2.7 em função da concentração volumétrica de sólidos da suspensão.

Concentração volumétrica de BaSO ₄ (%)	Intensidade de radiação corrigida R _i (s ⁻¹)	Ln (R ₀ /R) (-)
0	8,70	0,00
30	5,76	0,29

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos valores apresentados na Tabela 4.15, construiu-se a curva de calibração relacionando $\ln(R_0/R)$ com a concentração volumétrica de sólidos. Essa curva permitiu determinar a constante β a partir do coeficiente angular da regressão linear, conforme mostrado na Figura 4.24.

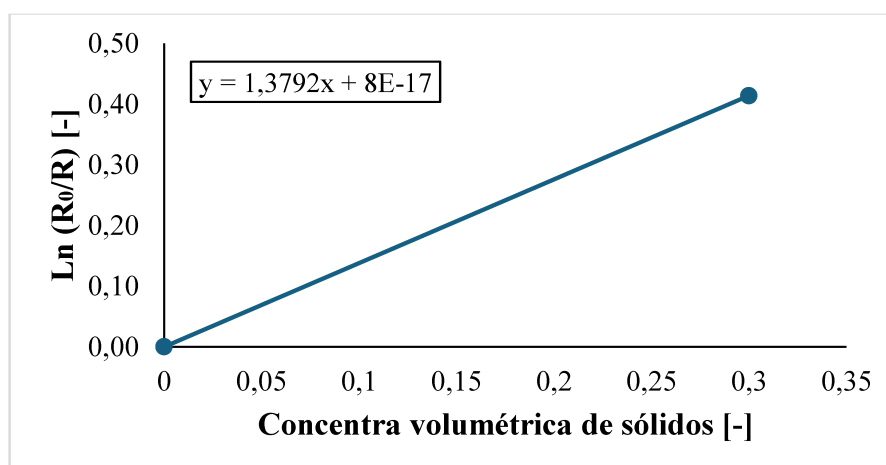


Figura 4.24 - Curva de calibração da suspensão. Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva de calibração obtida, apresentada na Figura 4.24, permitiu determinar a constante β igual a 1,38, parâmetro fundamental para correlacionar a atenuação da radiação com a concentração de sólidos da suspensão. Com o sistema calibrado e os parâmetros operacionais definidos, a próxima etapa consistiu na aplicação dessa calibração na medição da concentração do sedimento, descrito na subseção 4.10.1.

4.10.1 Teste de análise da sedimentação

Com a calibração do sistema de detecção concluída e os parâmetros operacionais validados nas etapas anteriores, esta subseção apresenta a aplicação prática da Técnica de Atenuação de Raios Gama na análise da sedimentação de uma suspensão aquosa de barita. O objetivo foi acompanhar a variação da concentração de sólidos ao longo da coluna de

sedimentação, utilizando a curva de calibração e as condições experimentais previamente estabelecidas. Este ensaio buscou avaliar a capacidade do sistema em monitorar a movimentação da interface sólido-líquido e gerar dados representativos do processo de sedimentação em batelada.

A suspensão utilizada neste teste foi a mesma suspensão de barita a 30% (v/v) empregada na subseção anterior, utilizada para a leitura da região de líquido clarificado (R_0) com a TARG, após permanecer em repouso por cerca de três meses. Neste ensaio, além da leitura dessa região, realizaram-se medições em outros sete pontos ao longo da região de sedimento estabelecido.

Inicialmente, mediu-se a altura total da coluna de fluido na proveta. Em seguida, a plataforma metálica móvel, descrita na seção 3.1, foi posicionada em sua altura mínima, permitindo uma leitura a partir de 4 cm da base da proveta. Verificou-se que a altura da coluna de sólidos sedimentados era de 8 cm, a qual foi dividida em seis partes iguais para possibilitar o monitoramento.

Optou-se, ainda, por realizar uma leitura adicional imediatamente acima da interface sólido-líquido, totalizando sete pontos de medição, além do ponto correspondente a R_0 , medido a 2 cm abaixo da superfície do líquido (ou 16,5 cm acima da base da proveta). O tempo de leitura adotado para cada ponto foi de 1800 segundos. A Figura 4.25 ilustra o sistema montado para a realização do experimento, com a proveta posicionada entre o detector e a fonte de radiação gama.

As alturas correspondentes aos pontos de leitura foram definidas considerando a altura total do fluido, a posição da interface sólido-líquido e os intervalos destinados às regiões de sólido sedimentado e líquido clarificado, de modo a abranger diferentes camadas da coluna de sedimentação. A Tabela 4.16 apresenta as medidas obtidas a partir da base da proveta, detalhando as posições relativas de cada região monitorada no experimento.



Figura 4.25 - Sistema montado para a análise do sedimento da suspensão de barita a 30% (v/v), com a proveta posicionada entre o detector e a fonte de radiação gama. Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.16 - Alturas das regiões de leitura para a análise da sedimentação da suspensão de barita a 30% (v/v).

Regiões	Altura a partir da base da proveta (cm)
Interface sólido-líquido	12
Altura mínima de leitura	4
Intervalo de Sólido	8
Altura total do fluido	18,5
Intervalo de Líquido Clarificado	6,5
Ponto (Região de Líquido Clarificado)	16,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores do tempo de resolução (τ') de 0,0180 segundos, da intensidade de radiação corrigida na ausência de sólidos (R_0) de $8,7049 \text{ s}^{-1}$ e da constante β igual a 1,3792, determinados na subseção anterior, foram utilizados como parâmetros de referência para os cálculos desta etapa.

Com base nesses valores e nas leituras da intensidade de radiação realizadas conforme descrito nesta subseção 4.10, foi possível calcular a concentração volumétrica de sólidos em cada ponto analisado ao longo da coluna de sedimentação, a partir das contagens líquidas obtidas. A Tabela 4.17 apresenta os resultados experimentais, incluindo a distância de cada ponto em relação à base da proveta, a área líquida registrada, a intensidade de radiação corrigida (R) e a respectiva concentração volumétrica de sólidos calculada para cada altura.

Tabela 4.17 - Resultados experimentais obtidos na análise da sedimentação: distância em relação à base da proveta, área líquida, intensidade de radiação corrigida (R) e concentração volumétrica de sólidos.

Pontos	Distância da base da proveta (cm)	Área <i>Net</i> (s^{-1})	R (s^{-1})	Concentração volumétrica de Sólidos (-)
1	5	4,52	4,92	0,41
2	6	4,49	4,88	0,42
3	8	4,60	5,02	0,40
4	10	4,80	5,25	0,37
5	11	5,24	5,78	0,30
6	12	5,73	6,39	0,22
7	13,5	7,33	8,44	0,02

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos valores apresentados na Tabela 4.17, elaborou-se o gráfico apresentado na Figura 4.26, que ilustra o perfil da concentração volumétrica de sólidos em função da distância a partir da base da proveta. Esse gráfico permite visualizar a variação da concentração de sólidos ao longo da coluna sedimentada.

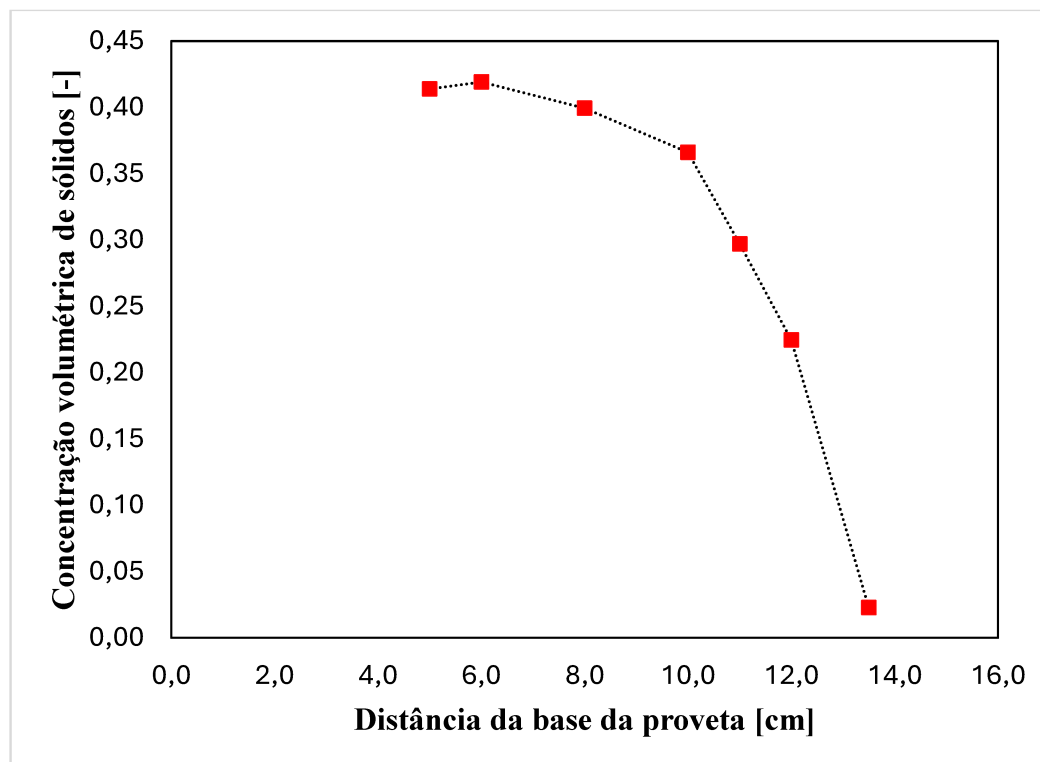


Figura 4.26 - Perfil da concentração volumétrica de sólidos em função da distância da base da proveta, obtido na análise da sedimentação da suspensão de barita. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos, representados na Figura 4.26, evidenciam um gradiente de concentração volumétrica de sólidos característico do processo de sedimentação, com valores mais elevados próximos à base da proveta e redução progressiva em direção à interface sólido-líquido.

Esse perfil é coerente com o esperado para sistemas de sedimentação gravitacional, especialmente em suspensões com partículas de alta densidade, como a barita. Observa-se que as concentrações mais próximas à base atingiram valores em torno de 41%, enquanto nas regiões mais distantes da base, próximas à interface sólido-líquido, a concentração reduziu para próximo de zero, indicando uma boa separação das fases sólida e líquida. Esse comportamento é consistente com os achados de Fagundes (2019), que, ao analisar a sedimentação de suspensões adensadas com hematita utilizando a Técnica de Atenuação de Raios Gama, também verificou maiores concentrações de sólidos na base da coluna e gradiente decrescente em direção ao topo.

Embora o estudo de Fagundes (2019) tenha utilizado hematita em fluidos de perfuração e este trabalho tenha empregado sulfato de bário em meio aquoso, a similaridade dos perfis de

concentração reforça a aplicabilidade da técnica na caracterização da sedimentação de sólidos de alta densidade.

Dessa forma, os resultados obtidos confirmam que o sistema de detecção calibrado foi capaz de analisar de forma eficaz a distribuição da concentração de sólidos ao longo da coluna de sedimentação.

Sendo assim, os resultados obtidos na seção 4.10.1 demonstraram a viabilidade da Técnica de Atenuação de Raios Gama para a análise da sedimentação da suspensão de barita, evidenciando a funcionalidade do sistema calibrado e os parâmetros definidos. A seguir, na seção 5, são apresentadas as conclusões gerais deste estudo, destacando as principais contribuições e perspectivas futuras.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho estabeleceu as condições operacionais ideais para um sistema de detecção de radiação gama utilizando o radioisótopo Césio-137. Por meio de ajustes sistemáticos em parâmetros críticos, como voltagem, ganho fino, níveis de discriminação, tempos de contagem e resolução. Foi possível aprimorar a precisão e a reprodutibilidade da técnica de atenuação aplicada ao monitoramento de suspensões aquosas. Os resultados demonstram que a configuração aprimorada garante a confiabilidade necessária para a medição de concentração das suspensões de densidades variadas.

Os resultados obtidos demonstraram que a voltagem de 640 V e o ganho fino de 0,6 permitiram a centralização do pico fotoelétrico no canal 238, com o intervalo de energia delimitado entre os canais 194 e 284, assegurando adequada definição da região de interesse (ROI). A calibração do sistema apresentou elevado coeficiente de determinação e a constante β foi determinada como 1,3792, confirmando a linearidade e a confiabilidade da metodologia empregada.

A aplicação prática do sistema calibrado no monitoramento da sedimentação de uma suspensão de barita a 30% (v/v) demonstrou a capacidade do método em acompanhar a variação da concentração de sólidos ao longo da coluna de sedimentação, reproduzindo um perfil de concentração coerente com o esperado para sistemas gravitacionais e comparável aos resultados da literatura. A Técnica de Atenuação de Raios Gama revelou-se eficaz como ferramenta não invasiva, possibilitando medições precisas e representativas, mesmo em suspensões densas.

Os resultados alcançados reforçam o potencial da TARG como tecnologia aplicável em ambientes industriais para o monitoramento e controle de processos de separação sólido-líquido, oferecendo uma alternativa segura, eficiente e de alta sensibilidade.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos e nas observações realizadas durante os experimentos, recomenda-se, para trabalhos futuros, a realização de testes utilizando fluidos reais de perfuração com diferentes concentrações de baritina, bem como fluidos com elevadas concentrações de carbonato de cálcio, a fim de assegurar a eficácia do Césio-137 na análise da sedimentação em suspensões de alta densidade.

Adicionalmente, visando ao aperfeiçoamento do sistema, é possível realizar uma nova calibração do sistema de detecção, com ênfase no ajuste da voltagem e do ganho fino do fotomultiplicador. Sugere-se a variação sistemática da voltagem de operação, inicialmente em incrementos de 50 V na faixa de 500 a 800 V, com o objetivo de identificar a voltagem que proporcione a maior área líquida (Net). A partir desse valor, recomenda-se a aplicação de incrementos menores, da ordem de 1 V, para o ajuste fino da calibração e a determinação do ponto ideal de operação.

Além da voltagem, recomenda-se avaliar o ganho fino em diferentes níveis (0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8), utilizando o mesmo critério de maximização da área líquida. Esse ajuste visa aprimorar a precisão experimental, aumentando a confiabilidade e a sensibilidade do sistema de detecção.

Outra possibilidade de aprimoramento reside na calibração cruzada com outras fontes radioativas, como o Amerício-241, para construção de uma curva de calibração mais robusta, associando os números de canal às respectivas energias das emissões gama. Essa abordagem pode contribuir para uma caracterização mais abrangente e precisa do espectro energético.

A presente seção apresentou as principais conclusões acerca da definição das condições operacionais ideais da Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG) com o uso de Césio-137 de baixa atividade, bem como sugestões de aprimoramentos metodológicos e perspectivas para estudos futuros.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOSOVA, S. R.; MAGOMEDOV, K. M.; BASHIROVA, R. Z. Gamma radiation attenuation in dental restoration materials. Russian Physics Journal, v. 62, n. 1, p. 123-127, 2019.

ALLEN, D. G.; UHLERR, A. H. Sedimentation behavior of particles in non-Newtonian media. Chemical Engineering Science, v. 44, p. 2141-2150, 1989.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Dados da produção de petróleo no Brasil. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp>>. Acesso em: 03 mar. 2024.

AROUCA, F. O. Obtenção experimental das equações constitutivas para o espessamento e filtração utilizando técnica de atenuação de radiações de altas energias. 2003. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.

AROUCA, F. O. Uma contribuição ao estudo da sedimentação gravitacional em batelada. 2007. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

BICALHO, I. C. Estudo experimental e de simulação por CFD de escoamentos em seções anulares com excentricidade variável e obstrução parcial da coluna. 2015. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

BOBROFF, S.; PHILLIPS, R. J. Sedimentation of spheres in viscoelastic fluids. Journal of Rheology, v. 42, n. 6, p. 1419-1437, 1998.

CAENN, R.; DARLEY, H. C. H.; GEORGE, R. G. Composition and properties of drilling and completion fluids. 7th ed. Gulf Professional Publishing, 2017.

CANDU OWNERS GROUP. CANDU Fundamentals. Toronto: CANDU Technology, 2005.

CARDOSO, L.C. Petróleo: do poço ao posto. 2ª ed., Quality Mark, 192 p., Rio de Janeiro, 2005.

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. Non-Newtonian flow and applied rheology. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008.

COE, H. S.; CLEVINGER, G. H. Methods for determining the capacities of slime-settling tanks. Transactions of the American Institute of Mining Engineers, v. 55, p. 356-385, 1916.

COMINGS, E. W. Batch and continuous settling of flocculated suspensions. Industrial & Engineering Chemistry, v. 32, p. 1434-1440, 1940.

DAMASCENO, J. J. R. Uma contribuição ao estudo do espessamento contínuo. 1992. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1992.

DAMASCENO, J. J. R. Uma introdução à engenharia nuclear. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2005.

DAUGAN, S.; TALINI, L.; HERZHAFT, B.; ALLAIN, C. Aggregation of particles settling in shear-thinning fluids. Part 1. Two-particle aggregation. The European Physical Journal E, vol. 7, p. 73-81, 2002.

DAUGAN, S.; TALINI, L.; HERZHAFT, B.; ALLAIN, C. Aggregation of particles settling in shear thinning fluids. Part 2. Three particle aggregation. The European Physical Journal E, vol. 9, p. 55-62, 2002.

DAUGAN, T. et al. Sedimentation in pseudoplastic fluids: from homogeneous to heterogeneous regime. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 121, p. 67-78, 2004.

FAGUNDES, F. M. Estudo da estabilidade da suspensão constituinte do fluido BR MUL/Petrobras. 2015. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

FAGUNDES, F. M. Estudo da sedimentação de partículas em fluidos de perfuração pelo uso da Técnica de Atenuação de Raios Gama. 2019. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia

Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

GARDNER, R. P.; ELY-JR, R. L. Radioisotope measurement applications in engineering. New York: Reinhold, 1967.

GUESLIN, B. et al. Interaction between two spheres settling in a yield stress fluid. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 134, p. 1-14, 2006.

KNOLL, Glenn F. Radiation detection and measurement. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.

KOKSAL, M.; KORKMAZ, M. E.; OZCAN, M. U. Gamma radiation attenuation characteristics of medical protective materials. *Applied Radiation and Isotopes*, v. 147, p. 1-6, 2019.

KYNCH, G. J. A theory of sedimentation. *Transactions of the Faraday Society*, v. 48, p. 166-176, 1952.

LARUCCIA, M. Sedimentação em fluidos não-Newtonianos: análise teórica e experimental. 1990. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

MENDES, J. O. O impacto da indústria do petróleo na economia brasileira. *Revista Brasileira de Economia*, v. 74, n. 2, p. 233-250, 2020.

MILLER, C. A.; MELIK, D. H. Dynamics of sedimentation in thixotropic fluids. *AIChE Journal*, v. 42, n. 3, p. 728-730, 1996.

MOREIRA, B. A. Estudo da sedimentação em suspensões de fluido com características reológicas pseudoplásticas. 2014. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

ORTEC. *digiBASE™* user manual. Oak Ridge: ORTEC, 2010.

ORTEC. Experiment IV-3: Gamma-ray spectroscopy using NaI(Tl). Oak Ridge: Ortec (AN34 Experiments in Nuclear Science Laboratory Manual), 2011.

ORTEC. Gamma-ray spectroscopy using NaI(Tl). Oak Ridge: Ortec (Application Note AN34 Experiment 3), 2009.

ORTEC. Maestro® Software User's Manual. Version 7. Oak Ridge: Ortec, 2007.

PIRES, L. A. Uso da Técnica de Atenuação de Raios Gama no estudo de solos agrícolas. 2018. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

ROCHA, R. R. Estudo teórico-experimental da sedimentação em batelada: monitoramento e modelagem de perfis de concentração de sólidos e análise de equações constitutivas. 2018. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2018.

SANTOS, N. B. C. Estabilidade de suspensões pseudoplásticas utilizadas na perfuração de poços de petróleo. 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.