

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE FÍSICA

CURSO DE BACHARELADO EM FÍSICA MÉDICA

FELIPE DE OLIVEIRA CUNHA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA MEDIDAS DE BAIXAS CORRENTES  
EM CALIBRADORES DE DOSE PARA MEDICINA NUCLEAR**

**RIO DE JANEIRO**

**2022**

FELIPE DE OLIVEIRA CUNHA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA MEDIDAS DE BAIXAS CORRENTES  
EM CALIBRADORES DE DOSE PARA MEDICINA NUCLEAR**

Trabalho de Conclusão de Curso a ser apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Física Médica.

**Orientador: Prof. Dr. Daniel de Miranda Silveira - IF/UFRJ**

**Co-Orientador: Dr. Fábio de Lacerda - IEN/CNEN**

**RIO DE JANEIRO**

**2022**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**

**INSTITUTO DE FÍSICA**

Felipe de Oliveira Cunha

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA MEDIDAS DE BAIXAS CORRENTES  
EM CALIBRADORES DE DOSE PARA MEDICINA NUCLEAR**

Trabalho de Conclusão de Curso a ser apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Física Médica

Aprovado em \_\_ de \_\_\_\_\_ de 2022.

**Banca examinadora**

---

Prof. Dr. Daniel de Miranda Silveira - IF/UFRJ

---

Dr. Fábio de Lacerda - IEN

---

Profa. Dra. Josilene Cerqueira Santos – IF/UFRJ

---

Prof. Dr. Marcos Santana Farias - IEN

## RESUMO

Atualmente, no Brasil, existem aproximadamente 472 serviços de medicina nuclear (SMN) que atuam na realização de imagens para fins de diagnóstico e também na realização de terapia (CNEN, 2018). O SMN funciona através da administração de radiofármacos, que são radionuclídeos ligados a componentes farmacológicos, à pacientes. A radiação emitida pelos radionuclídeos deve ser medida através de detectores específicos chamados câmara de ionização do tipo poço, ou calibradores de dose, que fornecem a leitura da atividade da amostra radioativa. Neste trabalho foi proposta a construção de um eletrômetro que forneça as condições ideais para que o detector funcione de maneira adequada. Isso foi feito através do desenvolvimento de um sistema para medidas de baixas correntes (da ordem de pA), tendo como foco o desenvolvimento do circuito eletrônico, o controle digital baseado em microcontrolador e, por fim, o desenvolvimento de uma interface no computador através de programação em linguagem gráfica. A Norma 3.05 da CNEN regulamenta testes de controles de qualidade que devem ser feitos em todos os calibradores de dose presentes em SMN, e seus respectivos limites de aceitação. Neste trabalho, após a finalização da construção do projeto proposto foram também realizados alguns desses testes, com o objetivo de avaliar o desempenho do projeto realizado. Por fim, foi também realizada uma comparação do projeto desenvolvido com um calibrador de dose comercial de uma marca multinacional, que possui calibradores de dose em milhares de serviços de medicina nuclear ao redor do mundo. Os resultados obtidos foram satisfatórios, o equipamento apresentou resultados dentro dos limites de aceitação impostos pela CNEN em todos os testes de controle de qualidade, com exceção do teste de radiação de fundo. A comparação com o calibrador de dose comercial também apresentou resultados coerentes.

**Palavras-chave:** calibrador de dose, medidor de atividade, eletrômetro, medicina nuclear.

## ABSTRACT

Currently, in Brazil, there are approximately 472 nuclear medicine services (SMN) that perform imaging tests for diagnostic purposes and also perform therapy (CNEN, 2018). SMN works by administering radiopharmaceuticals, which are radionuclides attached to pharmacological components, to patients. The radiation emitted by radionuclides must be measured by means of specific detectors called well-type ionization chambers, or dose calibrators, which provide the reading of the activity of the radioactive sample. In this work it was proposed the construction of an electrometer that provides the ideal conditions for the detector to work correctly. This was done with the development of a low current measurement system, focusing on the development of the electronic circuit, the digital control based on a microcontroller and, finally, the development of a computational interface made with programming in graphic language. Standard CNEN 3.05 regulates the quality control tests that must be performed on all dose calibrators present in the SMN, and their respective acceptance limits. In this work, after the conclusion of the construction of the proposed project, some of these tests were also carried out, with the objective of evaluating the performance of the executed project. Finally, an intercomparison of the project developed with a commercial dose calibrator of a multinational brand, which has dose calibrators in thousands of nuclear medicine services around the world, was performed. The results obtained were satisfactory, the equipment presented results within the acceptance limits imposed by CNEN in all quality control tests, with the exception of the background radiation test. Comparison with the commercial dose calibrator also showed consistent results.

**Keywords:** dose calibrator, activity meter, electrometer, nuclear medicine.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de decaimento do Co-60 (BÉ, M. M. et al., 2006).....	18
Figura 2: Esquema de decaimento do Ba-133 (BÉ, M. M. et al., 2016).....	19
Figura 3: Esquema de decaimento do Cs-137 (BÉ, M. M. et al., 2006).....	19
Figura 4: Tipo de interação predominante para diferentes energias de fótons e números atômicos (TAUHATA et al., 2013). .....	20
Figura 5: Cinemática do efeito Compton (EISBERG; RESNICK, 1979). .....	21
Figura 6: Processo de produção de pares (EISBERG; RESNICK, 1979).....	22
Figura 7: Gráfico das regiões de operação de detectores a gás (TAUHATA, 2013). .....	28
Figura 8: Alguns tipos de interações de partículas carregadas em um gás que podem influenciar o comportamento de detectores. As partículas que interagem estão à esquerda e os produtos da interação estão à direita (Adaptado de KNOLL, 2010). .....	29
Figura 9: Componentes básicos de uma câmara de ionização (Adaptado de CHERRY et al., 2012). .....	31
Figura 10: Medição de pequenas correntes de íons por meio do uso de uma resistência em série R e um eletrômetro para registrar a tensão resultante (KNOLL, 2010).....	32
Figura 11: (a) Vista interna de uma câmara de ionização; (b) Calibrador de dose (câmara de ionização conectada a um eletrômetro) (TAUHATA et al., 2013).....	33
Figura 12: Projeto em funcionamento. À direita câmara de ionização conectada na placa eletrônica desenvolvida, contida na caixa metálica, que por fim, está conectada no computador através de uma interface USB. Entre o computador e a câmara estão as blindagens de chumbo para os 3 radionuclídeos utilizados. Na parte de cima da foto encontra-se o multímetro também conectado a câmara. ....	34
Figura 13: Amplificador buffer de ganho unitário ou seguidor de tensão (SEDRA; SMITH, 2000). .....	36
Figura 14: Placa eletrônica desenvolvida para o trabalho, vistas superior e inferior. À esquerda pode-se observar a fonte de alta tensão, e à direita o resistor de 1 GΩ utilizado, bem como o microprocessador integrado ao circuito. ....	36
Figura 15: Comparação entre as três fontes de alta tensão usadas durante o trabalho. Calibrador de alto desempenho FLUKE 5520A, e conversores DC-DC EMCO modelos: A05P-5 (esquerda) e C05 (direita).....	37
Figura 16: Gráfico usado para avaliação de desempenho do equipamento com diferentes fontes de alta tensão alimentando a câmara de ionização. Amplitude da corrente no eixo y (pA) e	

tempo no eixo x (hh:mm:ss). De 13:29 a 13:32 fonte A05P-5, de 13:33 a 13:35 fonte C05, de 13:36 a 13:41 FLUKE 5520A, e de 13:41 a 13:46 fonte C05 novamente. ....	38
Figura 17: Diagrama de pinos do microcontrolador utilizado (TEXAS INSTRUMENTS, 2010). .....	39
Figura 18: Diagrama de blocos funcionais do MSP430AFE253. Pode-se observar o conversor AD sigma delta (SD24_A), as memórias RAM e flash, a CPU e a comunicação serial tipo UART. (TEXAS INSTRUMENTS, 2010) .....	40
Figura 19: Conversor serial para USB. Entrada à direita com fios conectados nas portas RX, TX e GND, este último para referência, e saída à esquerda com porta micro USB. ....	41
Figura 20: Interface final do programa desenvolvido. ....	41
Figura 21: Fontes disponíveis no Serviço de Instrumentação. Da esquerda para a direita: Cs-137, Co-60 e Ba-133. ....	46
Figura 22: Multímetro utilizado durante o teste de alta voltagem. ....	50
Figura 23: Ajuste do suporte dos radionuclídeos à fim de garantir que fiquem na mesma posição dentro da câmara para diferentes medições. O parâmetro utilizado foi coincidir o zero da régua da câmara com os 10 centímetros da régua do suporte. ....	52
Figura 24: Captura de tela do programa desenvolvido em LabView imediatamente após a finalização de todos os testes diários. Tempo referente às medições das fontes radioativas: de 11:04 a 11:05 Co-60, de 11:05 a 11:07 Ba-133, e de 11:07 a 11:09 Cs-137. ....	53
Figura 25: Captura de tela do programa desenvolvido em LabView durante a última medição do teste semestral para o Co-60. ....	54
Figura 26: Calibrador de dose CAPINTEC CRC-55tR. ....	55
Figura 27: Testes diários do calibrador de dose comercial CRC-55tR. ....	64
Figura 28: Calibrador de dose comercial CRC-55tR fazendo a leitura da fonte de Ba-133 inserida. ....	65
Figura 29: Representação da situação para ocorrência de equilíbrio de radiação (ATTIX, 1986). .....	73
Figura 30: Projeto inicialmente desenvolvido utilizando protoboard para o circuito analógico. .....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Energia média para formação de pares de íons em alguns gases. (TAUHATA et al., 2013) .....	29
Tabela 2: Fontes disponíveis para utilização e seus respectivos dados. ....	46
Tabela 3: Constante de dose de raios gama específico para diferentes fontes (UNGER; TRUBEY, 1982). ....	49
Tabela 4: Data e hora da realização de cada medida dos testes diários. ....	56
Tabela 5: Valores obtidos para o teste de ajuste de zero. ....	57
Tabela 6: Valores obtidos para o teste de radiação de fundo. ....	58
Tabela 7: Valores obtidos para o teste de alta voltagem. ....	59
Tabela 8: Análise das medidas obtidas no teste de alta voltagem. ....	60
Tabela 9: Valores obtidos para o teste de repetibilidade. ....	61
Tabela 10: Desvios máximo e mínimo obtidos no teste de repetibilidade para cada radionuclídeo. ....	61
Tabela 11: Valores obtidos no teste semestral para o Co-60. ....	62
Tabela 12: Análise dos resultados dos testes semestrais para o Co-60. ....	62
Tabela 13: Valores obtidos no teste semestral para o Ba-133. ....	63
Tabela 14: Análise dos resultados dos testes semestrais para o Ba-133. ....	63
Tabela 15: Valores obtidos no teste semestral para o Cs-137. ....	63
Tabela 16: Análise dos resultados dos testes semestrais para o Cs-137. ....	64
Tabela 17: Medidas realizadas pelo calibrador de dose comercial. ....	65
Tabela 18: Comparação da medida feita pelo calibrador de dose comercial e o desenvolvido quanto ao valor de referência. ....	66
Tabela 19: Comparação da medida realizada pelo calibrador comercial com: a medida do mesmo dia, a média das medidas diárias e a média das medidas do teste semestral do calibrador experimental. ....	67
Tabela 20: Atividade certificada corrigida para o dia da medida de cada radionuclídeo utilizado. ....	76

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1: Cronograma de teste para calibrador de radionuclídeos pela IAEA (IAEA, 1991).	43
Quadro 2: Testes de controle de qualidade do medidor de atividade pela CNEN. (Adaptado de CNEN, 2013).....	44
Quadro 3: Fontes recomendadas para cada teste de controle de qualidade (IAEA, 1991). ....	45

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CPE	Equilíbrio de Partículas Carregadas
DUT	Dispositivo Em Teste
IAEA	Agencia Internacional de Energia Atômica
ICRP	Comissão Internacional de Proteção Radiológica
ICRU	Comissão Internacional de Unidades de Radiação
IEN	Instituto de Engenharia Nuclear
RE	Equilíbrio de Radiação
SI	Sistema Internacional
SMN	Serviço de Medicina Nuclear
TCPE	Equilíbrio Transiente de Partículas Carregadas
UART	Transmissor/Receptor Assíncrono Universal

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>15</b>
2.1	Decaimento Radioativo .....	15
2.2	Processos de decaimento radioativo.....	16
2.2.1	Exemplos de decaimentos radioativos .....	18
2.3	Interação de fótons com a matéria .....	20
2.3.1	Efeito fotoelétrico .....	20
2.3.2	Efeito Compton.....	21
2.3.3	Produção de pares .....	22
2.4	Grandezas físicas.....	22
2.4.1	Fluência .....	22
2.4.2	Kerma .....	23
2.4.3	Exposição .....	24
2.4.3.1	Constante de taxa de exposição e constante de dose de raios gama.....	24
2.4.4	Dose absorvida.....	25
2.5	Detectores de radiação.....	26
2.5.1	Dosímetros.....	26
2.6	Detectores à gás .....	27
2.7	Processo de ionização em gases.....	28
2.8	Migração, coleção e leitura da carga elétrica.....	30
2.9	Aplicações de câmaras de ionização .....	32
2.9.1	Calibrador de dose .....	33
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
3.1	Picoamperímetro .....	35
3.1.1	Fonte de alta tensão.....	37
3.2	Microcontrolador .....	38
3.3	Software.....	41
3.4	Controle de qualidade do calibrador de dose.....	42
3.4.1	Fontes radioativas .....	44
3.4.2	Testes de CQ.....	47
3.4.2.1	Ajuste do zero .....	47

3.4.2.2	Radiação de fundo.....	48
3.4.2.3	Alta Voltagem.....	50
3.4.2.4	Repetibilidade.....	50
3.4.2.5	Precisão e Exatidão.....	53
3.5	Comparação com um calibrador de dose comercial.....	54
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>56</b>
4.1	Testes diários.....	56
4.1.1	Ajuste do zero.....	56
4.1.2	Radiação de fundo.....	58
4.1.3	Alta Voltagem.....	59
4.1.4	Repetibilidade.....	60
4.2	Testes Semestrais.....	61
4.3	Comparação com modelo comercial.....	64
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>68</b>
5.1	Conclusões.....	68
5.2	Perspectivas futuras.....	69
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>70</b>
	<b>ANEXO A. PRESSUPOSTOS PARA DETERMINAÇÃO DA DOSE ABSORVIDA.....</b>	<b>73</b>
	<b>ANEXO B. PROJETO INICIAL EM PROTOBOARD.....</b>	<b>75</b>
	<b>ANEXO C. ATIVIDADE CERTIFICADA CORRIGIDA PARA OS DIAS DE</b>	
	<b>MEDIDAS.....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Para exames de imagem e tratamento, os serviços de medicina nuclear (SMN) utilizam radiofármacos com várias meias-vidas diferentes. Esses radiofármacos podem ser administrados ao paciente de diversas formas. A radiação, emitida pelo radiofármaco fornecido ao paciente, está na forma de fótons gama ou partículas beta. Como resultado, todo material radioativo (radionuclídeo) destinado ao paciente deve ter a sua atividade medida em um calibrador de dose. A atividade na maioria das vezes é medida em seringas e frascos, mas também pode ser medida em qualquer outro recipiente que contenha radiofármacos que serão administrados a pacientes. Essa atividade deve ser medida com boa exatidão para ajudar no atingimento dos objetivos de diagnósticos ou tratamentos, com eficácia e imagens de alta qualidade (ALAMEEN et al., 2016). Ao mesmo tempo, a medida correta da atividade minimiza a dose ao paciente, seguindo o princípio básico da radioproteção.

Assim, o calibrador de dose é um equipamento essencial em qualquer SMN. Todos os SMN do Brasil são obrigados a empregar calibradores de dose para medir a atividade de soluções contendo radionuclídeos antes da administração desses radiofármacos aos pacientes para fins de diagnóstico ou tratamento de doenças. Ressalta-se também que este equipamento faz parte de um conjunto de instrumentos que a norma regulamentadora CNEN NN 3.05 exige nos centros de medicina nuclear como equipamentos básicos de proteção radiológica.

O calibrador de dose é formado por uma câmara de ionização cilíndrica, pressurizada com um certo gás. Diferentemente de outros tipos de câmaras de ionização, os calibradores de dose são preenchidos com gás argônio. Isso ajuda a eliminar o efeito da alteração da pressão barométrica nas leituras de saída (CHERRY et al., 2012). A radiação emitida pelo radiofármaco a ser aplicado interage com o gás na câmara de ionização. Essa interação produz pares de íons, os íons positivos migram em direção ao cátodo, enquanto os íons carregados negativamente (elétrons) em direção ao ânodo. Ao fornecer uma diferença de potencial entre os dois eletrodos na câmara, é gerada uma corrente quantificável. A corrente total gerada na câmara é diretamente proporcional à quantidade de material radioativo. A câmara processa a corrente como resultado da ionização gerada pela radiação incidente, permitindo que a atividade da fonte seja lida em unidades de atividade, Curie (Ci) ou Becquerel (Bq). Normalmente, esses equipamentos são calibrados para realizar a leitura do radiofármaco diretamente nessas unidades de atividade, e, além disso, eles possuem seletores para os diferentes radionuclídeos que serão medidos. O calibrador de dose opera em uma ampla gama de atividades, de centenas de Quilobecquerel a

dezenas de Gigabecquerel (SCHRADER, 1997)(CHERRY et al., 2012). Para operar nessa faixa de atividade são exigidas medidas de correntes de ionização muito baixas, na faixa de micro ( $\mu = 10^{-6}$ ) a pico ( $p = 10^{-12}$ ) Ampères (A). O objetivo deste projeto é desenvolver um sistema para medida desta faixa de corrente, sistema esse que possa servir de base para o desenvolvimento de um calibrador de dose para serviços de medicina nuclear no Brasil e para outros projetos que exijam medidas de baixas correntes.

O desenvolvimento de dispositivos para medidas de baixos valores de corrente requer conhecimento, habilidade e muitos testes. Mesmo com todos os trêz, alcançar a precisão em baixos níveis de corrente pode ser um desafio porque estes podem ser iguais ou inferiores ao nível de ruído do circuito de medida. Em alguns casos, a precisão exigida e as características do DUT (“dispositivo em teste” ou sensor que fornece a baixa corrente a ser medida) demandam equipamentos, arranjos e cuidados especiais. Isto é, por exemplo, o caso de medidas de corrente provenientes de uma câmara de ionização. Nestes casos, as resistências do circuito de medida tendem a crescer, impondo limites para as correntes que podem ser usadas sem produzir ruídos e outras fontes de erros.

O desafio de projetar um bom medidor de baixas correntes, específico para uma aplicação como a de um calibrador de dose, está em garantir bom desempenho em um equipamento de pequenas dimensões e a um custo baixo, que possibilite a produção e comercialização de forma competitiva com outros que estão no mercado. Com o êxito nesta parte projeto, o desenvolvimento de um calibrador de dose se torna possível e de grande valia para o mercado brasileiro, uma vez que praticamente não existam calibradores de dose comerciais desenvolvidos no Brasil para fins de comercialização, com o mercado amplamente dominado por grandes marcas norte americanas.

Portanto, o objetivo geral do trabalho é desenvolver um sistema para medida de baixas correntes, tendo como foco o desenvolvimento do circuito eletrônico de medida, o controle digital baseado em microcontrolador e o desenvolvimento das interfaces com o usuário no computador, a fim de realizar a captura, processamento e apresentação dos dados das medições. Por fim, serão realizados os testes de controle de qualidade, que são mandatórios para o equipamento que foi desenvolvido, e também uma comparação com um modelo comercial já existente.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Decaimento Radioativo

Desintegração nuclear ou decaimento radioativo é um processo pelo qual um núcleo instável se transforma espontaneamente em um núcleo mais estável através da emissão de partículas ou energia do interior do núcleo. Os seguintes conceitos ajudam a compreensão deste fenômeno estatístico (PODGORŠAK, 2006) (OKUNO; YOSHIMURA, 2016).

- Atividade: Considerando  $N$  como o número de átomos radioativos e definindo  $\lambda$  como a constante de decaimento radioativo ( $s^{-1}$ ), tem-se a Atividade, ou taxa de decaimento, sendo o número de decaimentos por unidade de tempo de uma amostra radioativa ( $1 \frac{\text{decaimento}}{\text{segundo}} = 1Bq = \frac{10^{-10}}{3,7} Ci$ ).

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.1)$$

Separando variáveis e integrando de  $t = 0$  (onde  $N = N_0$ ) até  $t$ , obtém-se uma expressão para o decaimento radioativo (ATTIX, 1986).

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

- Tempo de meia-vida ( $T_{1/2}$ ): É mais comum representar um radionuclídeo pelo seu tempo de meia-vida ao invés de sua constante de decaimento. O tempo de meia vida é o tempo necessário para uma amostra atingir metade de seus núcleos instáveis iniciais.

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (2.3)$$

- Meia-vida efetiva: Para se estimar efeitos biológicos de um radionuclídeo que foi incorporado a um paciente é preciso conhecer a meia-vida efetiva, que depende da meia-vida física e da meia-vida biológica. A meia vida biológica é o tempo necessário para reduzir a metade a quantidade inicial de um radionuclídeo num órgão. Ao medir em função do tempo a retenção da atividade de um radionuclídeo em um meio biológico, tem-se a meia vida efetiva (OKUNO; YOSHIMURA, 2016) (ATTIX, 1986).

$$T_{1/2 \text{ efetiva}} = \frac{(T_{1/2 \text{ bio}})(T_{1/2 \text{ fis}})}{T_{1/2 \text{ bio}} + T_{1/2 \text{ fis}}} \quad (2.4)$$

- **Ângulo sólido:** Sabendo que fontes radioativas pontuais emitem radiação isotropicamente e considerando que não há atenuação entre a fonte e o detetor, define-se o ângulo sólido ( $\Omega$ ), em esferorradianos, sob uma área ( $A$ ) como (KNOLL, 2010):

$$\Omega = \int_A \frac{\cos \alpha}{r^2} dA \quad (2.5)$$

Sendo  $r$  a distância entre a fonte e o elemento de superfície infinitesimal  $dA$ , e,  $\alpha$  o ângulo entre a normal ao elemento de superfície e a direção da fonte.

## 2.2 Processos de decaimento radioativo

Existem diversas formas que um núcleo radioativo instável pode decair para um mais estável. Abaixo estão descritos os principais processos e que são de interesse para este trabalho, onde  $X$  é um determinado núcleo instável,  $A$  seu número de massa e  $Z$  seu número atômico (PODGORŠAK, 2006) (ATTIX, 1986).

- **Decaimento alfa ( $\alpha$ ):** No decaimento alfa o número de prótons e nêutrons é conservado pela produção de um núcleo de Hélio e diminuição de  $A$  e  $Z$  dos núcleos pai em 4 e 2, respectivamente.

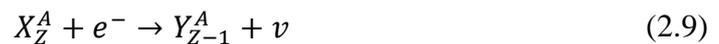


- **Decaimento beta ( $\beta$ ):** O decaimento beta pode ocorrer através da emissão de elétrons ( $\beta^-$ ), onde um nêutron é convertido em um próton e são emitidos um elétron e um antineutrino, ou pósitrons ( $\beta^+$ ) onde um próton é convertido em um nêutron, e consequentemente, ocorre a emissão de um pósitron e um neutrino.



Uma característica fundamental da desintegração por emissão de partículas beta é que a sua distribuição de energia é contínua devido a presença de neutrinos, no caso  $\beta^+$ , e antineutrinos, no caso  $\beta^-$ .

- Emissão gama ( $\gamma$ ): Emissão de energia de um núcleo excitado na forma de fótons  $\gamma$  com energia  $h\nu$ . O termo  $h$  se refere a constante de Planck e  $\nu$  a frequência da radiação, quando multiplicados  $h\nu$  representa a energia do fóton.
- Captura de elétrons: O decaimento radioativo por captura de elétrons pode ocorrer quando um elétron é absorvido pelo núcleo. O elétron é então capturado por um próton nuclear e desencadeia a transformação de próton em nêutron, ocasionando a emissão de neutrino, assim como no decaimento  $\beta^+$ . Geralmente esse processo é sucedido pela emissão de raios-X característicos e/ou emissão gama.



- Conversão interna: Em alguns casos a energia de desexcitação nuclear ao invés de ser emitida através de fótons gama para fora do átomo, é transferida a um elétron orbital. Se essa energia for suficiente para desalojar o elétron, ele é ejetado, configurando uma conversão interna.
- Raios X característicos: Ao ocorrer algum processo de decaimento que ocasione a retirada de elétrons de uma camada interna da eletrosfera do átomo, como na conversão interna, imediatamente um elétron de uma camada mais externa ocupa a vacância gerada. Este elétron ao transicionar para uma camada mais interna libera energia em forma de fótons de raios X. O fóton liberado é chamado de raio X característico pois sua energia é definida exclusivamente pela diferença de energia entre o estado inicial e o final, ou seja, é “característica” da respectiva transição. A energia dos raios X característicos variam de alguns eV a dezenas de keV. (ZIESSMAN; O’MALLEY; THRALL, 2006) (TAUHATA et al., 2013).

### 2.2.1 Exemplos de decaimentos radioativos

Como será falado na seção 3.4.1, neste trabalho foram utilizadas 3 fontes radioativas. Abaixo são citadas estas 3 fontes e seus respectivos esquemas de decaimento, segundo o *Bureau International des Poids et Mesures*.

- **Cobalto-60:** Decai através da emissão de partículas beta menos ( $\beta^-$ ). A energia do  $\beta^-$  com maior probabilidade de emissão (99,98%) é de 317,32 keV. Os fótons  $\gamma$  mais aparentes são os de energia 1173 keV (99,85%) e 1332 keV (99,98%), como mostra a Figura 1.

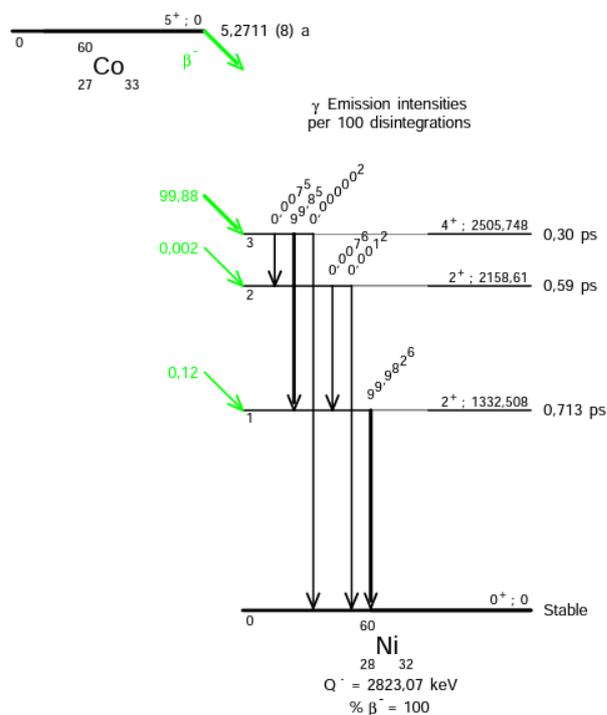


Figura 1: Esquema de decaimento do Co-60 (BÉ, M. M. et al., 2006).

- **Bário-133:** Decai por captura de elétrons. As transições de captura eletrônica com maior probabilidade são referentes aos elétrons de energia 80 keV (85,41%) e 133 keV (14,46%). Emite fótons  $\gamma$  de diferentes energias, sendo os mais aparentes de energia 356 keV (62,05%), 81 keV (33,31%), 302 keV (18,31%), como mostra a Figura 2.

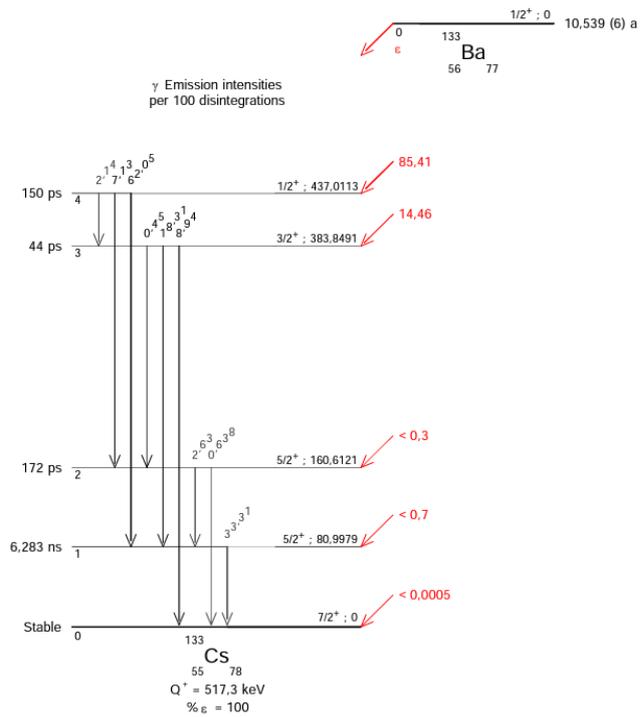


Figura 2: Esquema de decaimento do Ba-133 (BÉ, M. M. et al., 2016).

- Césio-137:** Assim como o Cobalto-60, o Césio-137 também decai através do decaimento Beta, em específico beta menos ( $\beta^-$ ), sendo o mais aparente de energia 514 keV (94,36%). O fóton gama  $\gamma$  emitido mais aparente é o de energia 661 keV (84,99%), como mostra a Figura 3.

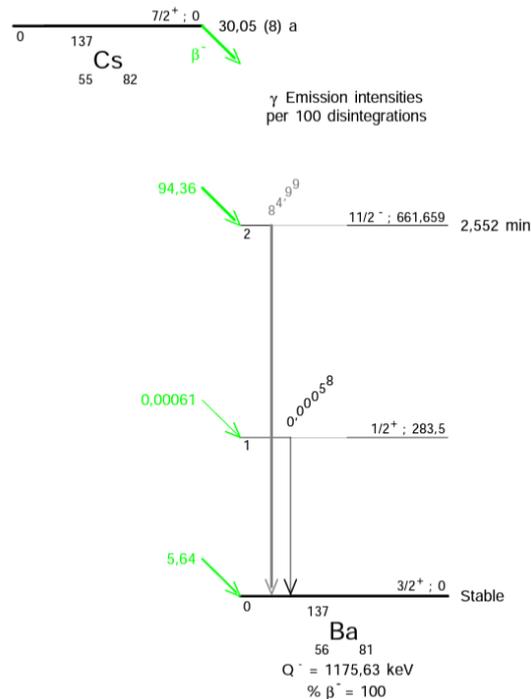


Figura 3: Esquema de decaimento do Cs-137 (BÉ, M. M. et al., 2006).

## 2.3 Interação de fótons com a matéria

Os fótons, tanto de raios X como gama, são chamados de radiação indiretamente ionizante. Sua interação com a matéria se caracteriza por transferência de energia, e ocorre, dentro de uma faixa de energia, por 3 efeitos predominantes: fotoelétrico, Compton e produção de pares. Esses efeitos predominantes dependem da energia dos fótons e do número atômico  $Z$  do material que está interagindo, como mostra a Figura 4 (OKUNO; YOSHIMURA, 2016).

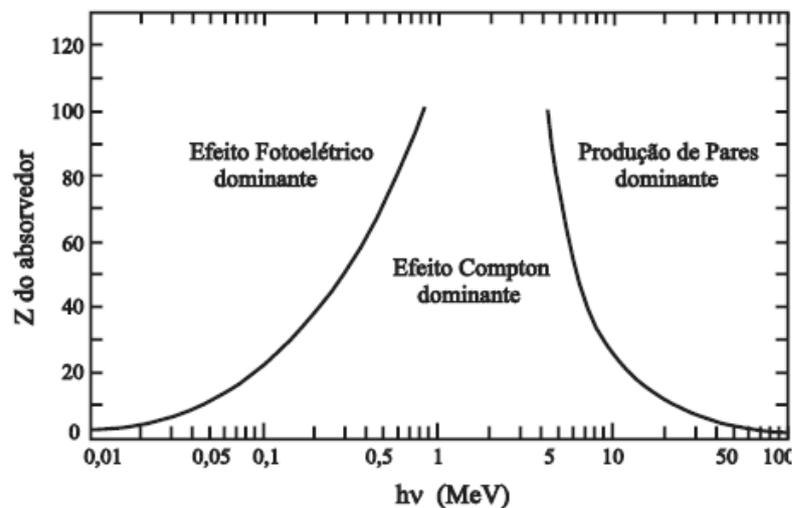


Figura 4: Tipo de interação predominante para diferentes energias de fótons e números atômicos (TAUHATA et al., 2013).

### 2.3.1 Efeito fotoelétrico

O fóton é completamente absorvido e tem sua energia transferida para o átomo. Parte dessa energia é gasta para retirar um elétron do átomo enquanto a parte restante é gasta como energia cinética com que o elétron é emitido, como mostra a equação 2.10 (EISBERG; RESNICK, 1979).

$$K = h\nu - w, \quad (2.10)$$

Sendo:

K: Energia cinética do elétron emitido

$h\nu$ : Energia do fóton incidente

$w$ : Trabalho necessário para remover o elétron do material.

### 2.3.2 Efeito Compton

Ao considerar um fóton interagindo com um elétron livre e estacionário, tem-se que no efeito Compton tanto o fóton quanto o elétron são espalhados, como mostra a Figura 5. O fóton é deslocado a um ângulo  $\varphi$ , com energia  $h\nu'$  e momento  $\frac{h\nu'}{c}$ . Enquanto isso o elétron desloca um ângulo  $\theta$ , energia cinética  $T$  e momento  $p$  (ATTIX, 1986).

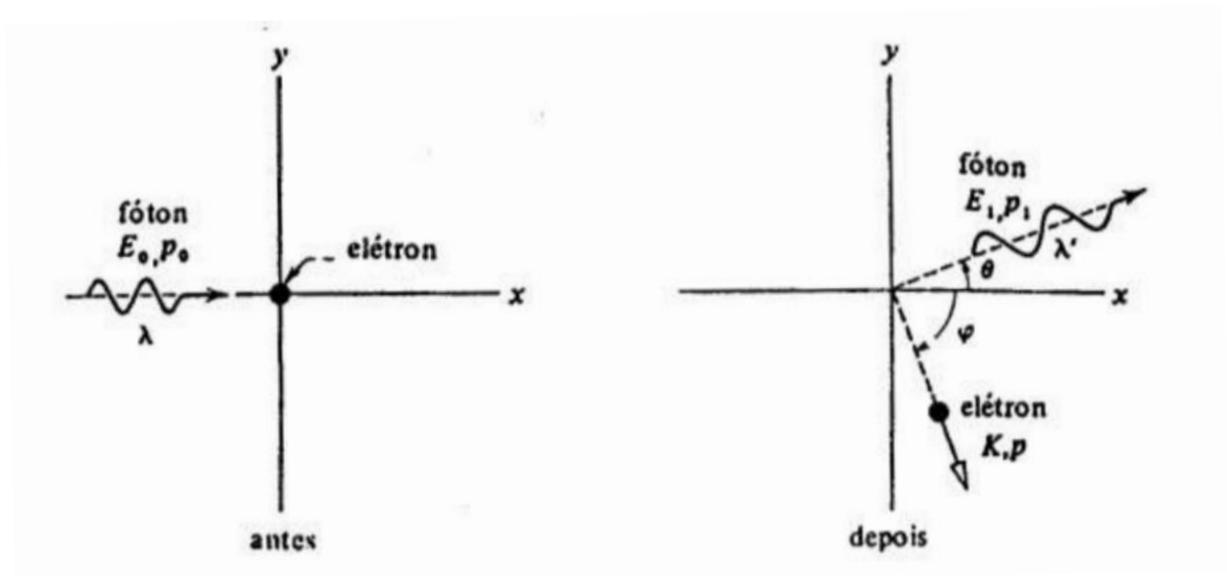


Figura 5: Cinemática do efeito Compton (EISBERG; RESNICK, 1979).

Sabendo que  $m_0c^2$  é a energia de repouso do elétron, pode-se deduzir algumas equações importantes para a energia relativística final do fóton  $h\nu'$ , a energia cinética do elétron  $T$ , e o ângulo de espalhamento do elétron  $\theta$  (ATTIX, 1986):

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (h\nu/m_0c^2)(1 - \cos \varphi)} \quad (2.11)$$

$$T = h\nu - h\nu' \quad (2.12)$$

$$\cot \theta = \left(1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}\right) \tan\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (2.13)$$

### 2.3.3 Produção de pares

A produção de pares é predominante em fótons de alta energia, ver Figura 4. O fóton deposita toda sua energia ao colidir com um núcleo, e o resultado é a criação de um par elétron-pósitron, como mostra a Figura 6.

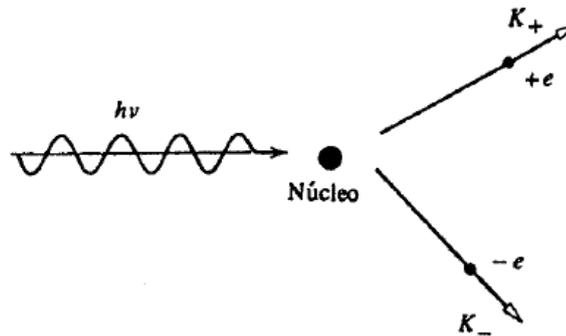


Figura 6: Processo de produção de pares (EISBERG; RESNICK, 1979).

A energia absorvida pelo núcleo é desprezível, devido a seu alto valor de massa, portanto a equação de conservação de energia total relativística para este processo é:

$$h\nu = E_- + E_+ = (m_0c^2 + T_-) + (m_0c^2 + T_+) = T_- + T_+ + 2m_0c^2 \quad (2.14)$$

Onde:

$E_+$  e  $E_-$ : Energias relativísticas totais do pósitron e do elétron, respectivamente,

$T_+$  e  $T_-$ : Energias cinéticas do pósitron e elétron, respectivamente.

## 2.4 Grandezas físicas

### 2.4.1 Fluência

- Fluência ( $\Phi$ ): Número de partículas incidentes em uma área infinitesimal ( $m^{-2}$ ) (ICRU, 1993).

$$\Phi = \frac{dN}{dA} \quad (2.16)$$

- Taxa de fluência ( $\varphi$ ): Fluência em um intervalo de tempo infinitesimal ( $m^{-2}s^{-1}$ ).

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dN}{dA} \right) \quad (2.17)$$

- Fluência de Energia ( $\Psi$ ): Quantidade de energia de todas as partículas em uma área infinitesimal ( $\frac{J}{m^2}$ ).

$$\Psi = \frac{d(E * N)}{dA} \quad (2.18)$$

- Taxa de fluência de Energia ( $\psi$ ): Fluência de energia em um intervalo de tempo infinitesimal ( $\frac{W}{m^2}$ ).

$$\psi = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{d(E * N)}{dA} \right) \quad (2.19)$$

#### 2.4.2 Kerma

- Kerma (K): É a energia transferida aos elétrons na primeira interação da radiação ( $dE_{tr}$ ) com a matéria de massa infinitesimal (dm) (ICRU, 1993):

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} = \Psi \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) \quad (2.20)$$

Sua unidade é Gray [Gy=J/kg]. O kerma é a soma de duas componentes: o kerma de colisão ( $K_c$ ), referente a parte da energia transferida perdida por “colisões”, e o kerma de radiação ( $K_r$ ), referente a parte perdida por Bremsstrahlung.

$$K = K_c + K_r \quad (2.21)$$

Assim,

$$(1 - g) \frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{\mu_{en}}{\rho} \quad (2.22)$$

Onde:

g: Fator que representa a parte da energia transferida que sofre perda radiativa, por Bremsstrahlung.

$\frac{\mu_{tr}}{\rho}$  = coeficiente mássico de transferência de energia.

$\frac{\mu_{en}}{\rho}$  = coeficiente mássico de absorção de energia

### 2.4.3 Exposição

- Exposição (X): É o valor absoluto da carga total de ionizações (dQ) quando todos os elétrons e pósitrons são completamente freados no ar de massa infinitesimal. A exposição pode ser quantificada através do fator W/e, como a fração de energia média para se formar um par iônico em um determinado gás pela carga do elétron (ICRU,1993) (KNOLL, 2010).

$$X = \frac{dQ}{dm} = \frac{K_{c(ar)}}{W/e} \quad (2.23)$$

Sua unidade do SI é coulomb por quilo (C/kg), porém é historicamente usado Roentgen (R). Pode-se definir Roentgen como a exposição que resulta na geração da unidade eletrostática de carga em 1 cm<sup>3</sup> de ar em CNTP (1 R = 2,58 \* 10<sup>-4</sup> C/kh).

- Taxa de Exposição: Ao considerar uma fonte a uma distância *d* suficientemente grande em relação ao detector, a ponto de ser tratada como pontual, e que possua uma atividade A. Pode-se definir a taxa de exposição como (KNOLL,2010):

$$\dot{X} = \Gamma_{\delta} \frac{A}{d^2} \quad (2.24)$$

Onde  $\Gamma_{\delta}$  é a constante de taxa de exposição para um determinado radionuclídeo.

#### 2.4.3.1 Constante de taxa de exposição e constante de dose de raios gama

A constante de taxa de exposição  $\Gamma_{\delta}$  citada anteriormente na fórmula da taxa de exposição  $\dot{X}$  é dada por (SMITH; STABIN, 2012):

$$\Gamma_{\delta} = \frac{1}{4\pi} \sum_i \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_i Y_i E_i \quad (2.25)$$

sendo  $E_i$  a energia dos fótons emitidos pelo nuclídeo com campo  $Y_i$ .

Existe uma outra constante de definição parecida chamada constante de dose de raios gama  $\Gamma$ , também chamada de fator gama. Apesar de ter sido recomendado substituí-la pela constante da taxa de exposição ( $\Gamma_\delta$ ) (ICRU, 1971), ainda é comum vê-la. Definidos de forma semelhante,  $\Gamma_\delta$  inclui todas as radiações de fótons de origem nuclear e não nuclear com energias maiores que  $\delta$ , ou seja, inclui os raios-x característicos e a radiação de bremsstrahlung. Assim,  $\Gamma_\delta$  é a soma de  $\Gamma$  e  $\Gamma_x$ , onde  $\Gamma_x$  é a constante de raios-x específica que contabiliza todas as radiações de fótons de energia maior que  $\delta$  que são de origem não nuclear (GLASGOW; DILLMAN, 1979).

A constante de dose de raios gama possui unidade (mSv/h)/MBq, e é dada por (UNGER; TRUBEY, 1982):

$$\Gamma = \left(\frac{1}{4\pi r^2}\right) \sum_i S_i D(E_i) \quad (2.26)$$

Sendo  $r = 100$  cm,

$n$  = número de raios gama emitidos pelo nuclídeo,

$S_i$  = probabilidade de emissão de cada raio gama,

$E_i$  = energia do raio gama (MeV),

$D(E_i)$  = taxa de dose por unidade de fluxo de densidade.

#### 2.4.4 Dose absorvida

- Dose Absorvida (D): Energia média transmitida pela radiação ionizante ( $d\bar{\epsilon}$ ) à um material de massa infinitesimal ( $dm$ ), em Gray (Gy) (ANDREO et al., 2017). Devido aos variados modos de interação da radiação com a matéria, nem toda energia transferida é absorvida no material. Diferentemente do kerma, não há uma relação matemática direta da dose absorvida com a fluência de energia, logo, torna-se necessário alguns pressupostos (ANEXO A. Pressupostos para determinação da dose absorvida) para ser possível determiná-la.

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (2.27)$$

## 2.5 Detectores de radiação

Detectores de radiação ionizante são dispositivos que fornecem uma leitura quando expostos a um feixe de radiação. Em geral, esses detectores não medem a grandeza dosimétrica de interesse, e sim carga, corrente ou aumento de temperatura em um determinado volume sensível. Para determinação das grandezas dosimétricas a partir da medida do detector é necessário um processo de calibração (KNOLL, 2010) (ATTIX, 1991).

Para que um dispositivo seja classificado como um detector apropriado ele deve apresentar algumas características:

1. Repetitividade, definida pelo grau de concordância dos resultados obtidos sob as mesmas condições de medição;
2. Reprodutibilidade, grau de concordância dos resultados obtidos em diferentes condições de medição;
3. Estabilidade, aptidão do instrumento conservar constantes suas características de medição ao longo do tempo;
4. Exatidão, grau de concordância dos resultados com o “valor verdadeiro” ou “valor de referência” a ser determinado;
5. Precisão, grau de concordância dos resultados entre si, normalmente expresso pelo desvio padrão em relação à média;
6. Sensibilidade, razão entre a variação da resposta de um instrumento e a correspondente variação do estímulo; e
7. Eficiência, capacidade de converter em sinais de medição os estímulos recebidos (TAUHATA et al., 2013, p. 181).

Existem diversos tipos de detectores: termoluminescentes, à gás, à cintilação, semicondutores, entre outros. Neste trabalho, o detector de maior interesse é a câmara de ionização, um exemplo de detector à gás.

### 2.5.1 Dosímetros

- Um dosímetro é definido como qualquer dispositivo que é capaz de fornecer uma leitura que possua uma relação com a medida da dose absorvida depositada em um volume sensível devido à radiação ionizante. (ATTIX, 1986).

- Teoria de cavidade: Uma vez que a dose absorvida é dependente do material em que é depositada e, em geral, não se está interessado na dose absorvida por um volume sensível qualquer, mas sim, a dose absorvida pelo corpo humano e suas diferentes estruturas, se torna de grande interesse a chamada teoria da cavidade. Basicamente um volume sensível gasoso ( $g$ ) é inserido em um meio homogêneo, uma parede ( $w$ ). A partir disso se formularam algumas teorias no qual o objetivo é achar uma relação entre a dose em “ $g$ ” e em “ $w$ ”. Um exemplo é a teoria de Bragg-Gray.

## 2.6 Detectores à gás

Vários dos tipos de detectores mais antigos e amplamente usados são baseados nos efeitos produzidos quando uma partícula carregada passa pelo gás. A interação das radiações com os gases provoca, majoritariamente, excitação e ionização dos seus átomos. Graças a ionização são formados pares elétron-íon, e como o gás está exposto a uma alta diferença de potencial, é naturalmente aplicado um campo elétrico e efetuado a coleta de todas as cargas criadas (KNOLL, 2010) (TAUHATA et al., 2013).

Detectores a gás possuem diferentes regiões de operação que variam de acordo com a tensão que é aplicada ao gás como mostra a Figura 7. A primeira região, chamada de “Não proporcional”, ocorre quando é aplicada uma baixa tensão, nesta região os pares elétron-íon são formados, porém o campo elétrico existente não é suficiente para coleção das cargas ocasionando o processo de recombinação dos íons (explicado a seguir na seção 2.7. Processo de ionização em gases), e logo, não sendo uma boa região para a operação de detectores.

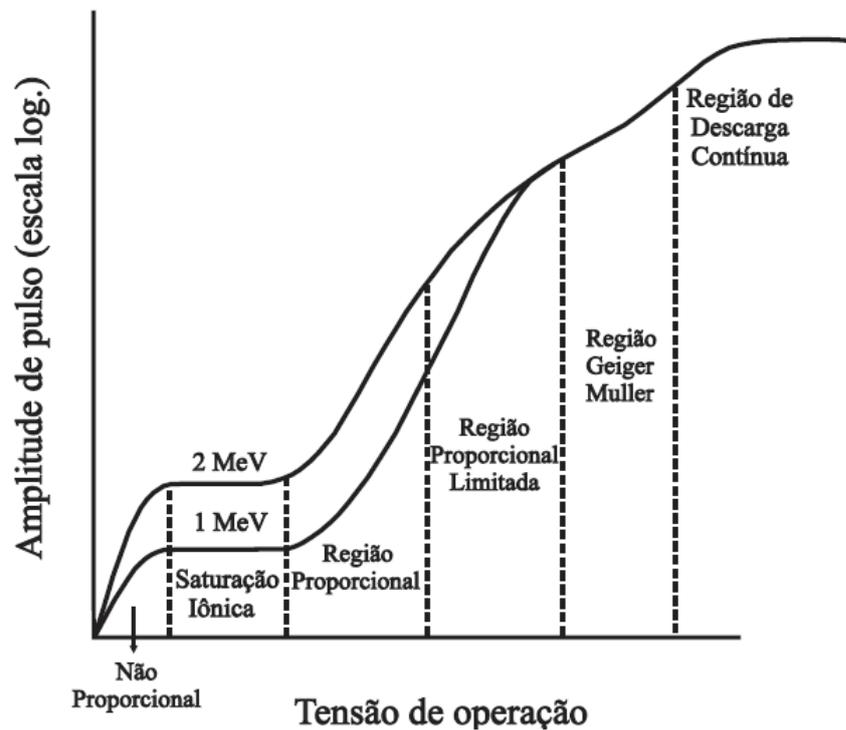


Figura 7: Gráfico das regiões de operação de detectores a gás (TAUHATA, 2013).

Com uma tensão maior aplicada ao gás se atinge a região de “Saturação Iônica”, onde agora todos os íons formados são coletados, fazendo com que o sinal seja proporcional à energia da radiação incidente. Nesta região operam os detectores tipo câmara de ionização, que são o foco deste trabalho.

Existem outros dois tipos de detectores a gás que operam em algumas das regiões posteriores, são eles: os detectores proporcionais, que pertencem à região proporcional, e os detectores Geiger-Muller, que pertencem à região Geiger Muller. Estes dois detectores não serão aprofundados neste trabalho. As regiões restantes são a região proporcional limitada e a região de descarga contínua, ambas não são adequadas para a operação de detectores.

## 2.7 Processo de ionização em gases

- Número de pares íon formados: Moléculas neutras que foram ionizadas formam um par iônico, isto é, um íon positivo e um elétron livre. O par iônico é o constituinte básico do sinal elétrico desenvolvido pela câmara de íons. Como nem toda molécula é ionizada, podendo ser somente excitada, é definido o valor  $W$  como a energia média perdida pela

partícula incidente por par de íon formado. Na tabela abaixo o “A” se refere ao argônio “Ar” ao ar.

Tabela 1: Energia média para formação de pares de íons em alguns gases. (TAUHATA et al., 2013)

Gás	Valor W (eV/par de íon)	
	Elétrons rápidos	Partículas alfa
A	26,4	26,3
He	41,3	42,7
$H_2$	36,5	36,4
$N_2$	34,8	36,4
Ar	33,8	35,1
$O_2$	30,8	32,2
$CH_4$	27,3	29,1

- Interações dos pares iônicos no gás: Dos muitos tipos de colisões que ocorrem com frequência entre elétrons livres, íons e moléculas de gás neutro, algumas das mais importantes para entender o comportamento dos detectores à gás são mostrados na Figura 8 (KNOLL, 2010).

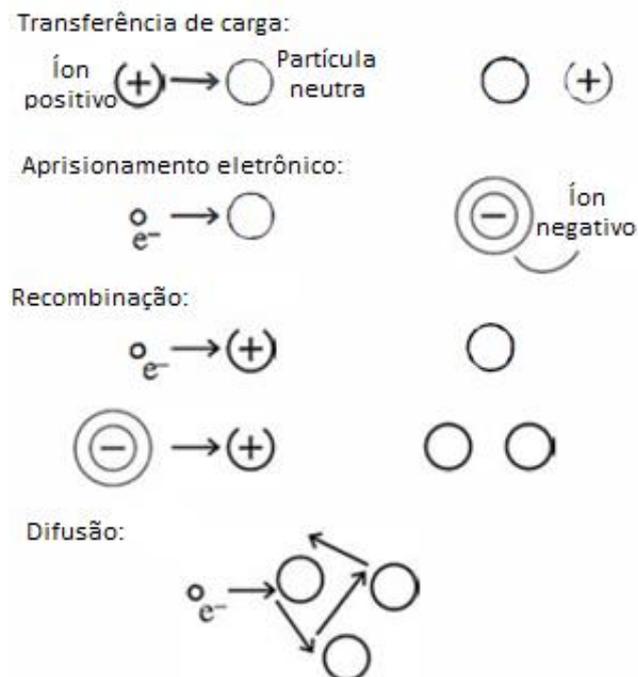


Figura 8: Alguns tipos de interações de partículas carregadas em um gás que podem influenciar o comportamento de detectores. As partículas que interagem estão à esquerda e os produtos da interação estão à direita (Adaptado de KNOLL, 2010).

1. Transferência de carga: ocorre ao íon positivo se encontrar com uma partícula neutra, um elétron da partícula neutra é transferido para o íon positivo, invertendo os papéis de cada um.
2. Aprisionamento eletrônico: ocorre em alguns gases que há uma tendência a formar íons negativos pelo aprisionamento de um elétron livre formado no par iônico.
3. Recombinação: pode ocorrer entre íons positivos e elétrons livres, onde o elétron livre é capturado pelo íon positivo, ou íons positivos e íons negativos, onde o elétron extra do íon negativo é transferido para o positivo, resultando em átomos neutros. Em ambos os casos, a carga representada pelo par original é perdida e não pode contribuir mais para o sinal dos detectores com base na coleta da carga de ionização.
4. Difusão: ocorre quando elétrons livres não são aprisionados por nenhuma molécula neutra e ficam espalhados no gás. Átomos e moléculas neutras do gás estão em constante movimento térmico, assim como os íons positivos e elétrons livres criados dentro do gás, porém uma vez que a velocidade térmica média é muito maior para elétrons do que para íons, é mais comum ocorrer para elétrons.

## 2.8 Migração, coleção e leitura da carga elétrica

- Mobilidade da carga: Quando há um campo elétrico externo em uma região onde há íons ou elétrons no gás, espera-se que existam forças eletrostáticas agindo sobre as partículas. Esse movimento consiste em uma superposição da velocidade térmica aleatória com a velocidade de arraste em uma determinada direção (para íons positivos na direção do campo, e para íons negativos e elétrons na direção oposta). Para íons em um gás, a velocidade de arraste é dada por (KNOLL, 2010):

$$v = \frac{\mu E}{p} \quad (2.28)$$

Onde:

$v$  = velocidade de arraste,

$E$  = Campo elétrico

$p$  = Pressão do gás

$\mu$  = Mobilidade (aproximadamente constante  $1 \sim 1,5 * 10^{-4} \frac{m^2 * atm}{V * s}$ )

- **Corrente de ionização:** Partículas carregadas em movimento geram corrente elétrica. Sob as condições onde a recombinação seja desprezível e todas as cargas coletadas, a corrente gerada é uma medida precisa da taxa na qual os pares de íons são formados dentro do volume, essa corrente é chamada de corrente de ionização. No equilíbrio eletrônico, a corrente externa (geradora do campo elétrico) será igual à corrente de ionização coletada nos eletrodos, com isso, bastaria um amperímetro sensível o suficiente colocado no circuito externo para medir a corrente de ionização (KNOLL, 2010). A Figura 9 ilustra esse processo.

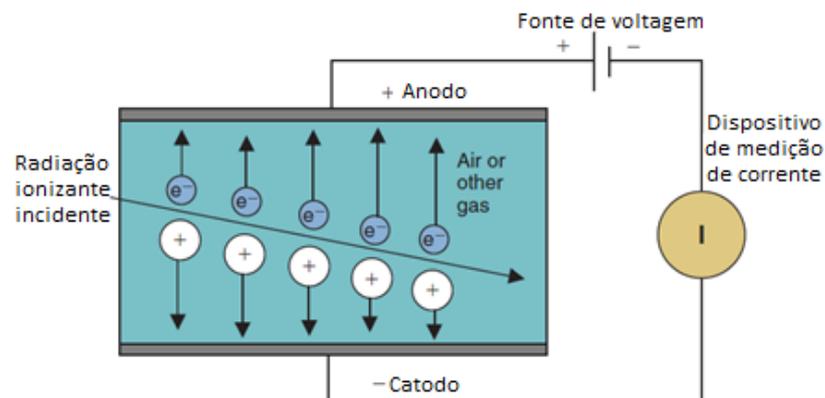


Figura 9: Componentes básicos de uma câmara de ionização (Adaptado de CHERRY et al., 2012).

- **Medição da corrente de íons:** Como a corrente de ionização normalmente é muito pequena, impedindo uma leitura direta, se torna necessário o uso de um eletrômetro. O eletrômetro mede indiretamente a corrente detectando a queda de tensão através de uma alta resistência colocada em série no circuito, como mostra a Figura 10. Com isso, a voltagem gerada através do resistor (tipicamente com o valor de  $10^9 \sim 10^{12}$  ohms) pode ser amplificada e serve como base para o sinal medido. Um ponto fraco dos circuitos com eletrômetros é que eles devem frequentemente ser balanceados redefinindo a escala para zero, devido a ruídos gerados pela eletrônica (KNOLL, 2010). Esse ponto fraco é supervisionado, e corrigido, pelo teste de controle de qualidade do ajuste de zero.

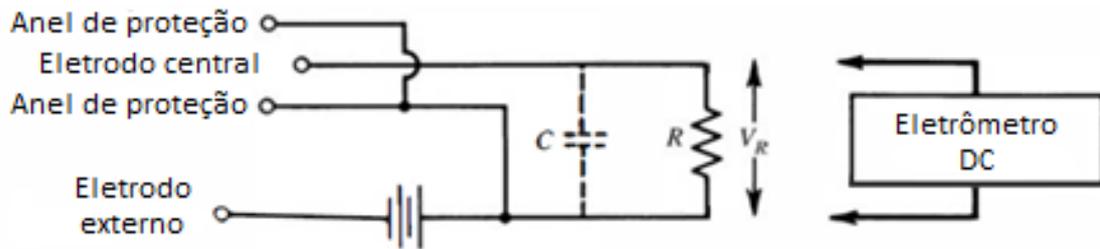


Figura 10: Medição de pequenas correntes de íons por meio do uso de uma resistência em série  $R$  e um eletrômetro para registrar a tensão resultante (KNOLL, 2010).

## 2.9 Aplicações de câmaras de ionização

Como explicado no tópico 2.6, a câmara de ionização é o tipo de detector a gás que opera na região de saturação iônica. As câmaras de ionização podem ser operadas em modo pulso, onde cada quantum de radiação dá origem a um pulso de sinal distinto, porém a grande maioria opera em modo corrente, onde é medida a taxa média de formação de íons dentro da câmara (KNOLL, 2010).

Existem vários tipos de detectores do tipo câmara de ionização, alguns tipos utilizam o ar como elemento gasoso e com isso são capazes de medir diretamente a grandeza Exposição ( $X$ ), enquanto outros utilizam gases. Um gás comumente escolhido é o argônio, por ser um gás denso ele permite aumentar a densidade de ionização dentro de um determinado volume. Analogamente, a pressão a qual o gás é submetido geralmente é de 1 atmosfera, porém pressões mais altas também são comumente utilizadas para aumentar a sensibilidade (KNOLL, 2010) (TAUHATA et al., 2013).

Dentre os diferentes tipos de câmaras de ionização pode-se citar (TAUHATA et al., 2013):

1. Câmara de ionização “free air”,
2. Caneta dosimétrica,
3. Câmara de ionização portátil,
4. Câmara de ionização tipo poço,
5. Câmara de extrapolação,
6. Câmara tipo dedal.

### 2.9.1 Calibrador de dose

O calibrador de dose, comumente chamado de medidor de atividade ou curiômetro, é uma câmara de ionização do tipo poço. É usado rotineiramente em qualquer SMN para verificar o valor de atividade de radionuclídeos contidos em seringas e frascos que serão administrados a pacientes. Eles são constituídos de câmaras seladas e pressurizadas preenchidas com um gás denso, como o argônio, que possibilita uma maior densidade de ionização dentro de um determinado volume, e conseqüentemente, se obtém uma maior sensibilidade. Os calibradores de dose normalmente são calibrados para ler diretamente em unidades de atividade (becqueréis ou curies), e dispõem de seletores pré-programados para diferentes radionuclídeos (CHERRY et al., 2012) (KNOLL,2010).

Este tipo de detector é amplamente utilizado em laboratórios para estabelecer padrões de referência para calibrações devido a sua alta estabilidade, porém, uma característica importante é que não é possível discriminar entre diferentes tipos de radiação, portanto, este detector não pode ser usado para espectroscopia. Devido ao seu modo de funcionamento e detecção da radiação, como explicado na seção 2.8, o calibrador de dose é capaz de detectar qualquer tipo de radiação que seja capaz de ionizar o gás pressurizado presente na câmara, seja essa radiação proveniente de fótons ou partículas carregadas. Abaixo, a Figura 11 ilustra os componentes básicos de uma câmara de ionização e um calibrador de dose.



Figura 11: (a) Vista interna de uma câmara de ionização; (b) Calibrador de dose (câmara de ionização conectada a um eletrômetro) (TAUHATA et al., 2013).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram usados dispositivos microcontroladores para desenvolver as funções de processamento digital das medidas de baixas correntes com alta precisão. A Figura 12 mostra a montagem experimental, já finalizada, em funcionamento; seu desenvolvimento se deu inteiramente nas instalações do Serviço de Instrumentação do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN). Para sua realização foi utilizada uma câmara de ionização da marca LND modelo 50920, 3 fontes radioativas, uma placa eletrônica desenvolvida exclusivamente para este trabalho contendo um microcontrolador da Texas Instruments modelo MSP430AFE253 (com um ADC de 24 bits) integrado e um computador. Além disso foram utilizados alguns equipamentos a mais durante o desenvolvimento, como uma fonte de corrente DC Keithley modelo 6220, um eletrômetro de 5½ dígitos e 1fA de sensibilidade (Keithley modelo 6517B), além de fontes de alimentação, multímetros, osciloscópios e diversos tipos de cabos. Para a aquisição dos dados e sua apresentação no computador foi utilizada a versão 2019 do programa LabView.

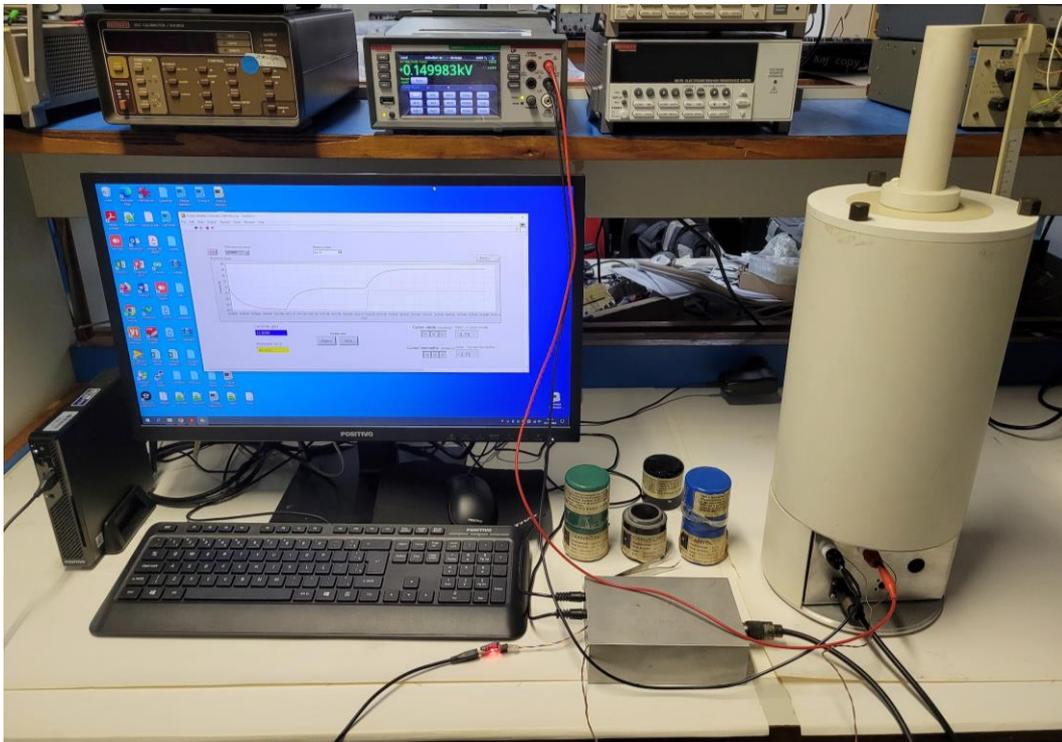


Figura 12: Projeto em funcionamento. À direita câmara de ionização conectada na placa eletrônica desenvolvida, contida na caixa metálica, que por fim, está conectada no computador através de uma interface USB. Entre o computador e a câmara estão as blindagens de chumbo para os 3 radionuclídeos utilizados. Na parte de cima da foto encontra-se o multímetro também conectado a câmara.

Uma vez com o projeto em funcionamento foram então realizados os testes de controle de qualidade do medidor de atividade (seção 3.4), que são fundamentais para sua utilização em serviços de medicina nuclear. E, por fim, foi feita uma comparação com um calibrador de dose comercial Capintec CRC-55tR, utilizando resultados obtidos nas medições feitas com fontes padrão, com o intuito de avaliar a qualidade e o desempenho das medidas de atividade do sistema desenvolvido.

### 3.1 Picoamperímetro

O primeiro passo a ser tomado para início do projeto foi desenvolver um circuito eletrônico analógico do picoamperímetro que possibilite uma faixa de medida de corrente entre pelo menos  $10^{-6}$  e  $10^{-12}$  A. O trabalho inicial foi feito utilizando uma protoboard (ANEXO B. Projeto inicial em Protoboard). À medida que o projeto avançava foram obtidos resultados promissores, e com o auxílio do co-orientador deste trabalho, o Dr. Fábio de Lacerda, foi desenvolvida uma placa eletrônica com o microcontrolador integrado.

Com o objetivo de ler a corrente obtida na câmara de ionização, o seu sinal de saída é conectado no circuito eletrônico analógico desenvolvido. Ao chegar na placa eletrônica, essa corrente é medida detectando a queda de tensão através de uma alta resistência colocada em série no circuito, neste projeto foi utilizado um resistor de  $1\text{ G}\Omega$ . Posteriormente o sinal passa por um *buffer* analógico, esse circuito funciona como um amplificador isolador de maneira a conectar um estágio com alta impedância de saída a uma carga de baixa impedância sem alterar a tensão (SEDRA; SMITH, 2000). A Figura 13 mostra a representação usual de um *buffer* feito com um amplificador operacional. Após isso, o sinal de saída do buffer (no nosso caso o buffer tem ganho 1x) segue para ser processado pelo microcontrolador.

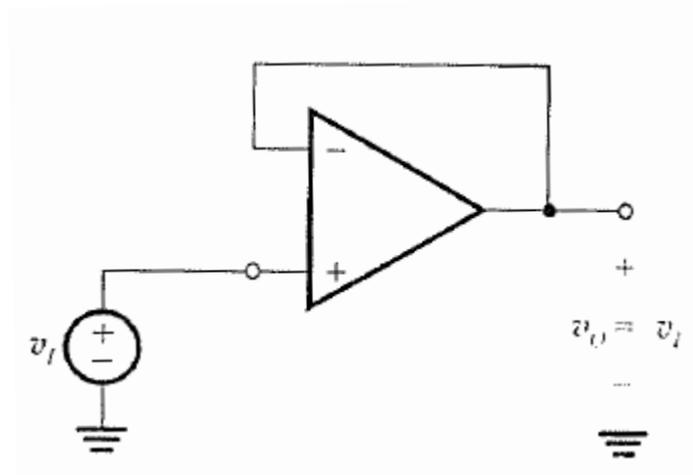


Figura 13: Amplificador buffer de ganho unitário ou seguidor de tensão (SEDRA; SMITH, 2000).

Uma característica importante da placa eletrônica desenvolvida é que ela é a responsável por energizar a câmara de ionização com 150 V. Para isso, a placa possui duas entradas de 12 V, que a energiza, um conversor DC-DC como fonte de alta tensão para a câmara, que será explicado na seção seguinte (3.1.1), e, por fim, um potenciômetro de precisão para regular a alta tensão. A Figura 14 mostra a placa eletrônica desenvolvida para o trabalho com a caixa metálica que a protege aberta.

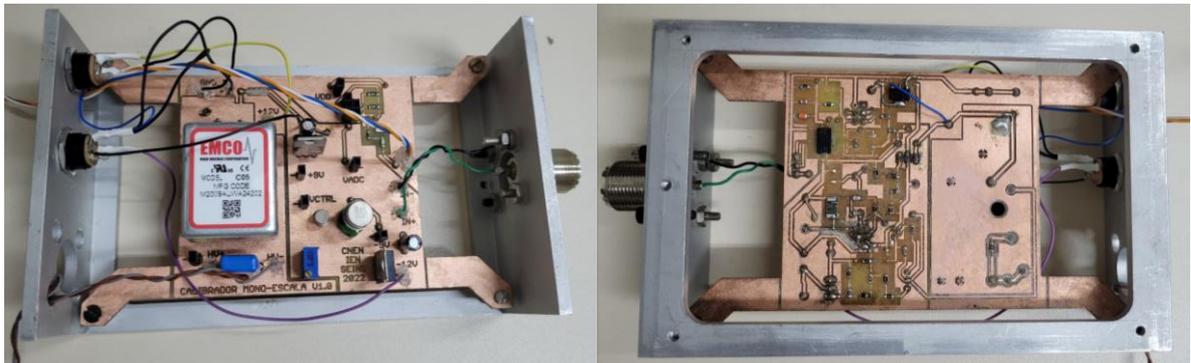


Figura 14: Placa eletrônica desenvolvida para o trabalho, vistas superior e inferior. À esquerda pode-se observar a fonte de alta tensão, e à direita o resistor de 1 GΩ utilizado, bem como o microprocessador integrado ao circuito.

### 3.1.1 Fonte de alta tensão

Inicialmente, no trabalho feito em protoboard, a fonte de alta tensão que energizava a câmara era um calibrador de alto desempenho, FLUKE modelo 5520A. Com objetivo de tornar o projeto mais portátil foram feitos testes com outras fontes de alta tensão, agora conversores DC-DC (*Direct Current*, em português corrente contínua). Foram utilizadas duas fontes de 12V, que podem ser conectadas em qualquer tomada de 110V, para alimentar o conversor, que tem a capacidade de converter essa baixa tensão de entrada em alta tensão de saída. A Figura 15 mostra uma comparação em tamanho real entre o calibrador usado inicialmente e os dois conversores usados para teste.



Figura 15: Comparação entre as três fontes de alta tensão usadas durante o trabalho. Calibrador de alto desempenho FLUKE 5520A, e conversores DC-DC EMCO modelos: A05P-5 (esquerda) e C05 (direita).

Com o objetivo de comparar o desempenho de cada uma das fontes, foi iniciada a tomada de dados pelo computador com uma fonte radioativa dentro da câmara de ionização. Após deixar o equipamento em funcionamento por alguns minutos, foi então trocada a fonte de alta tensão que energiza a câmara e feito o mesmo procedimento até que todas as três fontes de alta tensão tivessem sido testadas. Foi observado experimentalmente uma variação de aproximadamente  $\pm 3$  pA para a menor fonte (A05P-5), e  $\pm 1$  pA para a C05. Também pode-se visualizar a pequena variação gerada pelo calibrador de alto desempenho, em torno de  $\pm 0,2$  pA. O gráfico de corrente por tempo obtido pode ser visto na Figura 16.

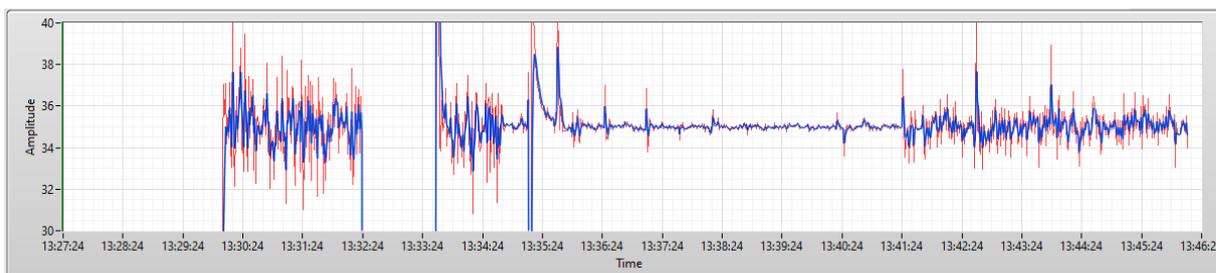


Figura 16: Gráfico usado para avaliação de desempenho do equipamento com diferentes fontes de alta tensão alimentando a câmara de ionização. Amplitude da corrente no eixo y (pA) e tempo no eixo x (hh:mm:ss). De 13:29 a 13:32 fonte A05P-5, de 13:33 a 13:35 fonte C05, de 13:36 a 13:41 FLUKE 5520A, e de 13:41 a 13:46 fonte C05 novamente.

Uma observação importante a ser feita é que essas variações analisadas para cada fonte variam em função da corrente, os valores citados foram os observados com uma fonte específica dentro da câmara que retornava um determinado valor de corrente. Após a retirada da fonte radioativa da câmara, a medida de corrente diminui, ficando em torno de zero, e a variação observada para cada fonte também diminui.

Considerando as três fontes disponíveis para a realização do projeto, e o objetivo do trabalho de medir baixas correntes, seria intuitivo escolher o calibrador de alto desempenho como fonte de alta tensão uma vez que ele apresentou a maior precisão. Porém, também é de extrema importância desenvolver um projeto que possua um baixo custo, e que possibilite a sua produção e comercialização. Logo, optou-se pela fonte que apresentou a segunda melhor precisão, o conversor DC-DC EMCO C05. Este modelo, além de possuir um tamanho menor, também apresenta um baixo custo quando comparado ao calibrador de alto desempenho,

### 3.2 Microcontrolador

Como explicado na seção 3.1, o sinal medido chega na placa eletrônica e passa por processos analógicos gerados pelo circuito desenvolvido. Após isso a leitura segue para o microcontrolador, que está integrado na placa. A Figura 17 mostra o diagrama de pinos do microcontrolador, o pino de entrada utilizado para o sinal foi o pino 8, que é a entrada analógica positiva referente ao conversor analógico digital do tipo sigma delta de 24 bits. O pino 9 é análogo ao 8, porém é entrada analógica negativa, que foi aterrada para fins de referência. Com isso, o sinal elétrico é convertido à uma palavra digital de 16 bits que é armazenada temporariamente na memória RAM.

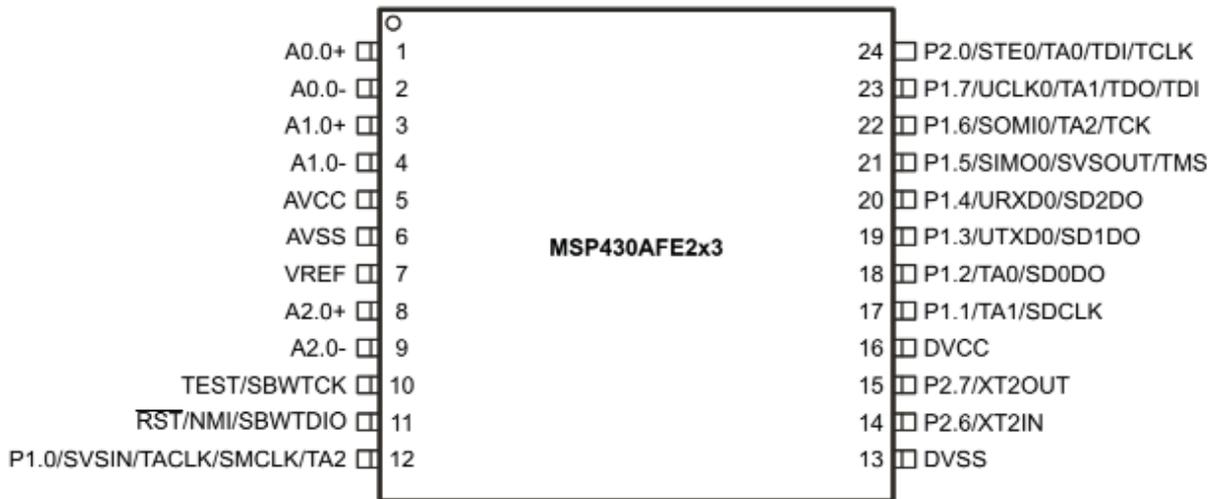


Figura 17: Diagrama de pinos do microcontrolador utilizado (TEXAS INSTRUMENTS, 2010).

Enquanto isso, na memória flash está armazenado o *firmware* (*software* embarcado) do microcontrolador, isto é, um programa que foi escrito e compilado em linguagem de programação C para controlar o equipamento. Para o desenvolvimento e implementação do programa foi usado o *software IAR Embedded Workbench for MSP430 7.21*. O programa que foi armazenado no microcontrolador é executado automaticamente toda vez que o chip é energizado. O programa é responsável por, dentre outras coisas, passar instruções para que a CPU faça a configuração inicial dos diversos periféricos do microcontrolador, leia os resultados de conversão do ADC armazenados na RAM e faça uma média, converta os valores de *float* para inteiro, e, por fim, guarde uma mensagem pronta para ser lida pela porta serial. A Figura 18 mostra o diagrama de blocos funcionais do microcontrolador utilizado no trabalho.

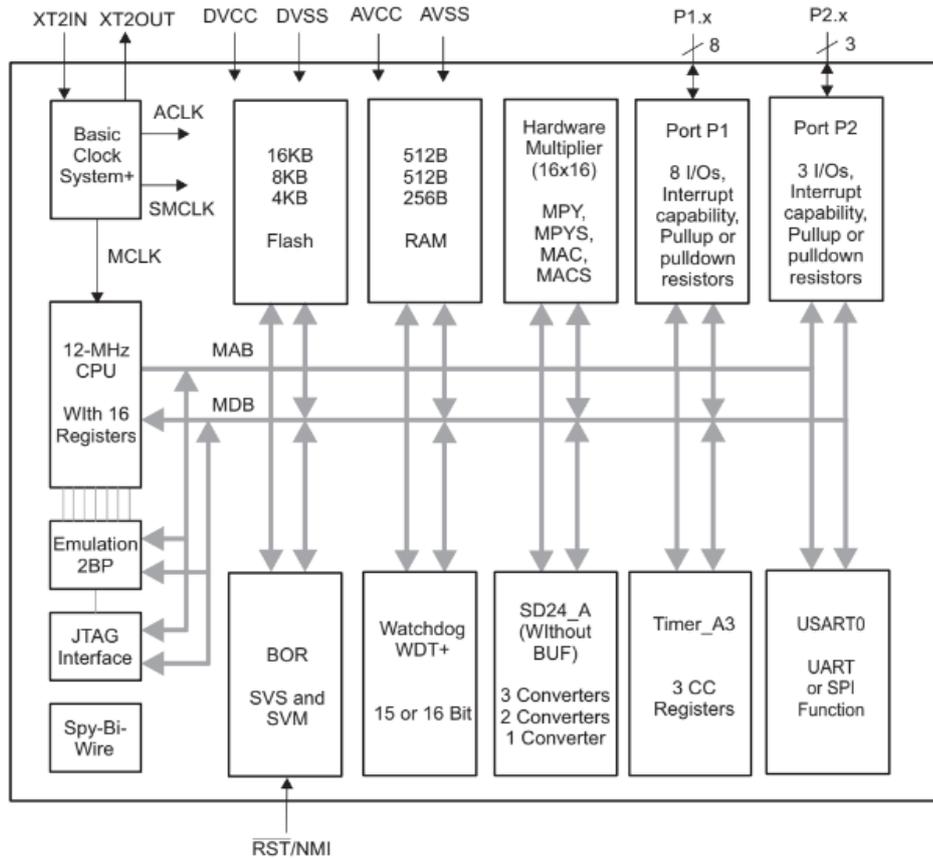


Figura 18: Diagrama de blocos funcionais do MSP430AFE253. Pode-se observar o conversor AD sigma delta (SD24\_A), as memórias RAM e flash, a CPU e a comunicação serial tipo UART. (TEXAS INSTRUMENTS, 2010)

O tipo de comunicação escolhida presente no MSP430 é a chamada interface periférica UART (*Universal asynchronous receive/transmit*, em português transmissor/receptor assíncrono universal). Ela permite conectar o microcontrolador com um sistema externo, no caso deste trabalho uma interface USB que é conectada a um computador onde roda um outro programa desenvolvido através de linguagem de programação gráfica, o LabView (será explicado na seção seguinte). Esse tipo de comunicação serial funciona através de dois tipos de pinos: RX e TX (pinos 20 e 19 respectivamente, Figura 17), o RX é responsável por receber uma mensagem do sistema externo conectado (LabView), e, ao receber, o TX transmite uma outra mensagem para esse sistema. No caso deste trabalho, a mensagem transmitida através do TX são os valores de corrente já trabalhados pelo microcontrolador. Foi implementado na placa eletrônica um led para piscar toda vez que uma mensagem é transmitida. Após isso o sinal segue por um conversor serial para USB, Figura 19, e finalmente chega até o computador.

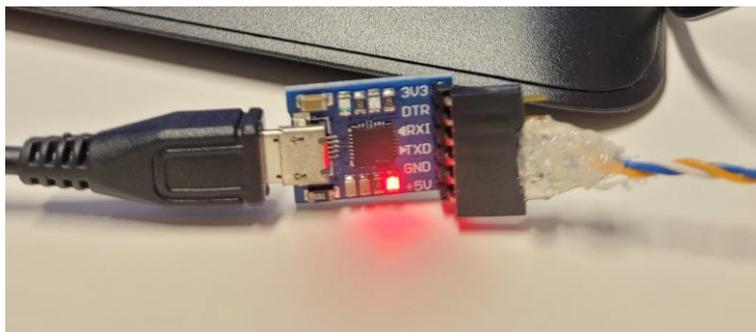


Figura 19: Conversor serial para USB. Entrada à direita com fios conectados nas portas RX, TX e GND, este último para referência, e saída à esquerda com porta micro USB.

### 3.3 Software

Por fim, o processamento final do sinal e a apresentação dos dados na tela do computador foram desenvolvidos com o *software* em linguagem de programação gráfica *LabVIEW*. O principal objetivo desta etapa foi desenvolver um programa que realize a leitura dos dados das medições do picoamperímetro transmitidos pela interface USB, além de converter as leituras de corrente em valores de atividade, e possibilitar criar correções em função da especificidade de cada radionuclídeo utilizado, da radiação de fundo, e qualquer outra variável que viesse a surgir durante o desenvolvimento do trabalho. A Figura 20 mostra o layout do programa desenvolvido já finalizado.

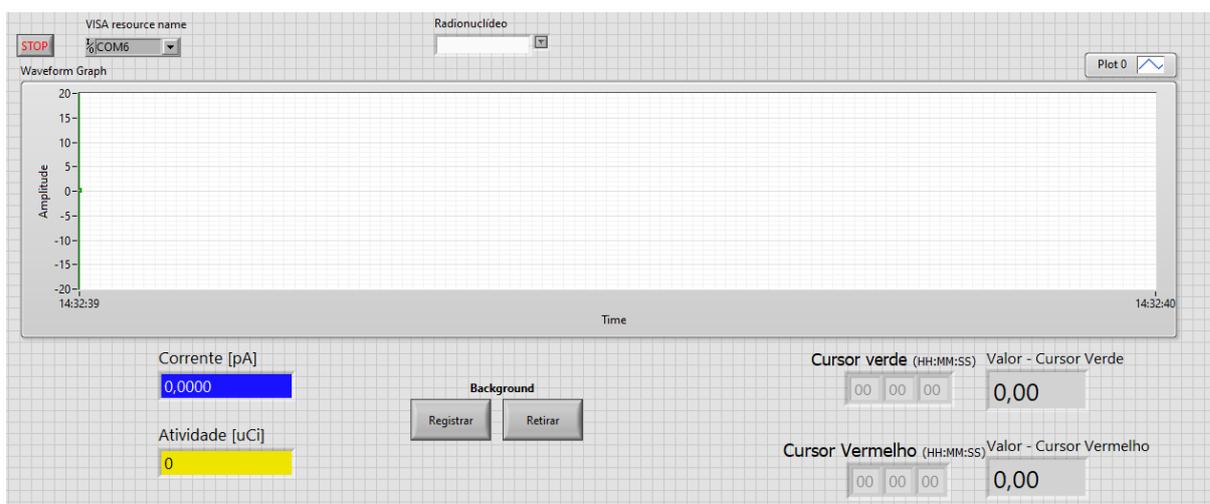


Figura 20: Interface final do programa desenvolvido.

O programa dispõe de um gráfico de amplitude da corrente de ionização medida por tempo e dois indicadores: na cor azul a corrente (em pico Ampère), e na cor amarela a atividade (em microCurie). Além disso, o programa também dispõe de um seletor de radionuclídeo, ajuste de corrente de background e 2 cursores, um verde e um vermelho, que podem fazer uma translação no eixo x e ver com precisão qual o valor lido em um tempo específico. O programa também apresenta um seletor de porta serial, graças a isso pode-se escolher a porta serial de interesse, gerada pelo conversor serial USB, de onde os dados serão lidos.

Como será visto na seção de resultados, o programa plota 2 gráficos simultaneamente, um na cor azul e um na cor vermelha. O na cor vermelha representa os dados brutos recebidos pelo microcontrolador, enquanto o azul representa os dados pós processados no próprio LabView. Por exemplo, ao clicar no botão “Registrar” referente ao “*Background*” o gráfico em vermelho segue sem nenhuma alteração enquanto o azul passa a mostrar os dados com os valores de radiação de fundo descontados. Intuitivamente, o indicador em azul nomeado “Corrente [pA]” mostra os valores do gráfico em azul. Um outro tipo de pós processamento feito no LavView foi a realização de média dos dados recebidos, assim também será possível perceber nas figuras posteriores que o gráfico vermelho se altera mais rapidamente que o gráfico azul.

O processo de calibração, que permite a conversão dos valores que estão em unidade de corrente para unidade de atividade, foi feito tomando como base o valor de calibração de cada fonte disponível corrigida para o dia da medição. Com isso o valor em corrente que está sendo lido, que é o mostrado no gráfico e no indicador azul, é multiplicado por esse fator, e assim, é gerado o valor em unidade de atividade.

### **3.4 Controle de qualidade do calibrador de dose**

Um dos principais motivos para se falar em controle de qualidade é a proteção radiológica. A nível internacional, a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), criada em 1957, é parte do sistema da ONU com objetivo inicial de promover o uso pacífico da energia nuclear do mundo, e posteriormente passou a atuar também no uso médico e industrial da radiação ionizante. As normas da IAEA não são leis, mas os países comprometem-se a seguir a partir de acordos. Os testes de controle de qualidade segundo a IAEA são divididos entre

Testes de aceitação e referência, e verificações operacionais (IAEA, 1991). O Quadro 1 cita os testes e suas respectivas periodicidades de realização.

Quadro 1: Cronograma de teste para calibrador de radionuclídeos pela IAEA (IAEA, 1991).

<b>Teste de aceitação e referência</b>	<b>Frequência</b>
Inspeção Física	1x (Instalação do equipamento)
Teste de Precisão e Acurácia	Trimestral
Teste de Linearidade da Resposta de Atividade	Trimestral
Teste de Resposta da Radiação de Fundo	Semanal
<b>Verificações Operacionais</b>	
Verificação de Reprodutibilidade	Diário
Verificação da Resposta da Radiação de Fundo	Diário

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é o órgão nacional responsável por exercer a regulação de todas as atividades com fontes nucleares, inclusive atividades de radioterapia com fontes e atividades de medicina nuclear. Para este trabalho, o grupo 3 denominado “Proteção Radiológica” é o de maior interesse entre os grupos de normas da CNEN, em específico a norma “CNEN NN 3.05 Requisitos de segurança e proteção radiológica para serviços de medicina nuclear”.

A norma 3.05 regula sobre os testes de controle de qualidade dos equipamentos de um SMN que precisam ser feitos, tal qual a periodicidade que devem ser realizados e os parâmetros de aceitação. Para o caso de um medidor de atividade, os testes são descritos no Quadro 2.

Quadro 2: Testes de controle de qualidade do medidor de atividade pela CNEN. (Adaptado de CNEN, 2013)

<b>Teste</b>	<b>Periodicidade</b>
Repetibilidade	Diário
Ajuste do zero	Diário
Radiação de fundo	Diário
Alta voltagem	Diário
Exatidão	Semestral
Precisão	Semestral
Linearidade	Anual
Teste de geometria	Anual

Os testes exigidos pela CNEN de maneira geral correspondem aos testes da IAEA, apesar de apresentarem algumas divergências quanto à frequência de realização. A inspeção física é o único teste que não é mencionado pela CNEN, porém ele é um teste de aceitação, ou seja, só é realizado na instalação do equipamento. Além disso, a CNEN exige alguns testes a mais que não estão na IAEA, são eles: ajuste do zero, alta voltagem e teste de geometria.

#### 3.4.1 Fontes radioativas

A IAEA recomenda fontes específicas tendo como base o teste que será feito, como pode ser visto no Quadro 3:

Quadro 3: Fontes recomendadas para cada teste de controle de qualidade (IAEA, 1991).

<b>Teste de aceitação e referência</b>	<b>Fontes recomendadas</b>
Inspeção Física	N/A
Teste de Precisão e Acurácia	Co-57; Ba-133; Cs-137; Co-60;
Teste de Linearidade da Resposta de Atividade	Tc-99m; In-113m;
Teste de Resposta da Radiação de Fundo	N/A
<b>Verificações Operacionais</b>	
Verificação de Reprodutibilidade	Ba-133; Cs-137; Ra-226; Atividade em torno de 3,7 MBq (100 µCi)
Verificação da Resposta da Radiação de Fundo	N/A

Já a CNEN determina que:

“O serviço de medicina nuclear (SMN) deve possuir, no mínimo, os seguintes materiais e instrumentos de medição da radiação:

- a. fontes radioativas de referência seladas com atividade mínima de 3,7 MBq, específicas para uso em controle de qualidade dos instrumentos de medição de radiação, nas geometrias e energias compatíveis com as práticas autorizadas, sendo as mais utilizadas:
  - i. Co-57;
  - ii. Ba-133; e
  - iii. Cs-137” (CNEN, 2013, p.9.)

Aqui encontra-se uma limitação do trabalho, essas regulamentações quanto a fontes com uma atividade mínima específica são para SMN. Como o projeto foi desenvolvido em um serviço de instrumentação não é uma obrigação para este serviço possuir essas fontes. Foi pensado em trazer essas fontes para a realização do trabalho, porém como esse processo de transporte de fontes é burocrático, seria necessário um tempo para que fosse ser realizado e, assim, ocasionaria em um atraso no trabalho. Foi pensado também em levar o equipamento para um SMN, porém fazendo isso também seriam necessários algumas burocracias. Por isso, foram utilizadas as fontes que o serviço de instrumentação dispunha, que são mostradas na Figura 21. Duas delas, coincidentemente, são as fontes de referência requisitadas pela CNEN, o Ba-133 e o Cs-137. Porém a terceira fonte disponível é o Co-60 que não é citada na norma, entretanto é

citada pela IAEA como uma fonte recomendada para o teste de precisão e acurácia. As fontes utilizadas também não apresentavam a atividade mínima de 100  $\mu\text{Ci}$  (3,7 MBq) estipulada na norma. A atividade prevista para os dias que foram usadas, que foram calculadas tendo como base a atividade inicial e a data de calibração, eram de 57,7  $\mu\text{Ci}$  (2,1 MBq) para o Cs-137; 46,4  $\mu\text{Ci}$  (1,7 MBq) para o Ba-133 e 3,4  $\mu\text{Ci}$  (0,1 MBq) para o Co-60.

Tabela 2: Fontes disponíveis para utilização e seus respectivos dados.

Fontes:	Co-60	Ba-133	Cs-137
Fabricante:	Capintec	Capintec	Capintec
Nº série:	S8123027-07	S8107014-06	S8117022-03
Data de calibração:	09/09/1996	20/11/1996	20/11/1996
Atividade inicial ( $\mu\text{Ci}$ ):	105,0	256,0	104,9
Meia vida (anos):	5,27	10,51	30,08
Atividade esperada ( $\mu\text{Ci}$ ):	3,39	46,37	57,74



Figura 21: Fontes disponíveis no Serviço de Instrumentação. Da esquerda para a direita: Cs-137, Co-60 e Ba-133.

### 3.4.2 Testes de CQ

Este trabalho abrangeu todos os testes exigidos pela norma 3.05 da CNEN com exceção dos testes anuais, que são os testes de linearidade e geometria. Ambos não foram possíveis de serem realizados devido a limitação das 3 fontes disponíveis para a realização do trabalho. Para o teste de linearidade seria necessária uma fonte de meia vida curta, enquanto as fontes disponíveis são fontes de referência para calibração, caracterizadas por possuírem uma meia vida longa. Para o teste de geometria seria necessária a manipulação da fonte e administração em diferentes recipientes, como seringas ou frascos, o que também impossibilita a realização uma vez que fontes de referência são fontes seladas, e, no setor de instrumentação, não há o equipamento de proteção radiológica necessário, além de não ser um local destinado para tais atividades.

#### 3.4.2.1 Ajuste do zero

O primeiro teste de controle de qualidade diário que era realizado no medidor de atividade era o ajuste do zero. Esse teste só é citado pela CNEN, e não são dados muitos detalhes, tudo que é falado é “Verificar e ajustar o “zero” do calibrador de dose, se o equipamento dispuser dessa função.” (CNEN, 2013, p. 26) Em medidores comerciais o fabricante disponibiliza uma opção “Auto Zero”, que ao ser selecionado pelo operador é mostrada uma leitura em milivolts (mV), porém novamente, não são dados muitos detalhes. Como a IAEA não fala sobre esse teste, foi difícil reunir informações sobre ele. Ao buscar informações no manual de calibradores de dose comerciais também pouco é falado, as instruções passadas são apenas em casos que apareçam mensagens de erro no leitor do equipamento.

Devido a observações experimentais que serão comentadas na seção 4.1, entende-se que o teste de ajuste de zero refere-se a redefinir na leitura o que é o zero. Uma eventual leitura que deveria ser zero pode não ser devido a ruídos que estão associados à eletrônica do equipamento.

Como esse teste foi o primeiro a ser realizado, ligou-se todo o equipamento (a câmara de ionização, o eletrômetro e o computador), e pelo LabView foi iniciada a leitura. Uma vez

que o sistema estava operacional, a câmara de ionização foi desconectada do eletrômetro e, então, foi anotada a medida lida que se refere somente ao circuito em funcionamento, com nenhum detector conectado. Esse valor foi descontado da leitura, juntamente com o valor da radiação de fundo como será explicado na seção seguinte, através do LabView, e o valor lido passou a ser zero.

Este é o único teste que a CNEN não apresenta na norma o limite de aceitação, e, uma vez que ele também não é citado pela IAEA, naturalmente também não é possível obter essa informação lá. Portanto, à nível de regulamentação, não existe um parâmetro para reprovar o aparelho neste teste, pelo contrário, a norma enfatiza que esse teste só deve ser feito se o aparelho possuir essa função, caso não possua o teste é ignorado.

#### 3.4.2.2 Radiação de fundo

O segundo teste diário realizado era o teste de radiação de fundo. Este teste tem por objetivo medir a radiação de fundo detectada pelo medidor de atividade. Como ele era realizado logo após o teste de ajuste do zero, era necessário conectar a câmara ao eletrômetro. Uma vez conectada, ela era energizada e já estava operacional.

A medição realizada pela câmara sem nenhum radionuclídeo selecionado no eletrômetro retorna um valor em unidade de corrente elétrica, porém a radiação de fundo deve ser expressa em unidade de atividade. Segundo a IAEA (1991, p. 28) deve-se “escolher as condições operacionais apropriadas para qualquer radionuclídeo que tenha uma baixa taxa de emissão de energia de fótons, ou seja, uma baixa constante de dose de raios gama (fator gama).” A recomendação da IAEA para a realização da medição de radiação de fundo é selecionar no calibrador as condições operacionais para as fontes de cromo (Cr-51) ou xenônio (Xe-133). Porém, neste projeto, só foram desenvolvidas as condições operacionais para as 3 fontes disponíveis para utilização, e, dentre elas, a que apresenta o menor fator gama é a de Cs-137. A Tabela 3 contém os valores do fator gama para os radionuclídeos sugeridos pela IAEA e os disponíveis para utilização neste trabalho, os valores são dados em unidades do SI como mSv/h a uma distância de 1 metro para uma fonte de 1 MBq (UNGER; TRUBEY, 1982).

Tabela 3: Constante de dose de raios gama específico para diferentes fontes (UNGER; TRUBEY, 1982).

Fonte	Constante de dose de raios gama específico ( $\Gamma$ ) [(mSv/h) /MBq]
Cr-51	$6,320 * 10^{-6}$
Xe-133	$2,783 * 10^{-5}$
Co-60	$3,697 * 10^{-4}$
Ba-133	$1,231 * 10^{-4}$
Cs-137	$1,017 * 10^{-4}$

Foi visto experimentalmente que o valor obtido no teste de ajuste de zero não se alterava ao conectar o detector ao eletrômetro, a única mudança que acontecia era um pequeno acréscimo no valor, este referente a radiação de fundo. Logo, a correção no LabView foi feita de uma vez só, descontando o valor total (ajuste de zero e radiação de fundo) da leitura, que passava a ser zero após a correção. Essa correção consiste em clicar no botão “Registrar” referente ao “Background”, ver Figura 20: Interface final do programa desenvolvido.

Quando era necessário ver somente o valor da radiação de fundo no visor (sem o ajuste de zero somado), o ajuste de zero era descontado previamente. Após anotado o valor da radiação de fundo, clicava-se no botão “Retirar”. Ao fazer isso o valor que havia sido descontado volta a estar presente, e, por fim, basta clicar mais uma vez no botão “Registrar” para descontar a radiação de fundo e o ajuste de zero juntos, deixando o equipamento pronto para realizar a leitura dos radionuclídeos.

Para este teste, a CNEN estipula um limite fixo de aceitação de  $\pm 20\%$  de desvio das leituras de radiação de fundo feitas, porém a IAEA afirma que limites específicos não podem ser aplicados para os resultados deste teste, e que um aumento na radiação de fundo de 20% ou mais poderia pedir uma investigação. Os motivos para um aumento poderiam ser uma contaminação radioativa dentro do instrumento, ou aumento da radiação ambiental de fontes locais.

### 3.4.2.3 Alta Voltagem

Em seguida, era realizado outro teste que é citado apenas pela CNEN, o teste de alta voltagem. Esse teste tem por objetivo verificar a tensão de entrada do calibrador de dose. Para a realização desse teste foi utilizado um multímetro digital (Keithley DMM6500 de 6 e ½ dígitos), como mostra a Figura 22, e cabos com ponta do tipo garra jacaré que foram presos nos terminais de entrada da câmara. Quando o valor mostrado no eletrômetro ficava estável, era anotada a medida.



Figura 22: Multímetro utilizado durante o teste de alta voltagem.

Neste teste é realizada apenas a leitura do resultado. No caso deste trabalho em específico o fabricante da câmara de ionização utilizada recomenda, no manual, que a tensão ideal para o seu funcionamento é de 150 V. Caso não fossem obtidos valores próximos a este, seria necessário fazer um ajuste no potenciômetro presente na placa eletrônica. Para este teste, a CNEN impõe um limite de aceitação de que as medidas devem estar dentro de um intervalo de  $\pm 1\%$  (um por cento).

### 3.4.2.4 Repetibilidade

Por fim, o último teste diário feito é o teste de repetibilidade, chamado de reprodutibilidade pela IAEA. Ele tem por objetivo verificar a constância na resposta do

equipamento para uma mesma fonte de referência no decorrer dos dias. Há uma discussão sobre qual nome seria mais apropriado para esse teste, acredita-se que o termo reprodutibilidade seja mais fiel uma vez que não há como garantir que existam exatamente as mesmas condições de medição. Sabendo que este teste é um teste diário, o profissional que faz o teste pode mudar de um dia para o outro, pois a norma estabelece que os testes que devem ser necessariamente realizados por um especialista em física médica são os que possuem periodicidade semestral ou maior (CNEN, 2013), e mesmo que fosse o caso é comum haver mais de 1 especialista em um SMN. Além disso, mesmo que minimamente, podem ocorrer variações de temperatura, de umidade, entre outras variáveis.

Para a realização do teste era seguido o seguinte passo-a-passo:

1. Selecionar, no LabView, a condição de operação do radionuclídeo que será usado.
2. Inserção da fonte no suporte da câmara
3. Fixar o suporte de maneira que o zero da régua da câmara coincida com os 10 centímetros da régua do suporte, como mostra a Figura 23.
4. Esperar alguns segundos para que a leitura estabilize.
5. Anotar o valor medido.
6. Remover a fonte da câmara e colocá-la na sua proteção de chumbo.



Figura 23: Ajuste do suporte dos radionuclídeos à fim de garantir que fiquem na mesma posição dentro da câmara para diferentes medições. O parâmetro utilizado foi coincidir o zero da régua da câmara com os 10 centímetros da régua do suporte.

O objetivo do teste é comparar as medidas de uma mesma fonte no decorrer dos dias, e, neste trabalho, isso foi feito com as 3 fontes disponíveis. Logo, todos os dias que este teste foi realizado ele foi repetido três vezes, uma vez para cada fonte. Este teste apresenta um limite de aceitação de  $\pm 5\%$ .

Os testes diários foram realizados na ordem que foram citados neste trabalho (ajuste de zero, radiação de fundo, alta voltagem, repetibilidade para as 3 fontes). A Figura 24 mostra como o gráfico de corrente por tempo do programa desenvolvido ficava logo após o término dos testes feitos. Como falado na seção 3.3 Software, o gráfico em vermelho é referente aos

dados brutos recebidos pelo microcontrolador, e o em azul aos dados pós processados no LabView.



Figura 24: Captura de tela do programa desenvolvido em LabView imediatamente após a finalização de todos os testes diários. Tempo referente às medições das fontes radioativas: de 11:04 a 11:05 Co-60, de 11:05 a 11:07 Ba-133, e de 11:07 a 11:09 Cs-137.

#### 3.4.2.5 Precisão e Exatidão

Os dois testes semestrais exigidos pela CNEN são os testes de precisão e exatidão, que tem por objetivo verificar a precisão e a exatidão nas medidas de um calibrador de dose através da utilização de fontes de referência. Os dois testes foram realizados em conjunto, como recomendado pela IAEA. Isso é possível ser feito pois os dois testes possuem exatamente a mesma execução, distinguindo-se apenas na análise dos resultados.

O teste de precisão é calculado através do erro relativo entre cada medida tomada e a média das medidas, com limite de aceitação de 5 %. Já o teste de exatidão é calculado entre a média das medidas e o valor certificado que consta na fonte corrigido pelo decaimento radioativo no dia da medida, com limite de aceitação de 10 %.

Para a execução desse teste foram seguidos os mesmos passos do teste diário de repetibilidade com o acréscimo de que cada fonte foi medida 10 vezes. Logo era feita a inserção da fonte no suporte da câmara, fixada na altura ideal, esperava-se estabilizar, anotava-se a medida, retirava-se a fonte do calibrador e aguardava-se alguns segundos para então repetir

todo o processo. Assim como o teste de repetibilidade, os testes de precisão e acurácia também foram feitos com todas as três fontes, uma de cada vez. A Figura 25 mostra como o gráfico de corrente por tempo ficava após a finalização da tomada dos 10 dados.

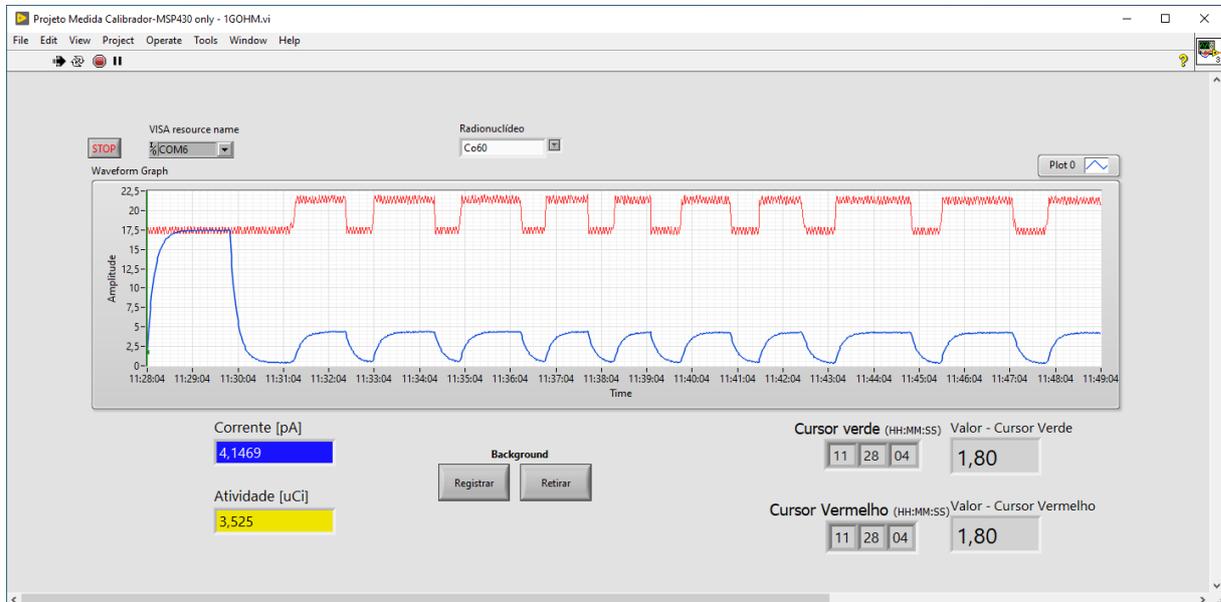


Figura 25: Captura de tela do programa desenvolvido em LabView durante a última medição do teste semestral para o Co-60.

### 3.5 Comparação com um calibrador de dose comercial

Uma vez realizados os testes de controle de qualidade, uma última análise foi feita com o objetivo de avaliar o desempenho do projeto desenvolvido. Uma comparação entre as leituras que estavam sendo feitas pelo sistema desenvolvido com as feitas por um calibrador comercial. Para a execução desta comparação foram utilizadas as mesmas fontes da seção 3.4.1, e foi utilizado um calibrador de dose da marca CAPINTEC modelo CRC-55tR, disponível no serviço do reator do IEN, como mostra a Figura 26.



Figura 26: Calibrador de dose CAPINTEC CRC-55tR.

A Mirion Technologies (Capintec) é uma empresa com sede em Nova Jersey, Estados Unidos, que há mais de 50 anos atua no desenvolvimento, fabricação e comercialização de instrumentos de medição e monitoramento de radiação. Possuem milhares de instrumentos em uso em todo o mundo, inclusive no Brasil em muitos hospitais, e em SMNs. O modelo de calibrador CRC-55tR possui capacidade de realizar leituras de radionuclídeos de até 250 GBq (6 Ci), com uma resolução máxima de 0,001 MBq (0,01  $\mu$ Ci) (MIRION TECHNOLOGIES (CAPINTEC), 2021).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Testes diários

Foram realizados um total de dez testes diários entre os dias 10 até 26 de outubro de 2022, a Tabela 4 mostra os dias e horário referente a cada medida.

Tabela 4: Data e hora da realização de cada medida dos testes diários.

<b>Medida</b>	<b>Data</b>	<b>Hora</b>
1	10/10/2022	11:50
2	11/10/2022	10:45
3	13/10/2022	11:17
4	14/10/2022	11:06
5	17/10/2022	09:42
6	18/10/2022	11:07
7	19/10/2022	10:43
8	20/10/2022	10:57
9	21/10/2022	10:52
10	26/10/2022	11:25

#### 4.1.1 Ajuste do zero

Como explicado na seção 3.4.2.1, o primeiro teste diário realizado era o teste de ajuste de zero. No primeiro dia da tomada de dados, ao energizar a eletrônica do projeto e iniciar a medição no LabView foi observado experimentalmente que, mesmo com a câmara de ionização desconectada, estava sendo lido um valor de corrente não desprezível, em torno de 20 pA. Esse valor que estava sendo lido deveria ser zero uma vez que o detector não estava ligado. Apesar de ser um valor de corrente aparentemente baixo, como o objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema para medidas de baixas correntes em calibradores de dose, esse valor é significativo.

Sabendo que a resistência presente no circuito é em torno de  $1\text{ G}\Omega$  pode-se fazer a conversão dos valores lidos para voltagem através da primeira lei de Ohm:

$$V = r * i \quad (4.1)$$

Logo, foi obtido um valor em torno de 20 mV. Esse valor então foi tomado como primeiro resultado para o teste diário de controle de qualidade de ajuste de zero, onde os valores correspondem a ruídos gerados pela própria eletrônica montada, sem qualquer participação do detector em si. Os demais valores estão representados na Tabela 5.

Tabela 5: Valores obtidos para o teste de ajuste de zero.

Medida	Ajuste de zero (mV)
1	$20,3 \pm 0,2$
2	$17,3 \pm 0,2$
3	$8,7 \pm 0,1$
4	$2,58 \pm 0,05$
5	$2,70 \pm 0,05$
6	$2,33 \pm 0,05$
7	$1,68 \pm 0,05$
8	$1,02 \pm 0,05$
9	$1,45 \pm 0,05$
10	$1,32 \pm 0,05$

Ao analisar os resultados dos dias posteriores pode-se perceber uma forte tendência de queda, intensificada nas primeiras medidas, e uma aparente tendência de estabilização em torno de 1 mV. Acredita-se que isso possa ter sido influenciado pelo fato de que o dia de realização do primeiro teste foi o dia em que todo o projeto foi ligado “do zero”. A partir disso, todo equipamento permaneceu ligado e, assim, ocorreu uma aparente diminuição e estabilização dos ruídos eletrônicos.

Como falando anteriormente, este teste não possui limites de aceitação impostos pela CNEN ou pela IAEA. O único parâmetro para comparação que foi encontrado durante as pesquisas para a realização deste trabalho foi o disponível nos manuais de calibradores de dose comerciais. Nos calibradores de dose da empresa CAPINTEC este teste aparece com o nome de “Auto Zero” e permite que o operador do aparelho o execute apenas clicando sobre essa opção. Após aguardar alguns segundos é mostrado o valor em milivolts. O manual considera

um valor alto para o teste de ajuste de zero quando, ao se realizar o teste e comparar com o último teste feito, apresente uma variação de  $\pm 0.3$  mV. No manual também consta o caso de aparecer uma mensagem de erro dizendo que o valor medido está fora de alcance, mas não é citado qual o alcance do equipamento. Em qualquer um dos dois casos citados, é recomendado checar se não há nenhuma fonte por perto. Caso haja deve-se retirar as fontes e refazer o teste, e caso não haja ligar para o centro de serviço autorizado da empresa (MIRION TECHNOLOGIES (CAPINTEC), 2021)

Ao analisar as 10 medidas obtidas em função deste parâmetro disponível no manual de calibradores comerciais, tem-se que das 9 comparações com a medida anterior 7 foram considerados altos e 2 ficaram dentro de uma variação de  $\pm 0.3$  mV. As 2 medidas que ficaram dentro do limite são as medidas 5 e 10.

#### 4.1.2 Radiação de fundo

Abaixo encontra-se a Tabela 6 referente as medidas obtidas no teste de radiação de fundo. O valor em corrente refere-se ao que de fato estava sendo lido pelo equipamento, e o valor em atividade refere-se a leitura feita usando o seletor de radionuclídeo para o Cs-137, como explicado na seção 3.4.2.2, o desvio é referente a medida anterior.

Tabela 6: Valores obtidos para o teste de radiação de fundo.

Medida	Radiação de fundo (pA)	Radiação de fundo ( $\mu$ Ci)	Desvio (%)
1	$0,27 \pm 0,02$	$0,83 \pm 0,02$	
2	$0,29 \pm 0,02$	$0,89 \pm 0,02$	7,4
3	$0,26 \pm 0,02$	$0,80 \pm 0,02$	-10,3
4	$0,20 \pm 0,02$	$0,61 \pm 0,02$	-23,1
5	$0,24 \pm 0,02$	$0,74 \pm 0,02$	20,0
6	$0,22 \pm 0,02$	$0,67 \pm 0,02$	-8,3
7	$0,26 \pm 0,02$	$0,80 \pm 0,02$	18,2
8	$0,18 \pm 0,02$	$0,55 \pm 0,02$	-30,8
9	$0,24 \pm 0,02$	$0,74 \pm 0,02$	33,3
10	$0,23 \pm 0,02$	$0,71 \pm 0,02$	-4,2

Este teste apresenta um limite de aceitação de  $\pm 20\%$  de desvio pela CNEN, porém não é claro na norma em função de que é o desvio, se é em função da medida anterior (como no teste de ajuste de zero), em função da média das últimas medidas, ou um desvio padrão. Neste trabalho o desvio calculado para este teste foi o erro relativo entre a medida feita e a medida anterior. Das 10 medidas feitas foram calculados os 9 desvios, e destes, 6 medidas ficaram dentro do limite de aceitação de  $\pm 20\%$  enquanto 3 ficaram acima.

#### 4.1.3 Alta Voltagem

As medidas realizadas neste teste estão representadas na Tabela 7. Como falado, as medidas devem estar dentro de um intervalo de  $\pm 1\%$  (um por cento). Assim como no teste de radiação de fundo, no teste de alta voltagem também não é claro na norma com qual valor a medida deve ser comparada a fim de se obter essa variação percentual. Logo, para este teste foram calculados 2 desvios, que foram chamados de erro relativo, e erro relativo máximo.

Tabela 7: Valores obtidos para o teste de alta voltagem.

<b>Medida</b>	<b>Alta voltagem (V)</b>
1	149,97 $\pm$ 0,01
2	149,93 $\pm$ 0,01
3	149,93 $\pm$ 0,01
4	149,96 $\pm$ 0,01
5	149,95 $\pm$ 0,01
6	149,96 $\pm$ 0,01
7	149,96 $\pm$ 0,01
8	149,94 $\pm$ 0,01
9	149,95 $\pm$ 0,01
10	149,95 $\pm$ 0,01

A Tabela 8 apresenta os valores de média, máximo, mínimo, erro relativo e erro relativo máximo. O erro relativo foi calculado entre o valor máximo e a média (sendo assim o maior

desvio possível referente à média), enquanto o erro relativo máximo foi calculado entre o valor máximo e o valor mínimo (sendo assim o maior desvio possível referente à medida anterior).

Tabela 8: Análise das medidas obtidas no teste de alta voltagem.

<b>Média (V)</b>	<b>Valor Máximo (V)</b>	<b>Valor Mínimo (V)</b>	<b>Erro relativo (%)</b>	<b>Erro relativo máximo (%)</b>
149,95	149,97	149,93	0,007	0,03

Pode-se observar que, em ambos os casos, os erros relativos estão bem abaixo de  $\pm 1\%$ , logo estão dentro do que é pedido. Essa pequena variação de alta voltagem mostra uma grande eficiência da fonte de alta tensão escolhida.

#### 4.1.4 Repetibilidade

Para o teste de repetibilidade tanto a CNEN quanto a IAEA estipulam como limite de aceitação um desvio de  $\pm 5\%$  entre a leitura feita e o valor certificado que consta na fonte corrigido pelo decaimento radioativo no dia da medida. Os valores certificados corrigidos para o dia da realização encontram-se no “ANEXO C. Atividade certificada corrigida para os dias de medidas”. Abaixo, a Tabela 9 contém as 10 leituras realizadas pelo equipamento para cada uma das fontes, bem como seus respectivos desvios, e a Tabela 10 apresenta um resumo com as maiores variações de desvio obtidas na Tabela 9.

Tabela 9: Valores obtidos para o teste de repetibilidade.

Medida	Co60		Ba133		Cs137	
	Medida ( $\mu\text{Ci}$ )	Desvio (%)	Medida ( $\mu\text{Ci}$ )	Desvio (%)	Medida ( $\mu\text{Ci}$ )	Desvio (%)
1	3,31 $\pm$ 0,05	-2,4	46,0 $\pm$ 0,2	-0,9	57,8 $\pm$ 0,2	0,1
2	3,39 $\pm$ 0,05	0,0	46,5 $\pm$ 0,2	0,4	58,1 $\pm$ 0,2	0,7
3	3,39 $\pm$ 0,05	0,1	46,4 $\pm$ 0,2	0,0	57,9 $\pm$ 0,2	0,3
4	3,43 $\pm$ 0,05	1,3	46,3 $\pm$ 0,2	0,0	58,4 $\pm$ 0,2	1,1
5	3,42 $\pm$ 0,05	1,1	46,5 $\pm$ 0,2	0,4	58,6 $\pm$ 0,2	1,6
6	3,45 $\pm$ 0,05	2,1	46,3 $\pm$ 0,2	0,0	58,5 $\pm$ 0,2	1,4
7	3,36 $\pm$ 0,05	-0,6	46,2 $\pm$ 0,2	-0,3	58,2 $\pm$ 0,2	0,9
8	3,39 $\pm$ 0,05	0,3	46,5 $\pm$ 0,2	0,5	58,7 $\pm$ 0,2	1,6
9	3,30 $\pm$ 0,05	-2,3	46,4 $\pm$ 0,2	0,3	58,6 $\pm$ 0,2	1,5
10	3,42 $\pm$ 0,05	1,4	46,1 $\pm$ 0,2	-0,2	58,1 $\pm$ 0,2	0,6

Tabela 10: Desvios máximo e mínimo obtidos no teste de repetibilidade para cada radionuclídeo.

Co60		Ba133		Cs137	
Desvio Máx.	Desvio Mín.	Desvio Máx.	Desvio Mín.	Desvio Máx.	Desvio Mín.
2,1 %	-2,4 %	0,5 %	-0,9 %	1,6 %	0,1 %

## 4.2 Testes Semestrais

As fórmulas abaixo descrevem os 2 testes semestrais: precisão e exatidão, respectivamente. (IAEA,1991).

$$P = \frac{100 * (x_i - \bar{x})}{\bar{x}} \quad (4.2)$$

$$E = \frac{100 * (\bar{x} - x_r)}{x_r} \quad (4.3)$$

Tanto a CNEN quanto a IAEA estabelecem os mesmos limites de aceitação para os testes semestrais, são eles 5% para o teste de precisão e 10% para o teste de exatidão. Os testes foram realizados no dia 11/10/2022, referente ao dia que foi tomada a medida 2 nos testes diários. As tabelas abaixo contêm as medidas obtidas, bem como os resultados calculados para cada uma das fontes de referência utilizadas para o teste.

### 1. Co-60:

Tabela 11: Valores obtidos no teste semestral para o Co-60.

Medida	Atividade ( $\mu\text{Ci}$ )	Precisão (%)
1	$3,29 \pm 0,05$	-2,1
2	$3,41 \pm 0,05$	1,5
3	$3,42 \pm 0,05$	1,8
4	$3,36 \pm 0,05$	0,0
5	$3,28 \pm 0,05$	-2,4
6	$3,38 \pm 0,05$	0,6
7	$3,32 \pm 0,05$	-1,2
8	$3,29 \pm 0,05$	-2,1
9	$3,33 \pm 0,05$	-0,9
10	$3,52 \pm 0,05$	4,8

Tabela 12: Análise dos resultados dos testes semestrais para o Co-60.

Atividade esperada ( $\mu\text{Ci}$ )	Média ( $\mu\text{Ci}$ )	Exatidão (%)	Precisão Máxima (%)	Precisão Mínima (%)
3,39	3,36	-0,9	4,8	-2,4

## 2. Ba-133:

Tabela 13: Valores obtidos no teste semestral para o Ba-133.

Medida	Atividade ( $\mu\text{Ci}$ )	Precisão (%)
1	45,2 $\pm$ 0,2	-0,9
2	45,5 $\pm$ 0,2	-0,2
3	46,1 $\pm$ 0,2	1,1
4	46,2 $\pm$ 0,2	1,3
5	45,4 $\pm$ 0,2	-0,5
6	46,0 $\pm$ 0,2	0,9
7	45,2 $\pm$ 0,2	-0,9
8	45,3 $\pm$ 0,2	-0,8
9	45,1 $\pm$ 0,2	-1,2
10	46,2 $\pm$ 0,2	1,3

Tabela 14: Análise dos resultados dos testes semestrais para o Ba-133.

Atividade esperada ( $\mu\text{Ci}$ )	Média ( $\mu\text{Ci}$ )	Exatidão (%)	Precisão Máxima (%)	Precisão Mínima (%)
46,4	45,6	-1,6	1,3	-1,2

## 3. Cs-137:

Tabela 15: Valores obtidos no teste semestral para o Cs-137.

Medida	Atividade ( $\mu\text{Ci}$ )	Precisão (%)
1	58,0 $\pm$ 0,2	0,1
2	58,0 $\pm$ 0,2	0,0
3	58,1 $\pm$ 0,2	0,3
4	58,5 $\pm$ 0,2	0,8
5	57,7 $\pm$ 0,2	-0,5
6	58,1 $\pm$ 0,2	0,1
7	57,7 $\pm$ 0,2	-0,5
8	57,5 $\pm$ 0,2	-0,8
9	58,1 $\pm$ 0,2	0,1
10	58,2 $\pm$ 0,2	0,4

Tabela 16: Análise dos resultados dos testes semestrais para o Cs-137.

Atividade esperada ( $\mu\text{Ci}$ )	Média ( $\mu\text{Ci}$ )	Exatidão (%)	Precisão Máxima (%)	Precisão Mínima (%)
57,7	58,0	0,4	0,8	-0,8

### 4.3 Comparação com modelo comercial

Antes de utilizar as fontes para as medições com o calibrador comercial, foi feito um teste diário, visto que seria a primeira utilização do calibrador naquele dia. Este modelo de calibrador possui em seu menu interativo uma opção chamada “Daily Test”, como mostra a Figura 27. Ao ser selecionada, o calibrador executa automaticamente todos os testes diários que não necessitam de fonte, são eles: o ajuste do zero, radiação de fundo, e alta voltagem. Os resultados dos testes podem ser visualizados na foto abaixo que foi tirada no momento que o aparelho terminou de realizá-los.

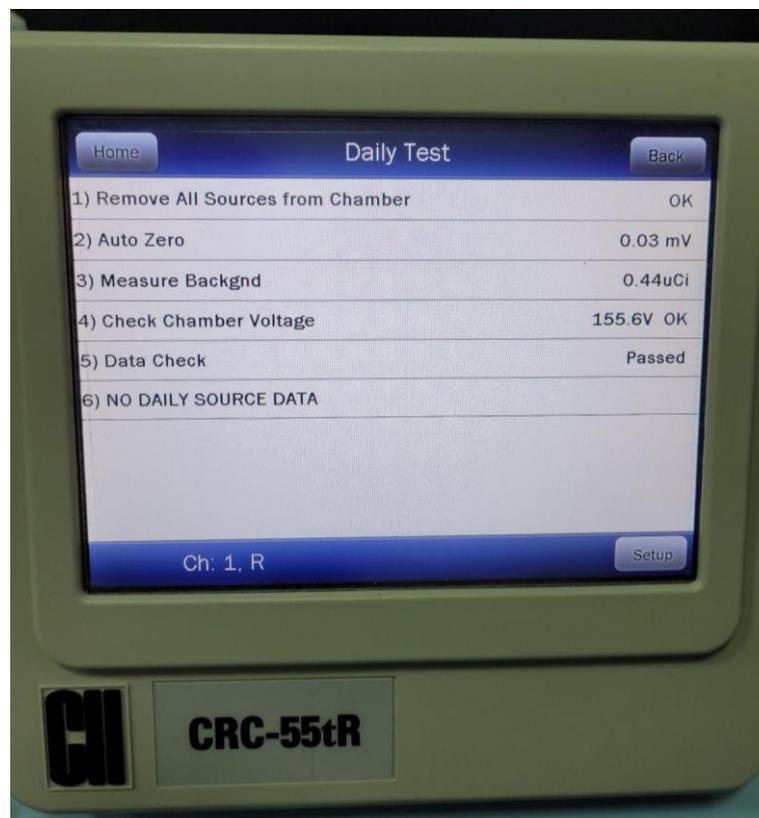


Figura 27: Testes diários do calibrador de dose comercial CRC-55tR.

Posteriormente foram feitas as medições com as mesmas fontes utilizadas em todo o trabalho, a fim de comparar a medida que o calibrador experimental estava fazendo. A Figura 28 mostra o exato momento de medição da fonte de Ba-133 realizada pelo calibrador. Os valores de atividade registrados pelo CRC-55tR estão na Tabela 17.

Tabela 17: Medidas realizadas pelo calibrador de dose comercial.

Fonte	Atividade ( $\mu\text{Ci}$ ):
Co-60	$3,38 \pm 0,01$
Ba-133	$44,1 \pm 0,1$
Cs-137	$56,2 \pm 0,1$



Figura 28: Calibrador de dose comercial CRC-55tR fazendo a leitura da fonte de Ba-133 inserida.

Uma primeira comparação que pode ser feita é o desvio, erro relativo, das medidas feitas pelo calibrador comercial com os valores certificados corrigidos pelo decaimento radioativo no dia da medida. Pode-se observar que as medidas obedecem ao limite de aceitação de 5% para o teste diário de repetibilidade. A Tabela 18 mostra uma comparação entre as medidas feitas pelo calibrador de dose comercial e o desenvolvido quanto ao valor de referência. Os valores

utilizados pelo calibrador desenvolvido são os anotados no teste de repetibilidade, referente à medida 10, que foi o mesmo dia que foi feita a tomada de dados com o calibrador comercial.

Tabela 18: Comparação da medida feita pelo calibrador de dose comercial e o desenvolvido quanto ao valor de referência.

Fonte	Valor de referência (uCi)	Valor medido pelo comercial (uCi)	Valor medido pelo desenvolvido (uCi)	Desvio comercial - referência (%)	Desvio desenvolvido - referência (%)
Co-60	3,37	3,38 ± 0,01	3,42 ± 0,05	<b>0,3</b>	<b>1,5</b>
Ba-133	46,24	44,1 ± 0,1	46,13 ± 0,2	<b>-4,6</b>	<b>-0,2</b>
Cs-137	57,69	56,2 ± 0,1	58,05 ± 0,2	<b>-2,6</b>	<b>0,6</b>

Para fazer uma comparação direta com o calibrador experimental podem se usar algumas medidas diferentes que foram obtidas ao decorrer deste trabalho. A Tabela 19 contém na primeira coluna, as 3 fontes utilizadas, e na segunda coluna, as medidas realizadas pelo calibrador comercial. As outras colunas contêm diferentes medidas realizadas pelo calibrador experimental e seus respectivos desvios em relação à medida do calibrador comercial. A terceira coluna contém os valores referentes a medida 10 do teste diário de repetibilidade, que foi realizada no dia 26/10/2022, (ver Tabela 4) essa data corresponde à mesma em que foram realizadas as medidas no calibrador comercial, ou seja, são medidas tomadas no mesmo dia nos 2 calibradores, em um curto intervalo de tempo. A quinta coluna também é referente ao teste diário de repetibilidade, porém as medidas utilizadas agora são as médias que foram obtidas no decorrer dos dias. Por fim, a última medida do calibrador experimental utilizada nesta comparação, referente à sétima coluna, é a média das 10 medições realizadas em sequência no teste semestral para cada uma das fontes.

Tabela 19: Comparação da medida realizada pelo calibrador comercial com: a medida do mesmo dia, a média das medidas diárias e a média das medidas do teste semestral do calibrador experimental.

Fontes	Capintec ( $\mu\text{Ci}$ )	Diária ( $\mu\text{Ci}$ )	Desvio (%)	Média diária ( $\mu\text{Ci}$ )	Desvio (%)	Média semestral ( $\mu\text{Ci}$ )	Desvio (%)
Co-60	3,38 $\pm$ 0,01	3,42 $\pm$ 0,05	<b>1,2</b>	3,39 $\pm$ 0,05	<b>0,3</b>	3,33 $\pm$ 0,05	<b>-1,5</b>
Ba-133	44,1 $\pm$ 0,1	46,13 $\pm$ 0,2	<b>4,6</b>	46,34 $\pm$ 0,2	<b>5,1</b>	45,6 $\pm$ 0,2	<b>3,4</b>
Cs-137	56,2 $\pm$ 0,1	58,05 $\pm$ 0,2	<b>3,3</b>	58,31 $\pm$ 0,2	<b>3,7</b>	58,07 $\pm$ 0,2	<b>3,3</b>

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 Conclusões

De maneira geral, o trabalho apresentou-se promissor ao serem adquiridos bons resultados na comparação com os limites de aceitação da CNEN e da IAEA. O projeto desenvolvido mostrou ser confiável ao fazer leituras de atividade dos radionuclídeos com uma variação inferior aos limites de aceitação tanto no decorrer dos dias, como evidenciado pelo teste de repetibilidade, quanto nas medições realizadas sequencialmente, como evidenciado pelo teste de precisão. Além disso apresentou uma boa exatidão ao comparar o valor experimental medido com a atividade certificada, que foi corrigida teoricamente para o dia de medição, como evidenciado pelo teste de exatidão.

Ao comparar o projeto desenvolvido com um calibrador amplamente comercializado, os resultados também foram satisfatórios. Todas as nove medidas utilizadas para comparação ficaram dentro de um intervalo de 5%, com exceção de uma cujo o valor do desvio foi 5,1%, o que mostra mais uma vez uma alta confiabilidade do sistema desenvolvido. Ao comparar a medida feita pelo calibrador comercial com o valor esperado da atividade certificada, o desvio ficou dentro do limite de aceitação, mas foi relativamente alto, sendo maior que o do calibrador desenvolvido. Em específico, o desvio do valor esperado para o Ba-133 no calibrador comercial foi de -4,6%, bem próximo do limite de  $\pm 5\%$ . E foi exatamente neste radionuclídeo que, ao comparar o calibrador comercial com o experimental, foi obtido uma medida excedendo 5%.

Uma limitação deste trabalho é que as fontes que estavam disponíveis para os testes eram antigas, e logo, apresentaram atividades muito baixas, com correntes da ordem de pico Ampère. Em SMN são utilizadas fontes em que a medição de corrente feita pelo calibrador de dose varia de pico a micro Ampère ( $10^{-12}$  a  $10^{-6}$  A), logo não foi possível avaliar o projeto em toda a faixa de utilização necessária.

O equipamento demonstrou ter um alto ruído eletrônico assim que é ligado, mas que, após um tempo, o ruído tende a diminuir e estabilizar, como mostrou o teste de ajuste de zero. Além disso, esse alto ruído no momento de inicialização é algo que pode ser facilmente corrigido via *software*, como foi feito, e, após isso, não foi perceptível nenhuma interferência na tomada de dados dos radionuclídeos.

A fonte de alta tensão escolhida para energizar a câmara de ionização apresentou ótimos resultados no teste de alta voltagem, tendo passado com larga folga, porém foi visto experimentalmente que ela gerava ruído na leitura realizada pela câmara (seção 3.1.1 “Fonte de alta tensão”). Esse ruído pode ter influenciado nas medições do teste de radiação de fundo, sendo este o único teste que o projeto desenvolvido não teve resultados dentro dos limites de aceitação impostos.

Outra possível causa para a falha do teste de radiação de fundo é a não existência do seletor de radionuclídeo recomendado para transformar a medida de corrente para atividade. Como falado na seção 3.4.2.2. “Radiação de fundo”, os seletores de radionuclídeo que foram criados para este projeto eram para os radionuclídeos que foram utilizados durante o desenvolvimento. Estes radionuclídeos apresentam um fator gama de uma ordem de grandeza de 10 a  $10^2$  maior que o recomendado para a realização do teste, podendo assim ter influenciado em uma leitura não muito confiável da radiação de fundo.

## **5.2 Perspectivas futuras**

No que tange o desenvolvimento continuado da aplicação, a utilização de fontes radioativas com uma atividade maior seria necessária, de maneira a cobrir toda a faixa de corrente que calibradores comerciais são recomendados para a utilização em SMN. Implantar algumas melhorias no eletrômetro também é importante, como dispor de um display e botões para que não dependa mais de um computador para sua utilização. Assim como, implantar uma maneira de ler a alta voltagem da câmara no próprio equipamento, para a realização do teste diário de alta voltagem sem a necessidade de um dispositivo externo. Uma vez que estas melhorias forem implementadas o equipamento passa a ser 100% funcional para um SMN, e, com isso, espera-se atrair investimentos públicos ou privados para uma possível produção e comercialização.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAMEEN, S., BDELFAH, A.M. et.al., **Assessment of Dose Calibrators Performance in Nuclear Medicine Department in Sudan**, Sch. Acad. J. Pharm., 5, 245-250, 2016.

ANDREO, Pedro et al. **Fundamentals of ionizing radiation dosimetry**. John Wiley & Sons, 2017.

ATTIX, F. H. **Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry**. John Wiley & Sons, 1986.

BÉ, M. M. et al. Monographie BIPM-5-table of radionuclides (Vol. 3–A= 3 to 244). **Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures**, v. 3, 2006.

BÉ, M. M. et al. Monographie BIPM-5-table of radionuclides (Vol. 8–A= 41 to 198). **Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures**, v. 8, 2016.

CHERRY, S. R.; SORENSON, J. A.; PHELPS, Michael E. **Physics in nuclear medicine e-Book**. Elsevier Health Sciences, 2012.

CNEN, NN-3.05. **Requisitos de Radioproteção e Segurança para Serviços de Medicina Nuclear**, 2013.

CNEN. Instalações Autorizadas. 2018. Disponível em <<http://antigo.cnen.gov.br/index.php/instalacoes-autorizadas-2>>. Acesso em: Outubro, 2022.

EISBERG R., RESNICK R., **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**, 43ª Tiragem. Elsevier, 1979.

GLASGOW, G. P.; DILLMAN, L. T. Specific  $\gamma$ -ray constant and exposure rate constant of  $^{192}\text{Ir}$ . **Medical Physics**, v. 6, n. 1, p. 49-52, 1979.

IAEA, TECDOC 602. **Quality Control of Nuclear Medicine Instruments**, 1991.

IBRAHIM, D. **Microcontroller based applied digital control**. John Wiley & Sons, 2006.

ICRU. International Commission on Radiation Units and Measurements. **Quantities and units in radiation Protection Dosimetry**. Report 51, 1993.

ICRU. International Commission on Radiation Units and Measurements. **Radiation Quantities and Units**. Report 19, 1971.

KNOLL, G. F. **Radiation detection and measurement**. John Wiley & Sons, 2010.

MIRION TECHNOLOGIES (CAPINTEC), Inc. CRC-55t (R/PET/W) Radioisotope Dose Calibrator OWNER'S MANUAL, 2021.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. **Física das radiações**. Oficina de Textos, 2016.

PODGORŠAK, E. B. et al. **Radiation physics for medical physicists**. Berlin: Springer, 2006.

SCHRADER H., **Activity Measurements with Ionization Chambers**, BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES, Monographie BIPM-4, 1997.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C.. **Microeletrônica**. Pearson Education do Brasil, 2000.

SMITH, D. S.; STABIN, M. G. Exposure rate constants and lead shielding values for over 1,100 radionuclides. **Health physics**, v. 102, n. 3, p. 271-291, 2012.

TAUHATA L., SALATI I., DI PRINZIO RE., DI PRINZIO R. A., **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**, 9º revisão. Instituto de Radioproteção e Dosimetria, 2013.

TEXAS INSTRUMENTS. MSP430AFE2x3, MSP430AFE2x2, MSP430AFE2x1 Mixed-Signal Microcontrollers, 2010. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/gpn/MSP430AFE253>>. Acesso em: Outubro 2021.

UNGER, L. M.; TRUBEY, D. K. **Specific gamma-ray dose constants for nuclides important to dosimetry and radiological assessment.** Oak Ridge National Lab., TN (USA), 1982.

ZIESSMAN, H. A.; O'MALLEY, J. P.; THRALL, James H. **Nuclear medicine: The Requisites in Radiology.** Elsevier Health Sciences, 2006.

## ANEXO A. PRESSUPOSTOS PARA DETERMINAÇÃO DA DOSE ABSORVIDA

Um importante conceito em física das radiações é o equilíbrio de radiação, pois permite relacionar a dose absorvida com outras grandezas. Existem três tipos de equilíbrio de radiação: RE (Equilíbrio de Radiação), CPE (Equilíbrio de Partículas carregadas) e TCPE (Equilíbrio Transiente de Partículas Carregadas). Para isso considera-se que um volume  $v$ , que contém um ponto de interesse  $P$ , esteja contido dentro de um volume maior  $V$ , de maneira que  $V$  seja grande o suficiente para que a distância máxima de penetração  $d$  de qualquer raio emitido (excluído neutrinos e raios secundários) seja menor que  $s$ , a menor distância de separação entre as fronteiras  $V$  e  $v$  (ATTIX, 1986).

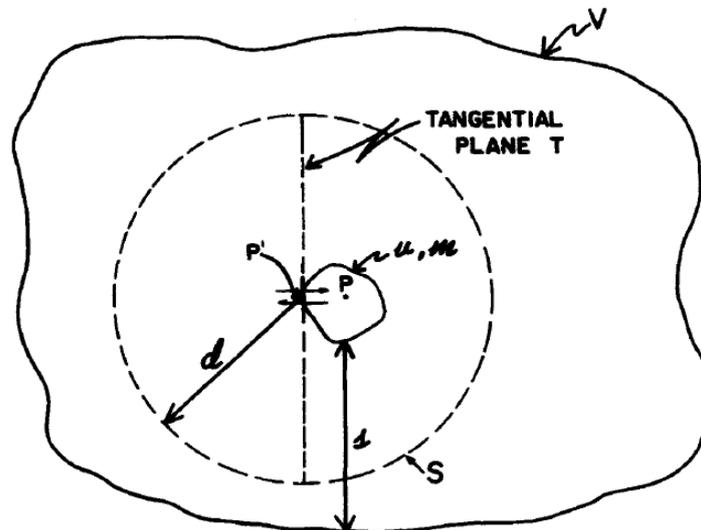


Figura 29: Representação da situação para ocorrência de equilíbrio de radiação (ATTIX, 1986).

Considerando o caso de CPE para radiação ionizante indireta de fontes externas, pode-se dizer que há CPE para o volume  $v$ , se as seguintes condições forem satisfeitas ao longo de  $V$ :

- A. A composição atômica do meio é homogênea;
- B. A densidade do meio é homogênea;
- C. Existe um campo uniforme de radiação indireta
- D. Nenhum campo elétrico ou magnético não homogêneo está presente.

Logo, pode-se associar a dose absorvida com kerma de colisão:

$$D_{cpe} = K_c = \Psi \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)$$

Quando o material é o ar, pode-se relacionar a dose absorvida D com a exposição X:

$$D_{ar}cpe = K_{c(ar)} = X * \left(\frac{W}{e}\right)_{ar}$$

Mesma fluência de energia em dois materiais diferentes:

$$\frac{D_A}{D_B}cpe = \frac{K_{c(A)}}{K_{c(B)}} = \frac{(\mu_{en}/\rho)_A}{(\mu_{en}/\rho)_B}$$

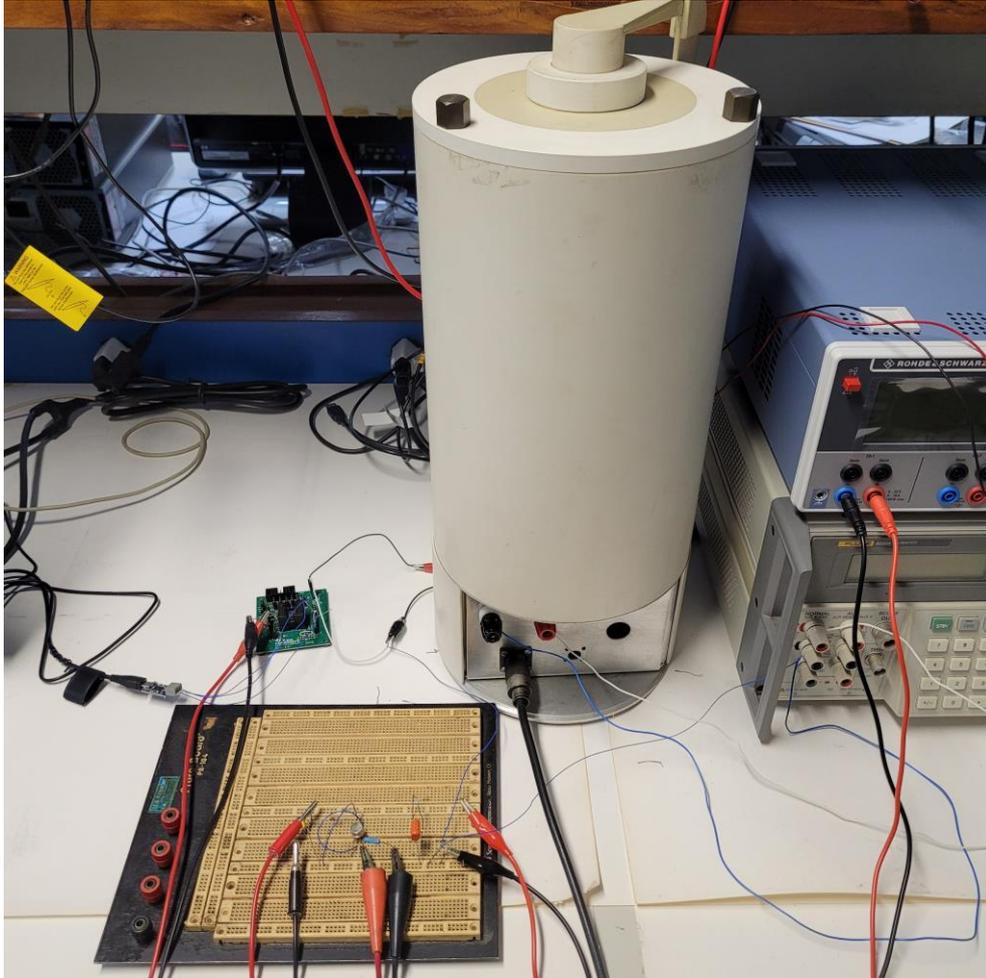
**ANEXO B. PROJETO INICIAL EM PROTOBOARD**

Figura 30: Projeto inicialmente desenvolvido utilizando protoboard para o circuito analógico.

## ANEXO C. ATIVIDADE CERTIFICADA CORRIGIDA PARA OS DIAS DE MEDIDAS

Fontes certificadas corrigidas pelos seus respectivos decaimentos radioativos nos dias de interesse para o trabalho.

Tabela 20: Atividade certificada corrigida para o dia da medida de cada radionuclídeo utilizado.

<b>Medida</b>	<b>Data</b>	<b>Co-60 (uCi)</b>	<b>Ba-133 (uCi)</b>	<b>Cs-137 (uCi)</b>
1	10/10/2022	3,3903	46,3754	57,7479
2	11/10/2022	3,3891	46,3671	57,7443
3	13/10/2022	3,3867	46,3503	57,7370
4	14/10/2022	3,3854	46,3419	57,7333
5	17/10/2022	3,3818	46,3168	57,7224
6	18/10/2022	3,3806	46,3085	57,7188
7	19/10/2022	3,3793	46,3001	57,7151
8	20/10/2022	3,3781	46,2917	57,7115
9	21/10/2022	3,3769	46,2834	57,7078
10	26/10/2022	3,3708	46,2416	57,6896