INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO MOVIMENTADOR AUTOMATIZADO
DE AMOSTRAS COM VISTA À APLICAÇÃO EM MEDIDAS DE
RADIOISÓTOPOS QUE POSSUEM CURTO TEMPO DE MEIA-VIDA**

MARCELLO SECCO

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

Orientador:
Dr. Frederico Antonio Genezini

São Paulo
2016

Aos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

À Mariana Soares e Tainara Mistrello pelas aulas de inglês durante o intervalo de almoço escolar, que contribuíram com a minha aprovação no exame de proficiência em línguas exigido pelo programa de Mestrado.

Ao Dr. Frederico Antonio Genezini pela orientação, ajuda com a revisão do texto e colaborações para o desenvolvimento do projeto de Mestrado.

Ao Centro Paula Souza, que é a Instituição de Ensino Profissionalizante aonde eu trabalho; Além de todo apoio, incentivo e compreensão que recebi durante todo esse período dos diretores: Ieda Guimarães e Eduardo D'Avello Ferrara, responsáveis pela minha unidade escolar ETEC Martin Luther King.

Aos colegas de trabalho: Ivete Moraes pelo auxílio com o *Abstract* e Marco Antônio de Sousa pela ajuda na criação das linhas de comando do microcontrolador programável; ao Dr. Franco Brancaccio por supervisionar a programação do sistema e auxílio com a linguagem de programação C++, e ao Roberto Carvalho por me ajudar a manipular e operar o motor de passo.

Ao Dr. André Luis Lapolli pela criação e desenvolvimento da interface do suporte automatizado em Visual Basic.

Ao Ms. Cláudio Domienikan pelo suporte e assistência técnica com os componentes eletroeletrônicos utilizados durante o projeto.

Aos professores Dr. Guilherme Zahn e Dr. Maurício Moralles pelas sugestões pertinentes à realização deste trabalho.

Ao Ms. Iberê Ribeiro por toda a ajuda, auxílio e apoio nas realizações das minhas tarefas acadêmicas, e pelas inúmeras vezes em que pude contar com a sua colaboração e contribuição.

Ao Thiago Martucci, Izabela Teles, Tatiane Nascimento e Amanda Noyori pela companhia, conselhos e por proporcionar diversos momentos de diversão e entretenimento durante minha permanência no IPEN.

À CNEN, órgão responsável pelo fomento e fornecimento da minha bolsa de estudos durante a realização do projeto de Mestrado.

“O sofrimento é passageiro, desistir é para sempre”

Lance Armstrong

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO MOVIMENTADOR AUTOMATIZADO DE AMOSTRAS COM VISTA À APLICAÇÃO EM MEDIDAS DE RADIOISÓTOPOS QUE POSSUEM CURTO TEMPO DE MEIA-VIDA

Marcello Secco

RESUMO

Medidas de espectroscopia gama de alta resolução têm diversas aplicações. Aplicações envolvendo medidas de radioisótopos de meia-vida curta podem apresentar problemas de baixa precisão nas contagens quando a fonte radioativa está distante do detector e de perda de acurácia por efeitos de tempo morto e empilhamento de pulsos em situação de altas taxas de contagens. Um modo de minimizar esses problemas é alterando a posição da fonte radioativa durante o processo de medição, aproximando-a do detector conforme sua atividade diminui e assim maximizando o número de contagens medidas.

Neste trabalho, foi desenvolvido o Movimentador de Amostras Radioativas Automatizado (MARA), um aparato de baixo custo, feito com materiais de baixo número atômico e leve, projetado e construído para auxiliar nas medidas de espectroscopia gama, capaz de controlar a distância entre a fonte e o detector, permitindo inclusive que ocorra alteração dessa distância durante o processo de medição. Por ser automatizado ele otimiza o tempo do operador, que tem total liberdade para criar suas rotinas de medidas no dispositivo, além de evitar que o mesmo tome uma parcela da dose radioativa. Foi também feita uma interface que permite controle do MARA e a programação do sistema de aquisição de dados. Foram realizados testes para otimização da operação do sistema MARA e foi verificada a segurança de operação do MARA, não apresentando nenhuma falha durante seus testes. Foi aplicado o teste de repetitividade, por meio de medições com uma fonte calibrada de ^{60}Co , e verificou-se que o sistema de movimentação de prateleiras automatizado reproduziu os resultados do sistema estático com confiabilidade de 95%.

DEVELOPMENT OF CONTROLLER OF ACQUISITION AND SAMPLE POSITIONER FOR ACTIVATION FOR USE IN MEASUREMENTS OF SHORT HALF-LIFE RADIOISOTOPES

Marcello Secco

ABSTRACT

High resolution gamma spectroscopy measurements have several applications. Those involving short half-life radioisotope measurements may present low precision problems when the radioactive source is far from detector end cup and in the very high activity situations also can present accuracy loss due to dead time and pile-up effects. A way to overcome these problems is changing the source detector distance as the activity is decreasing, and thereby maximizing the statistical counting.

In the present study, the Controller of Acquisition and Sample Positioner for Activation (CASPA) was developed. It is a low cost and weight device, made with low atomic number materials designed to assist gamma spectroscopy measurements, which is able to control the distance between the source and the detector, even allowing that there is a change of this distance during the measurement process. Because it is automated it optimizes the time of the operator, who has complete freedom to program their routine measurements in the device besides minimizing the radiation dose in the operator. An interface that allow the user control the CASPA system and to program the acquisition system was created. Tests aiming to optimize the operation of CASPA system were carried out and the safety of the CASPA operation was verified, it was not presented any failure during their tests. It was applied the repeatability tests by the acquisition ^{60}Co standard source and was found that the positioning of automated system has reproduced the results of static system with a 95% of confidence level .

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	6
3.1. O decaimento nuclear	6
3.1.1. Radiação α	10
3.1.2. Radiação β	10
3.1.3. Radiação γ	12
3.2. Interações em processos de decaimento.....	13
3.2.1. Raio X Característico.....	13
3.2.2. Elétron Auger	13
3.3. Interação da radiação com a matéria.....	14
3.3.1. Radiação eletromagnética.....	14
3.4. Detectores de Radiação.....	18
3.4.1. Detectores Semicondutores	19
3.4.2. Eficiência na detecção.....	23
3.5. O Teste de Repetitividade.....	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
4.1. O Sistema de Aquisição de espectroscopia gama.....	31
4.2. O Suporte Padrão para o posicionamento de amostras radioativas	32
4.3. Características dos radionuclídeos usados no estudo.....	34
4.4. A proposta do Movimentador de Amostras Radioativas Automatizado ...	37
5. CONFECÇÃO DO MOVIMENTADOR DE AMOSTRAS RADIOATIVAS AUTOMATIZADO - MARA	39
5.1. Desenvolvimento da peça com o software do Autodesk.....	39
5.2. Projeto do Cilindro	39
5.3. Etapas de desenvolvimento da Haste.....	40
5.4. Etapas de desenvolvimento da Prateleira.....	45

5.5. Confecção das peças na impressora 3D	47
5.6. Encaixe da peça plástica no motor de passo	47
5.7. Características do motor de passo	48
5.8. O microcontrolador Arduino	48
5.9. A interface em Visual Basic	50
6. TESTES EFETUADOS E RESULTADOS OBTIDOS	53
6.1. Seleção da velocidade de movimentação do MARA	53
6.2. Determinação do tempo de deslocamento da prateleira automatizada entre os andares pré-estabelecidos.....	55
6.3. Aplicação do Teste de Repetitividade	56
6.3.1. Medidas Utilizando o Suporte Fixo	58
6.3.2. Utilizando o MARA	64
7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	70
8. CONCLUSÕES	79
APÊNDICE A – EXPLICAÇÃO DETALHADA NO PROCESSO DE CONFECÇÃO DO MOVIMENTADOR DE AMOSTRAS RADIOATIVAS AUTOMATIZADO - MARA.....	81
APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO DESENVOLVIDA PARA O ARDUÍNO	102
APÊNDICE C – INSTRUÇÕES DE UTILIZAÇÃO E MANIPULAÇÃO DA INTERFACE PARA AQUISIÇÃO AUTOMATIZADA DE DADOS.....	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Fator da diferença crítica $f(n)$, com 95% de confiança, em função do número (n) de dados replicados.....	30
TABELA 6.1 – Teste de velocidade do motor de passo, com observação do tempo de deslocamento da prateleira, ruído emitido pelo motor e elevação na temperatura do C.I..	54
TABELA 6.2 – Tempo Médio gasto para a prateleira se deslocar entre os andares.	56
TABELA 6.3 – Dados obtidos na posição de Prateleira 0 com o suporte fixo.....	60
TABELA 6.4 – Dados obtidos na posição de Prateleira 1 com o suporte fixo.....	61
TABELA 6.5 – Dados obtidos na posição de Prateleira 2 com o suporte fixo.....	61
TABELA 6.6 – Dados obtidos na posição de Prateleira 3 com o suporte fixo.....	62
TABELA 6.7 – Resultado do índice de repetitividade (r), a quantidade de combinações de resultados na inequação que ficaram acima de (r) e da porcentagem dessas combinações discordantes de (r), nas prateleiras do suporte fixo.	63
TABELA 6.8 – Dados obtidos na posição de Prateleira 0 com o suporte automatizado.....	66
TABELA 6.9 – Dados obtidos na posição de Prateleira 1 com o suporte automatizado.....	67
TABELA 6.10 – Dados obtidos na posição de Prateleira 2 com o suporte automatizado.....	67
TABELA 6.11 – Dados obtidos na posição de Prateleira 3 com o suporte automatizado.....	68
TABELA 6.12 – Resultado do índice de repetitividade (r), a quantidade de combinações de resultados na inequação que ficaram acima de (r) e da porcentagem dessas combinações discordantes de (r), nas prateleiras do suporte automatizado.....	69
TABELA 7.1 – Dados obtidos com o suporte fixo.	70
TABELA 7.2 – Dados obtidos com o suporte automatizado.	70

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Diversas contagens, ao longo do tempo, de uma amostra de Ag^{108}	3
FIGURA 3.1 – Decaimento exponencial dos núcleos instáveis ao longo do tempo.	8
FIGURA 3.2 – Gráfico de energia e número atômico das regiões predominantes dos três tipos de interação da radiação com a matéria (KNOLL, 1999).....	15
FIGURA 3.3 – Modelo de bandas de energia para materiais isolantes (a), semicondutores (b) e condutores (c).....	19
FIGURA 3.4 – Esquema de posicionamento de uma fonte pontual (S) em relação ao detector (A).	27
FIGURA 3.5 – Esquema de posicionamento de uma fonte não pontual (S) em relação ao detector (A).....	28
FIGURA 4.1 – Tela do software Genie2000.....	31
FIGURA 4.2 – a) suporte fixo, b) prateleira de acrílico, c) prateleira encaixada no suporte fixo.....	32
FIGURA 4.3 – Marcação de posições no suporte fixo para o encaixe da prateleira.	34
FIGURA 4.4 – Esquema de decaimento do ^{60}Co	35
FIGURA 4.5 – Esquema de decaimento do $^{99\text{m}}\text{Tc}$	37
FIGURA 5.1 – a) vista superior do cilindro projetado, b) vista inferior do cilindro projetado	40
FIGURA 5.2 – Blindagem de chumbo contendo o detector de HPGe no sistema CANBERRA 06.	41
FIGURA 5.3 – Confeção da parte inferior da haste retangular.....	42
FIGURA 5.4 – Marcações circulares para encaixe de parafusos na peça retangular da haste.	43
FIGURA 5.5 – Acabamento cilíndrico, na parte central, em uma das laterais da haste.	44
FIGURA 5.6 – a) Vista traseira da haste finalizada, b) Vista frontal da haste finalizada.	45
FIGURA 5.7 – Marcação e recorte cilíndrico na prateleira, para posicionamento das amostras radioativas.	46
FIGURA 5.8 – Marcação circular na peça, para encaixe de parafusos.	47

FIGURA 5.9 – Movimentador de Amostras Radioativas Automatizado, confeccionado em impressora 3D acoplado ao motor de passo; a) vista lateral, b) vista superior, c) parcialmente frontal.	48
FIGURA 5.10 – (a) A placa Arduino UNO; (b) o <i>shield</i> usado.	49
FIGURA 5.11 – Esquema da visão geral do sistema automatizado.	50
FIGURA 6.1 – Esquema ilustrativo da metodologia utilizada tanto com o suporte fixo, quanto com o suporte automatizado (MARA).....	58
FIGURA 6.2 – Distâncias das prateleiras adotando a P0 como referência, distâncias das prateleiras adotando o detector como referência, ambos dimensionados com o suporte fixo.....	59
FIGURA 6.3 – Distâncias das prateleiras adotando a P0 como referência, distâncias das prateleiras adotando o detector como referência, ambos dimensionados com o suporte MARA.	65
FIGURA 7.1 – Média normalizada e o desvio padrão para os dados referentes à energia de 1173,240 (3) keV, obtidos com o auxílio do suporte fixo e o MARA na posição de prateleira 0.	72
FIGURA 7.2 – Média normalizada e o desvio padrão para os dados referentes à energia de 1173,240 (3) keV, obtidos com o auxílio do suporte fixo e o MARA na posição de prateleira 1.	73
FIGURA 7.3 – Média normalizada e o desvio padrão para os dados referentes à energia de 1173,240 (3) keV, obtidos com o auxílio do suporte fixo e o MARA na posição de prateleira 2.	73
FIGURA 7.4 – Média normalizada e o desvio padrão para os dados referentes à energia de 1173,240 (3) keV, obtidos com o auxílio do suporte fixo e o MARA na posição de prateleira 3.	74
FIGURA 7.5 – Média normalizada e o desvio padrão para os dados referentes à energia de 1332,508 (4) keV, obtidos com o auxílio do suporte fixo e o MARA na posição de prateleira 0.	74
FIGURA 7.6 – Média normalizada e o desvio padrão para os dados referentes à energia de 1332,508 (4) keV, obtidos com o auxílio do suporte fixo e o MARA na posição de prateleira 1.	75
FIGURA 7.7 – Média normalizada e o desvio padrão para os dados referentes à energia de 1332,508 (4) keV, obtidos com o auxílio do suporte fixo e o MARA na posição de prateleira 2.	75
FIGURA 7.8 – Média normalizada e o desvio padrão para os dados referentes à energia de 1332,508 (4) keV, obtidos com o auxílio do suporte fixo e o MARA na posição de prateleira 3.	76
FIGURA A.1 – Utilização da ferramenta “ <i>Extrude</i> ” para confecção da peça cilíndrica.	82

FIGURA A.2 – Recorte no centro da peça com uma circunferência de 65 mm de diâmetro.	82
FIGURA A.3 – Recorte da peça em 85 mm de profundidade com uma circunferência de 77 mm de diâmetro.	83
FIGURA A.4 – Parte superior da peça cilíndrica finalizada.	84
FIGURA A.5 – Parte inferior da peça cilíndrica finalizada.	84
FIGURA A.6 – Vista interior da peça cilíndrica finalizada.	85
FIGURA A.7 - Peça cilíndrica finalizada vista de perfil.	85
FIGURA A.8 – Cabine de chumbo contendo o detector de HPGe no sistema CANBERRA 06.	86
FIGURA A.9 – Confeção da parte central da haste retangular.	87
FIGURA A.10 – Confeção da parte superior da haste retangular.	88
FIGURA A.11 – Confeção da parte inferior da haste retangular.	88
FIGURA A.12 – Marcações circulares para encaixe de parafusos na peça retangular da haste.	89
FIGURA A.13 – Recorte cilíndrico das marcações efetuadas na haste.	90
FIGURA A.14 – Recorte sextavado na haste retangular, para encaixe das porcas metálicas.	91
FIGURA A.15 – Acabamento cilíndrico, na parte central, em uma das laterais da haste.	92
FIGURA A.16 – Vista traseira da haste finalizada.	92
FIGURA A.17 – Vista frontal da haste finalizada.	93
FIGURA A.18 – Ajuste e nivelamento de centros: cilindro e retângulo.	94
FIGURA A.19 – Ajuste para confecção da base da prateleira.	94
FIGURA A.20 – Aplicação da ferramenta “Extrude” na base da prateleira projetada.	95
FIGURA A.21 – Marcação retangular na peça.	96
FIGURA A.22 – Recorte retangular na peça.	96
FIGURA A.23 – Marcação e recorte cilíndrico na prateleira, para posicionamento das amostras radioativas.	97
FIGURA A.24 – Marcação circular na peça, para encaixe de parafusos.	98
FIGURA A.25 – Recorte cilíndrico na peça, para encaixe de parafusos.	98
FIGURA A.26 – Vista superior da prateleira finalizada.	99

FIGURA A.27 – Vista frontal da prateleira finalizada.	99
FIGURA A.28 – Vista traseira da prateleira finalizada.	100
FIGURA A.29 – Prateleira finalizada vista de perfil.....	100
FIGURA C.1 – Janelas do <i>programming</i> : a) Janela Principal; b) Janela da Área de Trabalho; c) Janela com a Listagem do Processo de Medidas; d) Janela com Orientação para Inicialização; e) Janela de Detalhamento de Tempo e Temperatura.....	112
FIGURA C.2 – Seleção do diretório para execução do <i>programming</i>	113
FIGURA C.3 – Edição da programação da rotina de tarefas na janela (Detalhamento de Tempo e Temperatura) e roteiro do que foi programado na janela (Listagem do Processo de Medidas).	114
FIGURA C.4 – Janelas: a) Listagem do Processo de Medidas; b) programação.txt.	115
FIGURA C.5 – Instruções de inicialização da rotina de tarefas programada pelo usuário na aquisição de dados automatizado.	115

1. INTRODUÇÃO

Medidas de espectroscopia gama de alta resolução têm diversas aplicações. Em parte delas, quando a atividade medida é bastante alta ou mesmo quando não é tão alta, porém a fonte é posicionada muito próxima ao cristal detector, tem-se altas taxas de contagem e isso produz perda de acurácia e precisão.

São duas as principais fontes de perda de acurácia relacionadas com alta taxa de contagem: o tempo morto do sistema de espectroscopia gama e o empilhamento de pulsos. O erro provocado por esses efeitos pode se aproximar de 40% em um sistema com 1000 contagens por segundo (CPS) (HOUTERSMANS et al., 1983). O tempo morto é originado em todos os componentes do sistema: o detector, o pré-amplificador, o amplificador e o multicanal. O detector não é o maior responsável pelo tempo morto, uma vez que o tempo típico de coleção de carga é menor que centenas de ns ao passo que a amplificação do pulso leva de 1 a 10 μ s. A contribuição do ADC (conversor analógico digital), o coração do multicanal, depende fortemente do tipo usado. No caso do tipo Wilkinson, o tempo de digitalização de um pulso é da ordem de 60 μ s enquanto que o modelo baseado em aproximações sucessivas é dez vezes menor.

Os multicanais fazem de modo satisfatório a correção do tempo morto por meio do aumento do tempo real. No entanto, o efeito de empilhamento não é tão fácil de ser corrigido. Neste efeito, dois pulsos não correlacionados (ou seja, não pertencentes ao mesmo núcleo) podem alimentar o amplificador dentro de um intervalo de tempo menor que o tempo de processamento do pulso e esses sinais serão somados de modo que dois eventos são subtraídos do fotopico original. Um meio para diminuir essa influência é utilizando a rejeição de empilhamento, quando o amplificador detecta a entrada de mais de um sinal durante seu processamento ele emite um aviso para o multicanal para que ele não considere seu sinal. Isso aumenta o tempo morto do sistema fazendo com que ele se comporte como um sistema de tempo morto paralisável e não evita todas as distorções (KNOLL, 1999).

Uma possível solução para os dois efeitos é a utilização de um pulsador ou uma fonte radioativa com meia-vida longa o suficiente para ser considerada um cronômetro. A simples razão das contagens com e sem a fonte causadora dos efeitos permite a correção. Neste caso, uma parcela do tempo morto e do

empilhamento será causada pelo pulso externo e um problema adicional surge quando a meia-vida da fonte medida é curta o bastante de modo que a contribuição do pulso externo torne-se mais relevante com o decorrer da medida. Alguns pulsadores podem variar a taxa com o tempo de modo a minimizar esse problema, porém a parcela de empilhamentos que ocorre no detector não pode ser corrigida com esse método. Um terceiro efeito em altas taxas de contagens que altera principalmente a precisão das medidas é que o detector de Ge tem tempo de coleção de carga da ordem de 10 ns, porém o tempo de dissipação do sinal no pré-amplificador é maior que 50 μ s, de modo que para um sistema convencional é extremamente difícil restaurar a linha de base com altas taxas de contagem e isso pode ocasionar a piora da resolução em até alguns keV.

Todos esses efeitos podem ser contornados utilizando fontes com atividades menores ou posicionando a fonte mais distante do cristal. Para que a precisão da contagem seja mantida pode-se aumentar o tempo de contagem. O problema maior surge quando a meia-vida do radionuclídeo é pequena e não permita contagens longas o bastante. Medidas de radioisótopos de meia-vida curta são bastante utilizadas em determinação de parâmetros nucleares, principalmente a própria meia-vida, alguns elementos podem ser medidos via ativação neutrônica com radioisótopos de meia-vida curta e alguns fatores de interferência, devido à fissão do urânio, também devem ser medidos nas mesmas condições. Nesse caso o início da contagem, obrigatoriamente, tem que ter atividade alta, ocasionando os efeitos acima. Na Figura 1.1 é exemplificado o caso de perda de contagem no início da medida quando nenhuma correção é efetuada. A melhor solução para medidas deste tipo é a aproximação da amostra com o decaimento da amostra.

FIGURA 1.1 - Diversas contagens, ao longo do tempo, de uma amostra de Ag^{108} .

Uma possível solução para isso pode ser a automatização do sistema de posicionamento da fonte radioativa com relação ao detector. Nos últimos anos, ocorreu uma grande popularização dos microcontroladores, tornando-os acessíveis e de fácil uso. Essa popularização se deveu basicamente à queda dos custos dos componentes usados e à compactação desses dispositivos e junto com ela veio a inserção de projetos de automatização robótica em sistemas que até então eram manualmente controlados.

Assim, o presente estudo tem como principal objetivo a construção de um dispositivo automático de movimentação de amostras usando microcontroladores programáveis, motor de passo e interface amigável ao usuário. A estrutura desta dissertação é dividida em nove seções contando com essa introdução.

Os objetivos específicos desta dissertação de mestrado são evidenciados na seção 2.

Na seção 3 são descritos os fundamentos teóricos, mostrando os tipos de decaimentos radioativos, interações em processos de decaimento e a interação da radiação eletromagnética com a matéria, o funcionamento dos detectores semicondutores e o teste de Repetitividade proposto pela ISO 5725-2.

Os materiais e métodos experimentais aplicados nesse trabalho para efetuar a aquisição de dados, juntamente com caracterização das fontes padrão utilizadas são descritas na seção de número 4.

Na seção 5 é relatado o processo de confecção do movimentador de amostras automatizado, a estrutura do motor de passo e o microcontrolador utilizado para operá-lo, e a interface amigável criada para fornecer comandos ao sistema automatizado criado e realizar o gerenciamento do software responsável pela aquisição de dados.

Os testes realizados e os resultados obtidos são descritos e apresentados na seção 6.

A análise dos resultados e a conclusão são apresentadas na seção 7 e seção 8, respectivamente. Na sequência são aditados os apêndices contendo o processo de confecção do movimentador de amostras automatizado, os códigos da programação utilizada no microcontrolador, e um compacto manual de instruções para operar o sistema usando uma interface.

Por último são informadas as referências bibliográficas consultadas nessa dissertação.

2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Projetar e construir um suporte que modifique o posicionamento de uma fonte radioativa, em relação ao detector de radiação, de forma automatizada, evitando a dedicação integral do tempo do operador durante a medida e que este tome uma parcela da dose emitida pela amostra ao trocá-la de posição no suporte;
- ii. Criar uma interface amigável ao usuário, que controle o movimentador de amostra, que se comunique com o sistema de aquisição de dados e que permita a obtenção de repetidas medidas para uma mesma amostra radioativa, que poderá se encontrar ou não, em posições distintas de prateleiras (cada prateleira é definida pelo operador, que atribui uma distância padrão entre a amostra e o detector de radiação);
- iii. Verificar a confiabilidade do sistema, aplicando o teste de repetitividade para averiguar por meio de comparação com o sistema atualmente utilizado, se o sistema de movimentação de amostras radioativas automatizado reproduz com 95% de confiabilidade a posição de cada uma das prateleiras pré-definidas na programação;

Esses objetivos específicos devem levar a um protótipo para aquisição de dados para amostras com um curto tempo de meia-vida, com a otimização dos dados estatísticos na desintegração do radioisótopo e minimizando o aparecimento de mais variáveis indesejadas nas medições como o processo de empilhamento e tempo morto do sistema.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão reunidos e apresentados temas e conceitos da Física Nuclear por meio de uma abordagem simples e resumida, visando estabelecer a relação entre os aspectos gerais da radiação e o conteúdo do presente trabalho, sendo eles:

- i. Processos de decaimento radioativo
- ii. Interações em processos de decaimento
- iii. Interação da radiação com a matéria
- iv. Detectores de radiação

3.1. O decaimento nuclear

Um núcleo atômico, sendo ele estável ou instável, apresenta algumas características e propriedades químicas como: número de massa atômica ou número de núcleons (A), número atômico ou número de prótons (Z) e número de nêutrons ($A-Z$). Para um dado elemento atômico (X), representamos as informações desse nuclídeo por A_ZX .

Dos mais de 3000 nuclídeos distintos que se tem conhecimento, apenas 278 são considerados estáveis¹. O processo pelo qual um núcleo instável ou um radionuclídeo passa para configurações mais estáveis é conhecido como decaimento radioativo, que pode acontecer com a emissão de radiação de partículas carregadas como elétrons rápidos ou partículas mais pesadas, com possível emissão subsequente de radiação sem carga como a radiação eletromagnética. A radiação emitida pelos radionuclídeos obedece à lei da desintegração radioativa, ilustrada pela equação (3.1).

¹ São considerados estáveis os nuclídeos que apresentam tempo de meia-vida superior a 5.10^{10} anos. O conceito de meia-vida ainda será explicado no decorrer da dissertação.

O valor dN corresponde ao número de núcleos que se transmutam após um intervalo de tempo dt , para uma amostra que apresente inicialmente N núcleos instáveis. A constante de tempo, representada por λ , representa a probabilidade de que um determinado núcleo se desexcite em uma unidade de tempo, enquanto que o sinal negativo da equação mostra que dN é intrinsecamente negativo pois N decresce com o tempo (EISBERG; RESNICK, 1979).

$$dN = -N \cdot \lambda \cdot dt \quad (3.1)$$

Integrando e resolvendo a equação (3.1), temos:

$$N_{(t)} = N_{(0)} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (3.2)$$

Sendo:

$N_{(0)}$ → Número de núcleos instáveis no instante inicial;

$N_{(t)}$ → Número de núcleos instáveis após um instante de tempo t ;

λ → Constante de desintegração [T^{-1}];

t → Tempo [T].

Na Figura 3.1 é ilustrada a expressão (3.2), que é conhecida como a lei do decaimento exponencial, mostrando a quantidade inicial de núcleos instáveis $N_{(0)}$ que vão se desexcitando com o passar do tempo. Pode-se observar que a quantidade de núcleos instáveis remanescente é sempre expressa em relação ao valor inicial de $N_{(0)}$, enquanto que o intervalo de tempo adotado segue padronizado com o tempo de meia-vida.

FIGURA 3.1 – Decaimento exponencial dos núcleos instáveis ao longo do tempo.

O tempo de meia-vida ($T_{1/2}$) é uma característica do decaimento radioativo e é definido como o intervalo de tempo necessário para que $N_{(0)}$ se reduza à metade $\frac{N_{(0)}}{2}$, e está relacionado com a constante de desintegração (λ), segundo a expressão (3.3),

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (3.3)$$

A atividade de um radionuclídeo é definida como sendo o número de desintegrações nucleares que ocorrem em certo intervalo de tempo, sendo a sua representação matemática muito semelhante à do decaimento radioativo, devido ao fato da atividade apresentar uma proporcionalidade com o número de núcleos instáveis presentes no elemento radioativo. A atividade de um radioisótopo é expressa pela equação (3.4), e o sinal de negativo indica que a atividade irá diminuir com o tempo, conforme:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N \quad (3.4)$$

A atividade (A) também pode ser expressa pela relação exponencial:

$$A_{(t)} = A_{(0)} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (3.5)$$

Sendo:

$A_{(0)}$ → Atividade do radionuclídeo no instante inicial de tempo;

$A_{(t)}$ → Atividade do radionuclídeo após um instante de tempo t ;

λ → Constante de desintegração;

t → Tempo.

A unidade para a Atividade no Sistema Internacional (SI) é o Bequerel (Bq), sendo que $1Bq$ equivale a $1dps$ (desintegração por segundo). Antigamente a unidade preferencialmente utilizada era o Curie (Ci) cuja conversão para Bq é: $1Ci = 3,7 \cdot 10^{10} dps = 3,7 \cdot 10^{10} Bq$ e atualmente, ainda que não seja a unidade adotada pelo SI, continua bastante usada.

Ao buscar configurações mais estáveis o radionuclídeo apresenta de forma padronizada o tipo de radiação que ele emite, conforme as suas características físico-químicas. Núcleos instáveis com excesso de prótons decaem na maior parte das vezes, pela emissão de partículas α (núcleo de 2He), partículas β^+ (pósitron) ou ainda pela Captura Eletrônica (Captura de elétron pelo núcleo); enquanto que em núcleos instáveis com excesso de nêutrons são observadas as emissões de nêutrons ou na grande maioria das vezes a emissão de partículas β^- (elétron). Nem sempre esse processo de transmutação leva a um estado de energia mínima e essa energia pode ser perdida a emissão de radiação γ ou pela transferência desta energia para elétrons do átomo (conversão interna). No processo de decaimento radioativo a carga e o número de núcleons sempre são conservados, entretanto o número de prótons ou de nêutrons podem sofrer alterações (EISBERG; RESNICK, 1979). Na sequência será apresentada uma sucinta explicação sobre os tipos de radiações mencionados nesse parágrafo.

3.1.1. Radiação α

A emissão da radiação α ocorre com frequência em núcleos que apresentam o número atômico elevado ($Z \geq 83$), tendo em vista que acima desse valor de prótons os núcleos atômicos já não são mais estáveis. Por isso o fenômeno acontece de forma espontânea, pois ao buscar estabilidade o núcleo pai instável decai em um núcleo filho, acompanhado de uma partícula α , sendo que essa carregará predominantemente a energia equivalente à diferença de massa oriunda no processo de decaimento, sob a forma de energia cinética (Q_α), enquanto que o núcleo filho sempre apresentará, em relação ao núcleo pai, duas unidades a menos de número atômico e quatro unidades de massa atômica menor. Portanto, a partícula α é composta da mesma estrutura que o núcleo atômico do átomo de hélio (${}^4_2\text{He}$) (KNOLL, 1999).

3.1.2. Radiação β

A emissão da radiação beta é o mecanismo mais frequente de um núcleo efetuar o seu decaimento, e acontece quando um núcleo atômico apresenta números excedentes de prótons ou nêutrons. Dependendo do tipo de partícula em excesso no núcleo, acontecerá a emissão de um elétron (β^-), emissão de um pósitron (β^+), ou captura eletrônica (KNOLL, 1999).

Dcaimento β^-

A desintegração β^- ocorre nos núcleos instáveis que possuem excesso de nêutrons com relação à combinação de número de prótons e nêutrons na linha de estabilidade. Ao buscar estabilidade, um nêutron dentro do núcleo é convertido em um próton, uma partícula β^- (elétron) e um antineutrino ($\bar{\nu}$), sendo essas duas últimas expelidas do núcleo e carregando de forma compartilhada a maior parte da energia de desintegração do núcleo (Q_{β^-}), liberada durante o processo de decaimento.

Decaimento β^+

A desintegração β^+ ocorre nos núcleos instáveis que possuem excesso de prótons também com relação à combinação de número de prótons e nêutrons na linha de estabilidade. Ao buscar estabilidade, o núcleo converte o próton em um nêutron, uma partícula β^+ (pósitron) e um neutrino (ν), sendo essas duas últimas expelidas do núcleo e carregando de forma compartilhada a maior parte da energia de desintegração do núcleo (Q_{β^+}), liberada durante o processo de decaimento.

Esse decaimento ocorre somente quando a diferença entre as massas atômicas do núcleo pai e do núcleo filho for maior que 1,022 MeV. Logo, os radionuclídeos que estão perto da linha da estabilidade nuclear, acabam não decaindo por β^+ por não possuírem aquele valor mínimo de energia, e buscando atingir a estabilidade utilizam o processo de decaimento por captura eletrônica.

Captura Eletrônica (CE)

Assim como no processo de desintegração β^+ , a CE só acontece quando o número de prótons em relação ao de nêutrons no núcleo é excedente. Nesse processo, para que o próton seja convertido em um nêutron, o núcleo captura um dos elétrons do seu próprio átomo, sendo mais frequente a captura de elétrons da camada K, que estão mais próximos ao núcleo, entretanto, esse elétron capturado também pode ser oriundo de camadas mais externas, desde que pertencente ao orbital s. Esse elétron capturado é combinado com um próton, dando origem a um nêutron e emitindo um neutrino monoenergético, que carrega toda a energia disponível no processo (Q_{CE}).

A Captura Eletrônica é distinguível do decaimento β^+ pela emissão de um Raio-X característico ou elétron Auger, provenientes da vacância criada após o elétron ser absorvido pelo núcleo, enquanto que o decaimento β^+ se diferencia pela emissão de um pósitron, que irá se aniquilar ao interagir com um elétron emitindo fótons característicos de 511 keV.

3.1.3. Radiação γ

Quando um núcleo instável se transmuta pelo decaimento α ou β , muitas vezes o núcleo filho gerado ainda pode se encontrar com energia em excesso. Entretanto, quando esse núcleo ainda excitado efetua a sua transição para energias mais baixas pode ocorrer a emissão de fótons de radiação eletromagnética, conhecidos com raios γ . Cada fóton carrega um valor de energia bem definido e corresponde à diferença entre o nível mais energético e o nível menos energético. Em cada desintegração pode ocorrer a emissão de apenas um, ou ainda a emissão de vários raios γ .

A equação nuclear (3.10) representa o decaimento gama:

Sendo o núcleo no estado excitado representado por ${}^A_ZX^*$ e após atingir a estabilidade ele fica A_ZX , enquanto que a energia do decaimento (Q_γ) é distribuída entre o fóton γ e a energia cinética de recuo do núcleo produto.

Conversão Interna

Pode ocorrer como uma alternativa ao processo de desintegração por radiação γ em que o núcleo ao se desexcitar, transfere a energia em excesso para um elétron atômico, fazendo com que este seja ejetado do átomo. Essa energia de desexcitação é transmitida à eletrosfera do átomo, e não diretamente ao elétron, sendo que esse fenômeno ocorre preferencialmente nas órbitas eletrônicas mais próximas ao núcleo, com maior frequência na camada K, mas podendo acontecer também nas camadas L e M.

Diferentemente do processo de captura eletrônica, em que o elétron é absorvido pelo núcleo, o elétron de conversão interna é expelido do átomo, com o

valor energético ($E_{\text{Elétron}}$) correspondente ao da transição do núcleo ($E_i - E_f$) subtraída da energia de ligação desse elétron (E_{lig}).

$$E_{\text{Elétron}} = (E_i - E_f) - E_{\text{lig}} \quad (3.11)$$

Após esse elétron ser emitido, uma vacância é gerada em sua órbita eletrônica, acarretando na emissão de um Raio X Característico ou de um elétron Auger.

3.2. Interações em processos de decaimento

Durante os processos de decaimento nuclear que foram descritos anteriormente, pode ocorrer ainda interações das radiações primárias com a eletrosfera do átomo, ocasionando a emissão de outros tipos de radiações.

3.2.1. Raio X Característico

Após ocorrer o processo de captura eletrônica ou conversão interna do elétron, uma lacuna é gerada em uma das órbitas eletrônicas do átomo, fazendo com que um elétron de uma camada mais externa e portanto mais energético preencha esse espaço vazio. Ao se deslocar para uma camada mais interna, esse elétron pode liberar sua energia excedente com a emissão de fótons com comprimentos de onda na faixa do raio X.

3.2.2. Elétron Auger

Este processo também é configurado como um efeito secundário, que ocorre quando um elétron de uma camada mais externa passa a ocupar a vacância deixada por um elétron que foi absorvido por captura eletrônica ou ejetado por conversão interna. Porém, quando esse elétron oriundo de uma camada superior no átomo passa a ocupar uma órbita mais interna, ao invés dele liberar essa energia com a emissão de um Raio X característico, ocorre a transferência de energia para outro elétron que é então expulso do átomo. A essa partícula ejetada dá-se o nome de Elétron Auger, cujo valor de energia cinética é (E_{Auger}) igual à diferença entre as camadas eletrônicas ($E_i - E_f$) subtraída de sua energia de ligação orbital (E_{lig}).

$$E_{Auger} = (E_i - E_f) - E_{lig} \quad (3.12)$$

3.3. Interação da radiação com a matéria

Independente da radiação possuir natureza corpuscular e/ou ondulatória, ela interage com a matéria de diferentes maneiras, variando de acordo com o tipo de radiação, composição do meio e energia da radiação (YOSHIMURA, 2009).

Nesse subtópico serão descritos os modos de interação da radiação eletromagnética com a matéria.

3.3.1. Radiação eletromagnética

Essa abordagem analisará apenas as interações com os fótons de alta energia, denominados de radiação ionizante, como os Raios X e as Radiações γ . A natureza da interação dos fótons com a matéria pode ser atômica/molecular, com a eletrosfera do átomo, ou pode ocorrer com o núcleo atômico acarretando em reações nucleares. Pelo fato do núcleo de um átomo ser consideravelmente menor que a sua eletrosfera, a probabilidade de ocorrer interações do tipo nuclear é menor em relação às interações atômica/molecular, que podem ser caracterizadas por processos de ionização e excitação atômica.

As interações do fóton com a matéria podem ser divididas em Efeito fotoelétrico, Efeito Compton, Produção de pares, Espalhamento Rayleigh e Reações fotonucleares, sendo que os três primeiros são os processos mais relevantes para a maior parte das aplicações.

De acordo com a energia da radiação eletromagnética, da densidade e número atômico do material ocorre um tipo predominante de interação desse fóton com a matéria como ilustrado na Figura 3.2, e que será discutido com mais detalhes na sequência.

FIGURA 3.2 – Gráfico de energia e número atômico das regiões predominantes dos três tipos de interação da radiação com a matéria (KNOLL, 1999).

Efeito Fotoelétrico

No Efeito fotoelétrico um fóton ao incidir em um material, transfere toda a sua energia a um elétron, desaparecendo e fazendo com que esse elétron também chamado de fotoelétron seja ejetado do átomo com um valor de energia ($E_{cinética}$), que correspondente a energia carregada pelo fóton incidente ($E_{fóton}$) subtraída da energia de ligação do fotoelétron (E_{lig}), associada com a camada eletrônica em que ele se encontrava.

$$E_{cinética} = E_{fóton} - E_{lig} \quad (3.13)$$

O efeito fotoelétrico, pela produção de uma vacância, é sucedido pela emissão de raios X característicos ou elétrons Auger. Para que ocorra a conservação de momento, o efeito fotoelétrico só acontece em elétrons ligados a um átomo, para que o núcleo absorva esse momento de recuo, por isso esse fenômeno jamais acontece em elétrons livres.

Como ilustrado na Figura 3.2, o efeito fotoelétrico ocorre de forma predominante para fótons que carreguem baixo valor de energia e interajam com materiais que apresentem átomos com elevado valor de número atômico, pois a

absorção fotoelétrica ($\sigma_{fotoelétrica}$) é proporcional ao número atômico (Z) e inversamente proporcional ao valor de energia do fóton (E), como informado em (3.14) (KNOLL, 1999).

$$\sigma_{fotoelétrica} \propto \frac{Z^5}{E^{3,5}} \quad (3.14)$$

Efeito Compton

No efeito Compton o fóton também interage com um elétron ejetando-o do átomo, entretanto nesse processo o fóton é espalhado sendo capaz de fornecer apenas uma parte de sua energia a esse elétron e o fóton espalhado tem energia menor que o fóton inicial. A energia do fóton incidente é repartida, sendo uma parte carregada pelo elétron ejetado e a outra parte permanece no fóton espalhado, que pode vir a interagir com outros elétrons presentes no meio.

Quando a energia do fóton incidente e o ângulo formado pelo fóton espalhado são conhecidos, é possível calcular a energia do fóton espalhado por meio da equação (3.15) (KNOLL, 1999).

$$\Delta\lambda = \lambda_e - \lambda_i = \lambda_c(1 - \cos\theta) = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta) \quad (3.15)$$

Onde:

$\lambda_e \rightarrow$ Comprimento de onda do fóton espalhado;

$\lambda_i \rightarrow$ Comprimento de onda do fóton inicial;

$\lambda_c \rightarrow$ Comprimento de onda Compton;

$\theta \rightarrow$ Ângulo de espalhamento do fóton em relação a sua trajetória inicial.

$h \rightarrow$ Constante de Planck

$m_e \rightarrow$ Massa do elétron

$c \rightarrow$ Velocidade da luz

Como ilustrado na Figura 3.2, o efeito Compton ocorre preferencialmente para fótons que apresentam um valor de energia intermediário, que interajam em materiais com baixo valor de número atômico.

Produção de Pares

Na produção de pares quando um fóton interage com o campo eletromagnético do núcleo. Sua energia é convertida em massa, produzindo o par: elétron - pósitron. Portanto, para que esse fenômeno ocorra a energia do fóton incidente tem ser superior a 1,022 MeV, que corresponde a soma das massas de repouso do elétron (511 keV) com a do pósitron (511 keV) (KNOLL, 1999). A energia do fóton que for excedente a 1,022 MeV é repartida em forma de energia cinética para as partículas criadas, conservando a energia total do sistema, como mostrado na equação (3.16).

$$E_{\gamma} = K_{\beta^{-}} + K_{\beta^{+}} + 2m_0c^2 \quad (3.16)$$

Sendo:

E_{γ} → Energia do fóton incidente;

$K_{\beta^{-}}$ → Energia cinética do elétron;

$K_{\beta^{+}}$ → Energia cinética do pósitron;

m_0c^2 → Energia de repouso, responsável pela criação da massa de repouso das partículas.

Nesse processo o fóton deve passar próximo a um campo eletromagnético muito intenso, ocorrendo também a conservação de momento, pois com a produção e emissão do par de partículas criado, o núcleo executa um pequeno recuo, ao ganhar energia cinética, sem que seja gerado quaisquer outros efeitos como excitação ou ionização.

Com a produção de pares, o pósitron produzido logo encontra um elétron em seu caminho e o processo oposto acontece, ou seja, desse encontro ocorre a

aniquilação das duas partículas e na maior parte das vezes duas radiações γ são criadas, carregando 511 keV de energia cada uma delas.

Assim como ilustrado na Figura 3.2, a produção de pares ocorre predominantemente para fótons que carreguem alta energia e que interajam com materiais que apresentem elevado número atômico, que são responsáveis por produzir campos nucleares mais intensos.

Espalhamento Rayleigh

Das interações do fóton com a matéria esse é o fenômeno que mais acontece, entretanto não há perda ou ganho de energia entre os envolvidos nesse processo.

No espalhamento Rayleigh, um fóton de baixa energia acaba interagindo com todo o átomo, e fazendo com que os elétrons desse átomo vibrem e emitam essa radiação em uma direção ligeiramente diferente, porém conservando todas as suas outras características físicas. Nessa interação o fóton não é absorvido, mas um feixe de fótons pode sofrer atenuação pois ocorre um pequeno desvio na trajetória do fóton incidente.

Reações Fotonucleares

Este tipo de interação do fóton com a matéria é pouco frequente pois além do fóton necessitar ter uma energia que seja alta o suficiente para promover a separação de um nucleon, ele precisa atingir o núcleo atômico que possui dimensões da ordem de 10^{-14} m. Quando essas duas condições são cumpridas, acontecem as reações fotonucleares, que constituem em um fóton energético interagindo com o núcleo atômico e dele saindo um ou mais nêutrons, prótons, partícula alfa, ou ainda em condições mais raras ser efetuado o processo de fissão do núcleo.

3.4. Detectores de Radiação

Os detectores de radiação auxiliam no processo de medição e caracterização das radiações emitidas por átomos que apresentem instabilidade nuclear. Para que as medidas sejam efetuadas, a radiação tem que interagir com

um material sensível a ela que esteja presente no detector. Além disso, o sistema deve apresentar também um aparato que processe esse sinal proveniente do detector e o converta numa grandeza capaz de informar a medida da radiação analisada.

Existem diversos e diferentes tipos de detectores, por exemplo: os detectores a gás, os cintiladores e os semicondutores e cada um deles é indicado para medir um determinado tipo de radiação. Na próxima seção, será abordada apenas a explicação referente a esse último tipo de detector, que foi utilizado na espectroscopia gama deste trabalho.

3.4.1. Detectores Semicondutores

Para compreender esse tipo de detector é necessário introduzir o conceito de bandas de energia em materiais isolantes, semicondutores e condutores, como é ilustrado na Figura 3.3. Nesse modelo, tem-se a banda de valência, que está associada aos níveis energéticos dos elétrons em relação às ligações moleculares do material, a banda proibida ou *band gap* (E_G), uma faixa de energia em que elétrons não são encontrados, e a banda de condução, caracterizada como uma região de energias possíveis para que um elétron livre possa transitar pelo material.

FIGURA 3.3 – Modelo de bandas de energia para materiais isolantes (a), semicondutores (b) e condutores (c).

No modelo ilustrado na Figura 3.3, os materiais isolantes (a) apresentam todos os elétrons ligados na banda de valência, formando as ligações covalentes.

Em virtude desse tipo de material apresentar como característica o valor elevado de energia para a banda proibida ($E_G > 5eV$), torna-se bastante difícil deslocar seus elétrons à banda de condução, por isso que praticamente não encontramos elétrons na banda de condução desse material (KNOLL, 1999). Ainda que seja fornecido, a esse material, um valor de energia alto o suficiente para quebrar a ligação covalente e liberar o elétron, ele não apresentará aspectos de condutividade, pois o elétron não conseguirá se movimentar com tanta facilidade por ele.

Os materiais condutores (c) não apresentam a banda proibida, por isso os elétrons estão livres para circularem pelo metal, o que torna muito simples o processo de levar o elétron da banda de valência para a banda de condução, já que uma está energeticamente ligada à outra. Existem vários modelos para explicar o comportamento dos materiais condutores, porém não existe um único modelo que seja capaz de explicar todos os fenômenos observados, cada modelo se encarrega de explicar uma parcela dos fenômenos que ocorrem nas ligações metálicas. Como esse material não tem relevância significativa para o presente trabalho, esses modelos não serão abordados.

Os semicondutores (b) possuem uma banda proibida intermediária, sendo que muitas vezes a própria energia térmica desses materiais expostos à temperatura ambiente já é capaz de quebrar algumas ligações covalentes e deslocar o elétron da banda de valência para a banda de condução. Os semicondutores apresentam condutividade com uma ordem de grandeza bem menor quando comparado aos metais, devido ao número reduzido de portadores de carga (elétrons) presentes nesse material e também por apresentar dificuldades com a sua locomoção.

Quando aplicada uma diferença de potencial sobre o material semicondutor, os elétrons na banda de condução tendem a caminhar para o polo positivo, e o estado energético denominado lacuna fará trocas sucessivas (elétron-lacuna) com os átomos da rede cristalina em direção ao polo negativo. De fato é observado o deslocamento das lacunas, cargas positivas, enquanto que isso não é observado nos metais pois de forma quase que instantânea essa lacuna é preenchida por um elétron. Do ponto de vista eletrônico, os dois sinais (deslocamento de elétrons e lacunas) carregam a mesma informação, sendo de fundamental importância que o semicondutor seja cristalino, livre de imperfeições e impurezas, para que tanto os elétrons quanto as lacunas se desloquem por ele sem

ficar presa em armadilhas, o que ocasionaria a danificação do sinal elétrico correspondente a uma interação ocorrida.

Os materiais semicondutores são confeccionados predominantemente com Silício ou Germânio, por possibilitarem que seja atinja uma altíssima pureza em seu processo de obtenção, refletindo nesses materiais uma maior mobilidade dos portadores de carga por apresentarem um número reduzido de centros armadilhadores. O silício apresenta o valor energético de banda proibida não muito elevado, podendo gerar apenas um ruído eletrônico aceitável quando operado em temperatura ambiente, por isso ele é amplamente utilizado na indústria eletrônica. Já o germânio, que pode ser produzido com pureza superior ao silício, apresenta o valor energético de banda proibida ainda menor, fazendo com que o número de portadores de cargas livres se eleve com o aumento da temperatura, sendo esse um dos principais motivos por ele ter sido rejeitado pela indústria de componentes eletrônicos. Entretanto, quando um detector feito de germânio hiperpuro (HPGe) é operado à temperaturas criogênicas são evidenciadas excelentes características, como a produção de pouco ruído eletrônico e excepcional mobilidade dos portadores de carga livre na rede cristalina (KNOLL, 1999).

A temperatura é um fator de extrema importância para analisar o funcionamento dos semicondutores, pois além dessa radiação na faixa do infravermelho já apresentar energia suficiente para produzir os pares elétron-lacuna e aumentar a condutividade nesse tipo de material, ela também interfere na mobilidade dos portadores de carga. De modo geral, a mobilidade aumenta quando se reduz a temperatura aplicada em detectores de radiação com semicondutores.

Como já dito, à temperatura ambiente, o próprio meio já fornece energia (térmica) suficiente para que sejam produzidos pares elétron-lacuna em alguns semicondutores, o que propicia a quebra das ligações covalente e leva o elétron para a banda de condução. Quando a radiação eletromagnética que incide nesses materiais apresenta sua energia na faixa do raio-X ou superior a isso teremos as interações ocorrendo, predominantemente, por meio dos efeitos de absorção fotoelétrica, espalhamento Compton e produção de pares. Entretanto, quando ocorrem essas interações, as trocas de energia acontecem de forma indireta e a energia necessária para que um par elétron-lacuna seja produzido já não é mais o mesmo valor da energia de banda proibida, pois nessas condições a energia de

banda proibida (E_g) é sempre menor que a energia (ε) necessária para a produção dos pares elétron-lacuna.

Todos os elétrons da banda de condução e as lacunas na banda de valência em um semiconductor puro ou intrínseco não exposto a uma radiação ionizante são produzidos apenas por excitação térmica. Cada elétron ao ser excitado para a banda de condução produz uma lacuna na banda de valência. Para que esse efeito seja possível, é necessário que os materiais utilizados nestes detectores de radiação sejam dopados com impurezas específicas, para produzirem os materiais dopados que apresentarão excesso de cargas (elétrons ou lacunas).

Material Tipo P	→	Receptores de elétrons, dopado com impureza trivalente (3 elétrons na camada de valência)*.
Material Tipo N	→	Doadores de elétrons, dopado com impureza pentavalente (5 elétrons na camada de valência)*.

*Levando em consideração o silício e o germânio que são tetravalentes.

Como abordado anteriormente, a redução da temperatura nos semicondutores soluciona uma parte dos problemas encontrados nesses materiais, como a diminuição dos portadores de carga produzidos termicamente. Porém, quando se aplica tensão de polarização sobre os detectores temos como consequência a produção de corrente elétrica de valores elevados, capaz de mascarar qualquer sinal oriundo de uma radiação ionizante. Para solucionar esse problema é necessário aumentar a resistividade dos semicondutores utilizados em detectores de radiação, efetuando a junção dos materiais dopados tipo p com o material tipo n, produzindo a junção p-n.

Produzir uma junção p-n não consiste apenas em unir os dois tipos de materiais dopados, pois ainda que isso seja feito essa junção apresentaria inevitáveis separações e longínquas distâncias, do ponto de vista das dimensões atômicas da rede. A junção p-n é feita em um único cristal ao mudar suas características em cada um dos lados, por meio da introdução de impurezas. A região do material aonde se efetua a junção p-n, também conhecida como região de depleção, é “livre de cargas” pois naturalmente ocorre a neutralização dos

elétrons com as lacunas, e o campo elétrico ali produzido faz com que os elétrons criados próximos, ou até mesmo dentro da junção p-n, sejam direcionados para o lado do material tipo n. De forma similar, uma lacuna é direcionada para o lado do material tipo p (KNOLL, 1999).

Em um detector de silício, a densidade de portadores de carga na região de depleção é da ordem de 10^2 elétrons ou lacunas por cm^3 , enquanto que em um material de alta resistividade essa densidade chega a 10^{10} . Devido à baixa concentração de portadores de carga a corrente residual se torna baixa, o que permite a discriminação de cargas eventualmente produzidas nesse material por uma radiação ionizante.

A junção descrita, ainda que não receba a aplicação de uma tensão externa, já apresenta estrutura para funcionar como um detector de radiações ionizantes, porém com pouca eficiência pois o campo elétrico formado espontaneamente na junção é insuficiente para fazer com que as cargas produzidas, pela radiação ionizante que penetrou e interagiu com o material, movam-se rápidas o suficiente para que possam ser coletadas. Além de apresentar nessas condições uma região de depleção pequena e alta capacitância. Entretanto, quando aplicada tensão negativa no lado p da junção e tensão positiva no lado n, polarizando a junção p-n reversamente, os portadores minoritários de carga (lacunas do lado n, e elétrons do lado p) serão atraídos através da junção, fazendo surgir a corrente reversa do semiconductor. Por existir baixa concentração dos portadores de carga nessa região a corrente que atravessa a junção será muito baixa, fazendo com que o sinal gerado no detector, proveniente da radiação ionizante, não seja danificado.

3.4.2. Eficiência na detecção

Para que se obtenha, de forma precisa, o número de partículas emitidas por uma fonte radioativa, a partir do número de sinais registrados por um sistema de detecção é necessário que se conheça o valor acurado da eficiência de detecção desse sistema. Existem duas categorias para se referir à eficiência de detecção: a absoluta e a intrínseca (KNOLL, 1999). Sendo que a eficiência absoluta (ε_{abs}) é definida como:

$$\varepsilon_{abs} = \frac{N^{\circ} \text{ de pulsos registrados}}{N^{\circ} \text{ de radiação emitida pela fonte}} \quad (3.17)$$

Deve-se notar que essa eficiência é fortemente dependente da geometria de detecção e que quanto mais distante a fonte emissora estiver do detector menor será a eficiência de detecção do sistema. A eficiência que separa esta parte da geometria é o segundo tipo, a eficiência intrínseca (ε_{int}), definida como:

$$\varepsilon_{int} = \frac{N^{\circ} \text{ de pulsos registrados}}{N^{\circ} \text{ de radiação incidida no detector}} \quad (3.18)$$

Para uma fonte isotrópica, e levando em consideração a dependência da distância da fonte-detector com a eficiência, as equações das eficiências são facilmente relacionadas por:

$$\varepsilon_{int} = \varepsilon_{abs} \cdot \frac{4\pi}{\Omega} \quad (3.19)$$

Onde (Ω) é o ângulo sólido do detector, responsável por delimitar que apenas uma parcela da radiação emitida pela fonte consiga iluminar o detector. O conceito de ângulo sólido será discutido melhor num capítulo posterior.

Via de regra, a radiação Alfa ou Beta ao penetrar no volume ativo do detector, já começam a depositar sua energia por meio de sucessivos processos de ionização ou excitação no material do detector. Conforme uma partícula vai avançando pelo meio detector, pares de íons vão sendo produzidos ao longo do seu caminho, e assim viabilizando que o pulso resultante tenha magnitude suficiente para que possa ser registrado. Partículas carregadas interagem fortemente com a matéria, inviabilizando que elas escapem do volume ativo do detector, e por isso é frequente que esses detectores apresentem sua eficiência intrínseca próxima a 100%. Por outro lado, as radiações eletromagnéticas têm uma interação com a matéria menos intensa de modo que seu caminho livre médio no detector é bem maior e isso possibilita o escape de radiação do volume ativo do detector. Por isso, na maior parte dos casos a eficiência intrínseca para esse tipo

de detector acaba sendo menor que 100%. Neste texto, será tratada apenas da eficiência de detecção de radiação gama.

$$\varepsilon(E) = \frac{Cont}{N \cdot I_g} \quad (3.20)$$

Sendo:

$\varepsilon(E)$ → A eficiência de detecção para um fotopico com energia (E);

$Cont$ → Contagens registradas pelo detector no fotopico de energia E;

N → Número total de desintegrações;

I_g → Probabilidade de emissão do raio gama de energia (E).

Na equação (3.20) o número total de desintegrações (N) é medida durante um intervalo de tempo Δt , dado por $\int_t^{t+\Delta t} A(t).dt$, sendo que $A(t)$ é a atividade da fonte emissora em função do tempo. Pode-se reescrever a equação (3.20) da seguinte maneira:

$$\varepsilon(E) = \frac{Cont}{A(t) \cdot \Delta t \cdot I_g} \quad (3.21)$$

Portanto, a eficiência é uma razão entre o número de eventos de interesse observados pelo detector com o número de eventos produzidos pelos decaimentos na amostra, conforme apresentada na equação (3.20) ou (3.21) (KNOLL, 1999).

A análise da eficiência de detecção pode ser feita quase que instantaneamente, se considerarmos o período de tempo dt padronizado em 1 segundo. Dessa maneira a informação do número de contagens registrada pelo detector ($Cont$) é substituída pela referência de registros no detector em contagens por segundo (CPS).

$$\varepsilon(E) = \frac{CPS}{A(t) \cdot I_g} \quad (3.22)$$

A eficiência de detectores para raios gama, como os detectores semicondutores de germânio de alta pureza (HPGe), varia consideravelmente com a energia da radiação incidente, de modo que é necessário efetuar o levantamento da curva de calibração da Eficiência do detector. Esse procedimento é feito experimentalmente por meio de medidas que utilizem fontes radioativas que apresentem atividades bem conhecidas.

Ângulo Sólido

Como visto anteriormente, a eficiência absoluta de um detector (ε_{abs}) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\varepsilon_{abs} = \varepsilon_{int} \cdot \frac{\Omega}{4\pi} \quad (3.23)$$

Sendo (ε_{int}) a eficiência intrínseca e (Ω) o ângulo sólido enxergado pelo detector. Para realizar o estudo simplificado do ângulo sólido, será assumido que o detector fará o registro de N eventos de um pico, selecionado no espectro de energia, emitido por uma fonte radioativa. Além de pressupor que não esteja acontecendo a atenuação dessa radiação, entre a fonte e o detector, e que a radiação emitida por essa fonte analisada também ocorra de forma isotrópica. Portanto, a partir da definição de eficiência intrínseca do pico selecionado (ε_{ip}), a quantidade de radiação (S) emitida pela fonte durante um período de medição é dado por:

$$S = N \cdot \frac{4\pi}{\varepsilon_{ip} \cdot \Omega} \quad (3.24)$$

O ângulo sólido, dado em esterradianos, é definido como sendo a integral da superfície do detector, que esteja apontada na direção da fonte radioativa, de acordo com:

$$\Omega = \int_A \frac{\cos \alpha}{r^2} dA \quad (3.25)$$

Sendo:

$\Omega \rightarrow$ Ângulo sólido;

$\alpha \rightarrow$ Ângulo formado entre a normal da superfície do detector e a direção da fonte;

$r \rightarrow$ Distância da fonte até a superfície do detector;

$dA \rightarrow$ Elemento de área da superfície.

No caso de uma fonte volumétrica, uma segunda integração sobre todos os elementos de volume dessa fonte deve ser feita. Mas para o caso mais comum, quando a fonte é pontual e está posicionada ao longo do eixo de um detector perfeitamente cilíndrico, conforme ilustrado na Figura 3.4, (Ω) é dado por:

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + a^2}} \right) \quad (3.26)$$

Sendo:

$\Omega \rightarrow$ Ângulo sólido;

$d \rightarrow$ Distância entre a fonte e o detector;

$a \rightarrow$ Raio do detector;

FIGURA 3.4 – Esquema de posicionamento de uma fonte pontual (S) em relação ao detector (A).

Quando a fonte radioativa não é pontual, e se apresenta no formato de um disco circular que emite radiação de forma uniforme e isotópica, existe outra maneira para se encontrar o ângulo sólido (KNOLL, 1999). Assim como ilustrado na Figura 3.5, a fonte deve estar alinhada com o disco circular do detector, ambos posicionados perpendicularmente a um eixo comum passando pelos seus respectivos centros.

FIGURA 3.5 – Esquema de posicionamento de uma fonte não pontual (S) em relação ao detector (A).

De acordo com o posicionamento e dimensões físicas da fonte e do detector, o valor efetivo do ângulo sólido do sistema é dado pela integral de:

$$\Omega = \frac{4\pi a}{s} \int_0^\infty \frac{\exp(-dk) J_1(sk) J_1(ak)}{k} dk \quad (3.27)$$

Sendo a o raio do detector, s o raio do disco da fonte emissora de radiação, $J_1(x)$ são equações de Bessel em função de x . Entretanto, essa integral não possui uma solução analítica, podendo ser resolvida por cálculo numérico. Uma solução útil, aproximada, é apresentada por:

$$\Omega \cong 2\pi \left[1 - \frac{1}{(1+\beta)^{\frac{1}{2}}} - \frac{3}{8} \frac{\alpha\beta}{(1+\beta)^{\frac{5}{2}}} + \alpha^2[F_1] - \alpha^3[F_2] \right] \quad (3.28)$$

Sendo:

$$F_1 = \frac{5}{16} \frac{\beta}{(1+\beta)^{\frac{7}{2}}} - \frac{35}{64} \frac{\beta^2}{(1+\beta)^{\frac{9}{2}}}$$

$$F_2 = \frac{35}{128} \frac{\beta}{(1+\beta)^{\frac{9}{2}}} - \frac{315}{256} \frac{\beta^2}{(1+\beta)^{\frac{11}{2}}} + \frac{1155}{1024} \frac{\beta^3}{(1+\beta)^{\frac{13}{2}}}$$

$$\alpha = \left(\frac{s}{d}\right)^2$$

$$\beta = \left(\frac{a}{d}\right)^2$$

3.5. O Teste de Repetitividade

A repetitividade exprime a concordância entre dois valores medidos, desde que obtidos em condições idênticas. Por condições idênticas pode-se entender como uma medição experimental que preserve o mesmo método, o mesmo laboratório, a mesma pessoa, os mesmos equipamentos, o mesmo tipo de amostras ou reagentes, além executar as medidas em curtos intervalos de tempo (CASTRO, 2013).

O índice de repetitividade, geralmente representado por (r), delimita o valor máximo que poderá ser obtido com a diferença absoluta entre dois resultados de ensaio (X_i, X_{i-1}), desde que adquiridos nas condições descritas anteriormente. Portanto, serão aceitos em condições de repetitividade apenas os resultados que se enquadrarem na inequação (3.29):

$$|X_i - X_{i-1}| \leq r \quad (3.29)$$

Para determinar o valor da repetitividade, a partir de testes experimentais efetuados num mesmo laboratório, são realizadas várias medições ($n \geq 10$) sobre uma mesma amostra ou padrões, seguindo todas as condições de repetitividade. Adotando um nível de confiança de 95% para uma distribuição normal, o limite máximo aceito para o índice de repetitividade (r) é dado pela equação (3.30) (INMETRO, 2010):

$$r = t \cdot \sqrt{2} \cdot S_{ri} \quad (3.30)$$

Sendo (S_{ri}) o valor do desvio padrão da média associada aos resultados considerados; e (t), o valor extraído de uma tabela da distribuição de Student, para

o teste bilateral com 5% de erro, e considerando infinitos números (∞) de graus de liberdade, tem-se:

$$r = (1,9600) \cdot \sqrt{2} \cdot S_{ri} = 2,8 \cdot S_{ri} \quad (3.31)$$

Se o laboratório obtiver mais de dois resultados, o limite de repetitividade (r) é calculado seguindo as orientações da Norma ISO 5725-6. O índice de repetitividade varia em função do número de medições n efetuadas, de modo que é possível substituir os valores dos fatores da diferença crítica $f(n)$, para um nível de confiança de 95%, conforme é mostrado na equação (3.32). A Tabela 3.1, obtida na ISSO 5725-2, ilustra essa relação. Quando o número de réplicas for ($n = 2$), o fator da diferença crítica será $f(n) = 2,8$; para a replica de 3 dados ($n = 3$), o fator da diferença crítica se torna $f(n) = 3,3$; e assim por diante (CHUI, 2009).

$$r = f(n) \cdot S_{ri} \quad (3.32)$$

TABELA 3.1 – Fator da diferença crítica $f(n)$, com 95% de confiança, em função do número (n) de dados replicados.

(n)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$f(n)$	2,8	3,3	3,6	3,9	4,0	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,6

O Coeficiente de Variação de Repetitividade (CV_r), expresso em porcentagem, é dado por:

$$CV_r = \frac{S_{ri}}{\bar{x}} \times 100 \quad (3.33)$$

Sendo (CV_r) numericamente igual ao desvio padrão dos dados de repetitividade (S_{ri}) dividido pela média dos dados considerados ($\bar{x}$).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos o sistema de aquisição utilizado para efetuar a espectroscopia gama, as características físicas do suporte fixo para posicionamento de amostras radioativas utilizado no laboratório de Análise por Ativação Neutrônica, as características dos radionuclídeos manipulados nessa dissertação, além de uma breve introdução aos benefícios e utilização de um suporte que movimenta as amostras de forma automatizada.

4.1. O Sistema de Aquisição de espectroscopia gama

Para o teste do movimentador automático de amostras, foi utilizado um detector de HPGe (Germânio Hiper Puro), modelo GC2018, com 20% de eficiência nominal e resolução de 1,8 keV para o fotopico de 1332 keV do ^{60}Co , acoplado a um analisador digital de pulsos DSA-1000. A aquisição e análise dos eventos foram feitas com o software Genie2000, versão 3.1 da Canberra. O sistema é nominado dentro do laboratório como CANBERRA 06 em referência ao fabricante do detector. O software Genie2k foi desenvolvido para gerenciamento de aquisição e análise de dados de um analisador multicanal. Esse software permite também o trabalho em modo de lote (ou batch), usando a linguagem de programação REXX. Na Figura 4.1 é apresentada a tela do software Genie2000.

FIGURA 4.1 – Tela do software Genie2000.

4.2. O Suporte Padrão para o posicionamento de amostras radioativas

No Laboratório de Análise por Ativação Neutrônica do IPEN existe um aparato convencionalmente usado sobre o detector de HPGe, que permite o posicionamento de amostras radioativas durante as medidas. Esse equipamento é confeccionado em alumínio e acrílico, materiais leves de baixo número atômico, ideais para não danificar o detector e minimizar os efeitos de interferência e atenuação da radiação gama emitida pelas amostras de estudo. O dispositivo apresenta comprimento total de 20,31 (5) cm, sendo 9,33 (5) cm para fazer o acoplamento com o copo do detector, e 12,31 (5) cm disponíveis para o posicionamento da amostra, além de apresentar na parte inferior o diâmetro externo de 7,94 (5) cm e diâmetro interno de 7,68 (5) cm, como é ilustrado na Figura 4.2a. Já a Figura 4.2b apresenta uma estrutura em forma de disco, com 0,58 (5) cm de altura e diâmetro de 8,46 (5) cm, confeccionada em acrílico, para o posicionamento da amostra radioativa dentro de um rebaixo nessa peça, com diâmetro de 3,23 (5) cm. Na Figura 4.2c é ilustrado disco de acrílico encaixado em uma das posições do suporte fixo.

FIGURA 4.2 – a) suporte fixo, b) prateleira de acrílico, c) prateleira encaixada no suporte fixo.

Dependendo da atividade da fonte radioativa se faz necessário escolher a distância mais adequada para posicioná-la em relação ao detector para se realizar a aquisição de dados, pois se a fonte estiver emitindo muita radiação é necessário deixá-la mais afastada do detector para evitar a perda de informações

com os efeitos de tempo morto e empilhamento. Porém se ela apresentar uma quantidade muito baixa na emissão de radiação, ela deve ser posicionada próxima ao detector para obter mais eventos registrados no detector, resultando numa melhora estatística dos dados obtidos. Por esse motivo, o cilindro de acrílico (aonde a amostra é colocada), pode ser posicionado em marcações fixas contidas na estrutura metálica do suporte, permitindo que esse encaixe ocorra em 4 posições distintas para distanciar a amostra do detector. Todo esse sistema será definido nessa dissertação como: Suporte Fixo.

Cada uma dessas cavidades na lateral do suporte para encaixe do disco de acrílico foi denominada Posição de Prateleira, sendo realizadas as seguintes definições:

Posição de Prateleira 0	→	Disco de acrílico encaixado na 1ª cavidade do suporte metálico, sendo essa posição a mais próxima do detector.
Posição de Prateleira 1	→	Disco de acrílico encaixado na 2ª cavidade do suporte metálico, em relação à proximidade com o detector.
Posição de Prateleira 2	→	Disco de acrílico encaixado na 3ª cavidade do suporte metálico, em relação à proximidade com o detector.
Posição de Prateleira 3	→	Disco de acrílico encaixado na 4ª cavidade do suporte metálico, sendo essa posição a mais distante do detector.

O dimensionamento exato dessas posições de prateleiras, as distâncias entre elas e em relação à superfície do detector são informadas na seção 6.3.1. Essas marcações existentes no suporte, e que definem as posições de prateleiras para o suporte fixo podem ser visualizadas na Figura 4.3.

FIGURA 4.3 – Marcação de posições no suporte fixo para o encaixe da prateleira.

4.3. Características dos radionuclídeos usados no estudo

Características do ^{60}Co

Um dos radionuclídeos utilizado foi uma fonte padrão selada de ^{60}Co , produzida em 18/06/2009 com atividade inicial de 29,43 (29) kBq. Seu decaimento ocorre com a meia-vida de 5,2711 (8) anos (LNHB, 2015), ao decair pela emissão de um beta menos para o ^{60}Ni , deixando-o num estado energético excitado. Esse novo núcleo se desexcita, preferencialmente, com a emissão de 2 raios gamas bastante característicos. Em 99,85 (3) % dos casos ocorre a emissão de um raio gama com 1173,240 (3) keV de energia e, em 99,9988 (2) % dos casos com a emissão de um raio gama com 1332,508 (4) keV, conforme mostrado na Figura 4.4.

FIGURA 4.4 – Esquema de decaimento do ^{60}Co .

Características do $^{99\text{m}}\text{Tc}$

Outro radionuclídeo utilizado nesta dissertação foi o $^{99\text{m}}\text{Tc}$, por meio de diversas fontes não seladas fornecidas pelo setor de Radiofarmácia do IPEN. De todos os isótopos existentes do tecnécio, foram identificados oito pares de isômeros nucleares, caracterizados como nuclídeos que se diferenciam apenas pelo seu conteúdo energético, como é caso do par: $^{99\text{m}}\text{Tc}$ - ^{99}Tc . O nuclídeo que se encontra no estado mais energético é denominado metaestável e, para que ele atinja um estado isomérico de energia mais baixa é efetuada a emissão de uma radiação gama liberando a energia excedente.

Atualmente, O ^{99m}Tc tem uma vasta aplicação na Medicina Nuclear, permitindo a elaboração de radiofármacos para fins de diagnóstico por apresentar características físicas ideais, que possibilitam a aquisição de imagens cintilográficas com excelente resolução (BRAMBILLA, 2009). Na transição do isômero nuclear ^{99m}Tc para o ^{99}Tc é emitido em 88,5 (2) % dos casos um gama com 140,511 (1) keV, além de apresentar no decaimento um curto tempo de meia-vida, com 6,0067 (10) horas (LNHB, 2015), conforme ilustrado na Figura 4.5.

O ^{99m}Tc é produto do decaimento radioativo do ^{99}Mo , que em 87,6 (19) % das vezes se desexcita com a emissão de um β^- para produzir os núclídeos do ^{99m}Tc que se desintegra por emissão de radiação gama para originar o também instável ^{99}Tc , que decai no ^{99}Ru (estável). Para separar e extrair o ^{99m}Tc de uma fonte de ^{99}Mo é utilizado um gerador fechado, composto por uma coluna cromatográfica de óxido de alumínio (Al_2O_3), em que se deposita uma atividade conhecida de ^{99}Mo . Dentro desse sistema, ocorre o decaimento do ^{99}Mo , surgindo o ^{99m}Tc que pode ser eluído com uma solução a 0,9 % de NaCl, e coletado do sistema na forma de pertecnetato de sódio ($\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4$). Dessa maneira ocorre a separação dos radioisótopos, pois o ^{99}Mo permanece adsorvido à coluna de alumínica. O gerador pode ser novamente eluído com o rendimento teórico máximo de ^{99m}Tc após o período aproximado de 24 horas, que é o período de crescimento ideal (BRAMBILLA, 2009). As amostras de ^{99m}Tc usadas neste estudo foram obtidas de um gerador usado pelo setor de radiofarmácia para o controle de qualidade dos lotes adquiridos, conferindo rastreabilidade às amostras usadas

FIGURA 4.5 – Esquema de decaimento do ^{99m}Tc

4.4. A proposta do Movimentador de Amostras Radioativas Automatizado

O Movimentador de Amostras Radioativas Automatizado (MARA) é um aparato construído para auxiliar nas medidas de espectroscopia gama. Uma de suas funções é controlar a distância entre a fonte e o detector, permitindo que ocorra alterações dessa distância durante o processo de medição. A maior aplicação deste dispositivo será em medidas de radioisótopos de meias-vidas curta. Como já dito, a determinação dos valores de meia-vida, a Análise por Ativação

Neutrônica (AAN) e as medidas de fatores de interferência de produtos de fissão do Urânio para alguns radioisótopos sofrem severamente os efeitos ocasionados pela meia-vida curta, de modo que essas três aplicações serão beneficiadas pelo uso do dispositivo.

Como já dito, quando se tem uma amostra com uma atividade muito intensa, a fonte não pode ficar muito perto do detector pois isso gera problemas de tempo morto e empilhamento, produzindo perda de acurácia e precisão. Particularmente o empilhamento acarreta em piora na resolução em energia, deixando os fotopicos mais largos, deformados e com menos eventos do que deveriam, e isso faz com que o ajuste realizado pelo programa Genie2K nesses espectros não seja confiável. Já o tempo morto, que é um problema gerado em todo o sistema de aquisição (detector e eletrônica de aquisição), ao aumentar a atividade da fonte, muitas contagens serão processadas pelo sistema causando o aumento do tempo morto. Sendo que o detector tem uma parcela de responsabilidade muito baixa no aparecimento do tempo morto, uma vez que ele consegue coletar as cargas num tempo mais rápido do que o tempo que o amplificador e o ADC levam para processar as informações dos pulsos. No entanto, se a amostra for posicionada longe do detector, para gerar bons resultados e coletar uma quantidade adequada de eventos, ela deverá ficar exposta por um período grande de tempo. Entretanto, essas amostras não dispõem desse tempo, por ter um curto tempo de meia-vida e decair rapidamente.

A construção e a aplicação desse movimentador de amostras automatizado têm como intuito solucionar, ou melhorar as técnicas para medição e acurácia de fontes radioativas com alta atividade e curto tempo de meia-vida. Além do sistema ter a necessidade de apresentar uma reprodutibilidade muito boa, ele deve ser compacto, leve e de baixo custo.

5. CONFEÇÃO DO MOVIMENTADOR DE AMOSTRAS RADIOATIVAS AUTOMATIZADO - MARA

Usando o software do Autodesk Inventor (AUTODESK®, 2014) foi projetada uma peça para o acoplamento do motor de passo e o guia linear ao detector de radiação. Essa peça foi confeccionada numa impressora 3D, que utilizou plástico do tipo ABS (acrilonitrila butadieno estireno) para produzi-la. Esse material tem como característica ser resistente, rígido, leve, de baixo custo e com baixo número atômico em sua composição química $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$. Essas características foram almejadas no projeto, já que o protótipo ficará posicionado sobre o detector de HPGe, e o material de sua composição deve apresentar baixa interação com a radiação gama, que é a radiação de interesse neste projeto.

A seguir serão descritas brevemente as peças projetadas e os detalhes do processo de confecção das mesmas são apresentados no apêndice A.

5.1. Desenvolvimento da peça com o software do Autodesk

A peça foi confeccionada utilizando o software do Inventor Professional 2014, sendo dividida em 3 partes: O cilindro acoplador ao detector, a haste de sustentação e fixação no motor de passo e do guia linear, e suporte para posicionamento da amostra.

5.2. Projeto do Cilindro

O cilindro de acoplamento do sistema: (motor de passo e guia linear), com o detector de HPGe foi projetado com diâmetro externo de 90 mm e altura de 90 mm. O diâmetro interno, feito para encaixar em um modelo de detector de HPGe, foi projetado com 77 mm (o corpo cilíndrico do detector CANBERRA 06 possui 76,00 (5) mm de diâmetro). Na parte superior da peça, o diâmetro foi projetado com 65 mm para permitir que o cilindro fosse sustentado pelo detector. Na Figura 5.1 a e b é mostrado o projeto.

FIGURA 5.1 – a) vista superior do cilindro projetado, b) vista inferior do cilindro projetado

5.3. Etapas de desenvolvimento da Haste

A haste foi confeccionada com o intuito de fixar a peça plástica do cilindro acoplador ao detector, descrita anteriormente, com o guia linear e o motor de passo. O acoplamento com o guia é feito por meio de parafusos, e com o cilindro o encaixe foi feito por meio de cola instantânea. O trilho do motor de passo apresenta um curso com 250 mm de extensão, porém com apenas 200 mm úteis, que na ocasião do cálculo das distâncias entre as prateleiras do sistema automatizado foi aproveitado ao máximo. Outro problema limitante, que se levou em conta ao projetar a distância entre as prateleiras, é o fato do detector de HPGe do sistema CANBERRA 06 estar posicionado dentro de uma blindagem de chumbo, conforme ilustrado na Figura 5.2. Diante disso, a distância entre o topo do detector até o teto da cabine de chumbo era de aproximadamente 235 mm.

FIGURA 5.2 – Blindagem de chumbo contendo o detector de HPGe no sistema CANBERRA 06.

A confecção da haste foi efetuada em três etapas, projetou-se primeiro a parte intermediária, que foi acoplada a peça plástica cilíndrica; em seguida foram confeccionadas as duas extremidades da haste; e por último projetou-se a marcação para o encaixe dos parafusos que fixariam a peça ao guia do motor de passo. A haste foi estruturada com as dimensões de um quadrado com 15 mm de lado, e na parte central da haste que tem que fazer a conexão com a peça cilíndrica, foi inserido 2 mm a mais de comprimento para que quando fizesse o encaixe entre as peças não sobrasse um espaço vazio entre elas. Nessa região a peça ficou em formato retangular de 15 mm por 17 mm como mostrado na Figura 5.3. A peça ficou com o comprimento total de 260 mm sendo a parte central (mais larga) com 90 mm, e as duas extremidades com 115 mm e 55 mm cada uma delas.

FIGURA 5.3 – Confeção da parte inferior da haste retangular.

O trilho metálico do guia linear acoplado ao motor de passo veio com algumas perfurações de 6,10 (5) mm de diâmetro, ideais para o encaixe de parafusos com diâmetro de 3,00 (5) mm; por isso foi necessário construir na haste plástica as mesmas dimensões e distanciamento de perfurações para que fosse possível o encaixe dos parafusos. Essas marcações foram feitas na lateral da haste oposta ao encaixe com a peça cilíndrica, ou seja, elas foram feitas na lateral que ficaria em contato com o trilho do motor de passo. Para a construção dos furos na peça foram feitas sete circunferências com diâmetro de 3,2 mm, dispostas numa linha vertical ao longo da haste. Os respectivos centros de cada uma dessas circunferências desenhadas foram distanciadas em relação à parte superior da haste em 12,5 mm; 52,5 mm; 92,5 mm; 132,5 mm; 172,5 mm; 212,5 mm e 252,5 mm, conforme é mostrado na Figura 5.4.

FIGURA 5.4 – Marcações circulares para encaixe de parafusos na peça retangular da haste.

Na lateral da haste oposta aonde foram feitas as perfurações para o encaixe dos parafusos, ou seja, na lateral em que se dará a junção com cilindro plástico, foram feitas 7 marcações em sextavado com 3,50 (5) mm de lateral e 8 mm de profundidade para o encaixe e fixação de porcas que ajudarão a prender os parafusos.

Para finalizar, na parte central da haste foi feito o desenho de uma circunferência com 90 mm de diâmetro, e ajustado o para que o centro dela ficasse a uma distância de 45 mm de uma das bordas da base da haste (com medida de 15 mm), conforme ilustrado na Figura 5.5. A circunferência desenhada tem a função de recortar uma das extremidades da haste, para que o encaixe com a peça plástica cilíndrica projetada na secção anterior seja perfeito, e preencha a lateral da peça ao efetuar a colagem entre elas. Entretanto, esse recorte cilíndrico teve que ser o último procedimento a ser realizado na haste, por causa da marcação dos orifícios para encaixe dos parafusos na peça. O software utilizado só permite a construção de desenhos e abertura de fendas em superfícies planas. Por isso, esse recorte só pôde ser feito após a finalização da marcação e perfuração de todos os receptores de parafusos na haste.

FIGURA 5.5 – Acabamento cilíndrico, na parte central, em uma das laterais da haste.

Após a execução dessas etapas, a haste que tem como intuito fixar a peça plástica do cilindro acoplador ao detector, com o trilho guia do motor de passo foi finalizada, e as Figuras 5.6a e 5.6b ilustram a peça concluída.

FIGURA 5.6 – a) Vista traseira da haste finalizada, b) Vista frontal da haste finalizada.

5.4. Etapas de desenvolvimento da Prateleira

Na confecção da prateleira para efetuar o posicionamento da amostra radioativa, foi projetado um círculo com 90 mm de diâmetro de 6 mm de espessura com duas hastes de 17 mm cada. Na parte central do círculo foi feito um rebaixo de com o diâmetro de 34 mm e 3 mm de profundidade. Essa região mais profunda tem a função de criar uma marcação na prateleira, para facilitar o posicionamento e encaixe de amostras radioativas contidas num recipiente conhecido popularmente como “panelinha”, cujo diâmetro é de 31,6 (5) mm. O projeto pode ser visto na Figura 5.7.

FIGURA 5.7 – Marcação e recorte cilíndrico na prateleira, para posicionamento das amostras radioativas.

Para finalizar a peça, foi projetado os orifícios pelos quais se encaixariam os parafusos com 2,90 (5) mm de diâmetro, que prenderiam a peça plástica ao conector metálico móvel da haste do motor de passo. Para isso foram projetados 2 cilindros com 3,1 mm de diâmetro e 16 mm de profundidade, cujos centros são separados por uma distância de 25 mm. E ao mesmo tempo o centro dessas circunferências estão a uma distância de 3 mm da borda da peça plástica, conforme ilustrado na Figura 5.8. O dispositivo móvel no trilho do motor de passo, ao qual foi parafusada essa peça plástica confeccionada, já apresentava orifícios sulcados, separados a uma distância de 25 mm, para encaixe de parafusos com 3,00 (5) mm de diâmetro.

FIGURA 5.8 – Marcação circular na peça, para encaixe de parafusos.

5.5. Confeção das peças na impressora 3D

Depois de utilizar o software do Autodesk Inventor para projetar as 3 peças que formam o suporte automatizado, elas foram reproduzidas numa impressora 3D.

Inicialmente, foi projetada uma única peça que apresentava a haste que seria fixada ao trilho do motor de passo fundida com o cilindro acoplador ao detector. Porém, as dimensões dessa peça única ultrapassavam os limites disponíveis na máquina da impressora 3D utilizada. Por isso, para que se tornasse viável a impressão, a peça foi fragmentada em duas partes, e depois de estarem confeccionadas, elas foram novamente unidas utilizando a cola de secagem rápida.

5.6. Encaixe da peça plástica no motor de passo

Em cada um dos orifícios, em formato sextavado, na haste da peça foram encaixadas as porcas metálicas com lateral de 3,50 (5) mm. Em seguida, a peça plástica foi fixada no trilho guia do motor de passo, utilizando parafusos de 3,00 (5) mm de diâmetro e com 1,60 (5) mm de extensão.

As Figuras 5.9a, 5.9b e 5.9c ilustram o movimentador de amostras radioativas automatizado finalizado.

FIGURA 5.9 – Movimentador de Amostras Radioativas Automatizado, confeccionado em impressora 3D acoplado ao motor de passo; a) vista lateral, b) vista superior, c) parcialmente frontal.

5.7. Características do motor de passo

Nesse dispositivo foi utilizado um motor de passo do tipo NEMA-17, com $1,8^\circ$ por passo e alimentado com tensão de 12 Volts. Esse motor está acoplado a um fuso, estruturado para deslocar 10 mm a cada passo completo realizado pelo motor, e assim efetuando a movimentação de amostras radioativas em relação ao detector. O trilho do equipamento apresenta o cursor total com 301 mm de extensão, sendo que desses apenas 200 mm são úteis.

O motor de passo comprado pela empresa PBC Linear (*A Pacific Bearing Co. Linear*) foi o modelo MR-15-MS-250-AJ-M42-001.

5.8. O microcontrolador Arduino

Para controlar a movimentação do motor de passo, escolheu-se trabalhar com o microcontrolador Arduino (BANZI et al., 2006), que além de ter baixo custo e ser bastante compacto, tem muitas informações disponíveis na literatura e uma grande disponibilidade de bibliotecas com funções já implementadas para sensores e motores de passo, o que facilita sua programação, assim como a disponibilidade comercial de acessórios que podem ser facilmente acoplados ao sistema, principalmente os chamados “*shields*”.

O Arduíno se configura como uma plataforma eletrônica *open source* que utiliza um microcontrolador ATmega328, da Atmel, de 8 bits, com 32k de memória flash, 32 registradores e 6 conversores Analógico-Digital. Ele possui uma linguagem própria, baseada em C++ (chamada Arduíno IDE) com amplo material disponível. O Arduíno tem portas de comunicação para sinais analógicos (6 pinos) e digitais (14 pinos), e opera com tensão de cerca de 5 V. Na Figura 5.10a o modelo usado, o Arduíno UNO é mostrado, juntamente com o *shield* usado 5.10b.

FIGURA 5.10 – (a) A placa Arduíno UNO; (b) o *shield* usado.

Os *Shields* são placas que podem ser acopladas ao Arduíno expandindo suas capacidades, como por exemplo controlar um motor de passo. O projeto Arduíno suporta oficialmente o *shield* composto com o Circuito Integrado L293D, que permite controlar a velocidade, a direção e a corrente consumida por motores de passo.

Outra vantagem em utilizar esse microcontrolador é que além dele permitir o controle da velocidade de movimentação da prateleira, ele poderá também emitir pulsos com frequência também definida pelo usuário, de modo a atuar como um pulsador para que o tempo morto seja efetivamente corrigido (ZAHN, G. S. et al, 2013). Esse pulsador também terá taxa programável de modo a não incluir diferentes contribuições ao longo da medida no tempo morto do sistema, visando solucionar alguns dos problemas encontrados na literatura, e relatados anteriormente.

A programação utilizada nesse dispositivo é bastante flexível, e aceita uma quantidade razoável de andares, com posições bem definidas, que distanciarão a amostra analisada do detector de radiação, conforme desejar e programar o operador. Sendo que a haste desse suporte automatizado possui a limitação de posicionar a prateleira, em relação ao detector, a uma distância mínima

de 0,90 (7) cm e permite o posicionamento dela a uma distância máxima de 14,60 (9) cm.

Na programação desenvolvida para movimentar o motor de passo, foi observado empiricamente que quando se atribuía o valor 500 à variável “passo” (o que corresponde a 500 passos no motor), o motor de passo era acionado e executava o deslocamento da prateleira em 1,00 (5) cm. Portanto, para quaisquer posições de andares que o operador sentir a necessidade de definir para a elaboração de sua atividade experimental, basta usar o fator de conversão apresentado anteriormente. A programação completa utilizada é apresentada no apêndice B.

5.9. A interface em Visual Basic

Para que a aquisição de dados no CANBERRA 06 pudesse acontecer inteiramente de forma automatizada, ao se utilizar o MARA, foi necessário criar uma interface amigável desenvolvida em Visual Basic 6 (PETROUTSOS, 1999), que seria responsável por emitir os comandos para o Arduíno controlar o motor de passo, além de fornecer os comandos para disparar a aquisição no software do Genie2k, conforme o esquema da Figura 5.11.

FIGURA 5.11 – Esquema da visão geral do sistema automatizado.

A Figura 5.11 representa esquematicamente a composição do sistema de aquisição. O software desenvolvido em visual Basic 6, chamado aqui de

Programming, faz a interface com o usuário. Ele recebe a programação da aquisição (posições de prateleira para as medidas, número de medidas em cada posição de prateleira, sequência de medidas, tempo de duração das medidas e optar se ela será efetuada em tempo vivo ou tempo real). Esse software envia essa programação ao microcontrolador Arduino que por sua vez controla o motor de passo com auxílio de um driver, posicionando as prateleiras nas posições de aquisição. O software também envia os parâmetros de aquisição para o Genie2k, que dispara as aquisições com as durações desejadas e salva os arquivos (com o nome que o usuário definir).

O software *programming*, ao receber a programação de um conjunto de medidas gera dois arquivos: Um chamado “programacao.txt”, que corresponde ao arquivo gravado em código Ascii (texto) estruturado para o usuário visualizar qual foi o último conjunto de medidas programado; e o outro denominado “controle.txt” que é gerado em código binário para ser utilizado pelo programa interface com o intuito de informar a posição em que se encontra a prateleira ao Arduino, e as condições de medida ao DSA 1000.

O software Genie2k pode trabalhar em modo lote ou script, ou seja, em modo programável. Para tanto pode-se utilizar a linguagem REXX. O *programming*, após receber as informações do usuário gera um programa em linguagem REXX, responsável por gerenciar a aquisição automática do sistema conforme programação definida pelo usuário. Esse programa informa e lê os dados gravados no arquivo de controle (controle.txt) que armazena as seguintes informações: número da medida, posição da prateleira, número de vezes em que esta medida será realizada nesta posição, tempo em que será feita a medida, nome base do arquivo onde será gravado o espectro e o tipo de tempo de contagem (se tempo vivo ou tempo real). Após a leitura, o *programming* informa (através da interface USB) a posição de acionamento da prateleira, e aguarda por 10 s enquanto o posicionamento da mesma é efetuado. Em seguida, é executado um comando para abrir a janela do detector (Genie2k), porém isso só ocorre caso seja a primeira medida do conjunto, para que na sequência seja pré-ajustado o intervalo de tempo e o tipo do tempo de contagem, iniciando, desta forma a aquisição de dados. É aguardado até que ocorra a finalização da contagem, os dados registrados no DSA 1000 são então gravados para o arquivo determinado pelo usuário com sufixo correspondente ao índice da media, para que o procedimento seja repetido

conforme programado pelo operador. O acionamento do DSA 1000 é feito através das bibliotecas do Genie2k. Durante a execução do programa é aberta uma janela (winrexx) que indica o status de execução do programa para que o usuário acompanhe a aquisição dos dados.

O usuário pode programar até 20 medições distintas, por quanto tempo ele desejar (em segundos), na posição de prateleira que ele preferir e ainda pode optar por programar as contagens em tempo vivo, ou em tempo real. Porém se ele optar por fazer várias medições, desde que utilizando a mesma prateleira e o mesmo intervalo de tempo para cada uma delas, a programação permite a aquisição de 999 medidas. Cada um dos arquivos, contendo as aquisições, é salvo no computador de forma automatizada com o nome que o operador digitou, sendo diferenciado cada um desses arquivos apenas pela adição do número da rotina, na ordem de execução que foi solicitada pelo operador. Depois de disparado o início das medidas, não há qualquer interação do usuário com o sistema de medidas, pois esse faz tudo de forma automatizada, cumprindo o que foi solicitado pelo usuário. As instruções sobre o funcionamento e manipulação do programa são apresentadas no apêndice C dessa dissertação.

6. TESTES EFETUADOS E RESULTADOS OBTIDOS

Nessa seção serão descritos e apresentados os resultados de diversos testes realizados que envolveram o MARA. Será aqui relatado o experimento que auxiliou na escolha da velocidade mais adequada para a operação do motor de passo do sistema, o ensaio que mapeou o tempo de deslocamento da prateleira para todas as combinações de posições pré-estipuladas no sistema automatizado, e por último o teste de repetitividade que teve como intuito avaliar a confiabilidade do sistema desenvolvido neste trabalho.

6.1. Seleção da velocidade de movimentação do MARA

Após elaborar as linhas de código para movimentar o motor de passo por meio da placa Arduíno, foi necessário inserir um valor de velocidade na seguinte linha de comando “*motor.setSpeed(v);*”, onde (*v*) é um valor numérico da velocidade desejada. Para selecionar o valor de velocidade mais adequado ao sistema, foram feitos vários testes, usando como critérios de seleção o ruído sonoro do motor de passo, o aquecimento do C.I. “L293D”, acoplado ao microcontrolador Arduíno e o tempo de movimentação do suporte de uma posição até a outra. O ruído emitido pelo motor de passo foi aferido com o auxílio de um decibelímetro desenvolvido para celulares, pois, de acordo com o valor de velocidade selecionado, o motor alternava de um ruído quase que imperceptível até a emissão de barulho alto e estridente. Para realizar essa medida do ruído sonoro, em decibel (dB), o celular com o aplicativo instalado ficou posicionado a uma distância de 10,0 (5) cm do suporte automatizado e, o mesmo fornece o valor médio do ruído emitido pelo motor de passo durante sua operação. Essas informações são exibidas na Tabela 6.1, assim como na coluna ao lado é apresentada uma interpretação desse ruído, qualificando-o como: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto. Já o aquecimento no C.I. “L293D” foi observado também de forma qualitativa, que é o responsável por emitir o comando para movimentar o motor de passo. Por fim, foi medido o tempo que a prateleira levava para percorrer do andar 0 até o andar 3, que estavam separados a uma distância de 9,00 (5) cm, efetuando 3 tomadas de dados a fim de gerar um valor médio do tempo de deslocamento da prateleira. As incertezas para a medida de tempo com o cronômetro foram consideradas com a ordem de grandeza do tempo de reação do ser humano, que oscila de 0,196 a

0,229 s (VAGHETTI, 2007). A Tabela 6.1 apresenta essas informações observadas e aferidas.

TABELA 6.1 – Teste de velocidade do motor de passo, com observação do tempo de deslocamento da prateleira, ruído emitido pelo motor e elevação na temperatura do C.I..

Velocidade	Tempo (segundos)				Ruído do motor (dB)		Temperatura do C.I.
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média			
25	58,2 (3)	58,1 (3)	58,1 (3)	58,1 (3)*	81 (1)	médio	Aquecimento muito alto
50	29,8 (3)	29,7 (3)	29,8 (3)	29,8 (3)*	82 (1)	médio	Aquecimento alto
100	15,6 (3)	15,6 (3)	15,5 (3)	15,6 (3)*	89 (1)	muito alto	Aquecimento moderado
150	10,6 (3)	10,7 (3)	10,7 (3)	10,7 (3)	78 (1)	baixo	Aquecimento leve
200	8,4 (3)	8,3 (3)	8,5 (3)	8,4 (3)	87 (1)	alto	Aquecimento leve
250	6,9 (3)	6,9 (3)	6,9 (3)	6,9 (3)	82 (1)	médio	Aquecimento leve
300	5,9 (3)	5,9 (3)	6,0 (3)	5,9 (3)	70 (1)	muito baixo	Sem aquecimento
350	5,3 (3)	5,3 (3)	5,2 (3)	5,2 (3)	77 (1)	baixo	Sem aquecimento
400	--	--	--	**	85 (1)	alto	Sem aquecimento
450	--	--	--	**	80 (1)	médio	Sem aquecimento

* Com esses valores de velocidade, observou-se uma pequena irregularidade dos passos dado pelo motor ao deslocar a prateleira, fazendo a prateleira percorrer mais do que os 9,00 (5) cm programados inicialmente. Esse fenômeno era evidente na descida da prateleira, e mais acentuado ao valor inverso da velocidade programada.

** Com esses valores de velocidade o passo dado pelo motor era completamente desregulado, fazendo com que a prateleira praticamente não saísse do lugar, seja para os comandos de subida ou descida. Tornando impossível mensurar o tempo de deslocamento.

Por meio da Tabela 6.1 pode-se observar que ao atribuir o valor de 300 na velocidade da programação do motor de passo os melhores resultados são obtidos. Com esse valor de velocidade, a corrente elétrica que circula pelo C.I. “L293D” é ideal para a movimentação precisa do motor de passo, além de não ser alta a ponto de gerar aquecimentos indesejados nesse dispositivo eletrônico, uma vez que trabalhar em altas temperaturas faz com que o C.I. se danifique com o passar do tempo. Essa velocidade também produz no motor de passo um ruído de funcionamento quase que inaudível (como apresentado na Tabela 6.1, para alguns valores de velocidade o som gerado pelo motor pode ser muito alto o que pode produzir desconforto aos operadores), além de apresentar um tempo de deslocamento da prateleira consideravelmente baixo, fazendo com que ela percorra 9,00 (5) cm num tempo médio de 5,96 s.

6.2. Determinação do tempo de deslocamento da prateleira automatizada entre os andares pré-estabelecidos

Após selecionar o mais adequado valor de velocidade na programação para movimentar o motor de passo, $v = 300$, foi aferido o tempo médio que levava para a prateleira se deslocar por todas as combinações de andares, diferenciando até mesmo o tempo de subida do tempo de descida. Para cada uma das opções possíveis foi mensurado, 10 vezes, o tempo dispendido para a prateleira realizar o deslocamento. A programação utilizada para efetuar esse teste apresentava a seguinte definição para posicionamento de prateleiras: considerando a Prateleira 0 como a referência de patamar mínimo para o deslocamento, a posição da Prateleira 1 foi definida a 3,15 (5) cm de distância em relação a ela. Já a prateleira 2 foi fixada em 6,26 (5) cm de distância, e a Prateleira 3 em 9,44 (5) cm, ambas em relação à Prateleira 0. Esses valores de distância foram aferidos com o auxílio de um paquímetro, e o instrumento foi posicionado entre a parte superior da base plástica do suporte e a parte inferior da prateleira. A medida de distância foi efetuada próxima à haste do movimentador, pois era a região em que a prateleira se

encontrava mais rígida, apresentando maior confiabilidade na medição. Os valores de tempo gasto para deslocar a prateleira entre os andares programados são apresentados na Tabela 6.2.

TABELA 6.2 – Tempo Médio gasto para a prateleira se deslocar entre os andares.

ANDAR	DISTÂNCIA (CM)	TEMPO (s)										MÉDIA
		MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	MEDIDA 4	MEDIDA 5	MEDIDA 6	MEDIDA 7	MEDIDA 8	MEDIDA 9	MEDIDA 10	
0 até 1	3,15 (5)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)
1 até 0	3,15 (5)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)
0 até 2	6,26 (5)	4,1 (3)	4,1 (3)	4,1 (3)	4,0 (3)	4,1 (3)	4,0 (3)	4,0 (3)	4,0 (3)	4,0 (3)	3,9 (3)	4,0 (3)
2 até 0	6,26 (5)	4,0 (3)	4,0 (3)	4,0 (3)	4,1 (3)	4,1 (3)	4,0 (3)	3,9 (3)	4,0 (3)	4,1 (3)	4,0 (3)	4,0 (3)
0 até 3	9,44 (5)	6,0 (3)	6,0 (3)	6,0 (3)	6,0 (3)	5,9 (3)	6,0 (3)	5,9 (3)	6,0 (3)	6,0 (3)	6,0 (3)	6,0 (3)
3 até 0	9,44 (5)	6,0 (3)	6,0 (3)	6,0 (3)	6,0 (3)	6,0 (3)	5,9 (3)	5,9 (3)	6,0 (3)	5,9 (3)	6,0 (3)	6,0 (3)
1 até 2	3,11 (7)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,2 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)
2 até 1	3,11 (7)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)
2 até 3	3,18 (7)	2,2 (3)	2,2 (3)	2,2 (3)	2,2 (3)	2,1 (3)	2,2 (3)	2,1 (3)	2,1 (3)	2,2 (3)	2,2 (3)	2,2 (3)
3 até 2	3,18 (7)	2,2 (3)	2,2 (3)	2,2 (3)	2,2 (3)	2,1 (3)	2,2 (3)	2,2 (3)	2,2 (3)	2,1 (3)	2,2 (3)	2,2 (3)
1 até 3	6,29 (7)	4,1 (3)	4,0 (3)	4,1 (3)	4,0 (3)	4,0 (3)	4,1 (3)	4,1 (3)	4,1 (3)	4,1 (3)	4,1 (3)	4,1 (3)
3 até 1	6,29 (7)	4,1 (3)	4,1 (3)	4,1 (3)	4,1 (3)	4,0 (3)	4,1 (3)	4,0 (3)	4,1 (3)	4,1 (3)	4,1 (3)	4,1 (3)

6.3. Aplicação do Teste de Repetitividade

Visando averiguar a eficácia do protótipo do movimentador de amostras automatizado, foi aplicado o teste de repetitividade a fim de comparar os resultados obtidos usando o suporte fixo e o suporte automatizado (MARA). Selecionando para essa análise dois espectros de energia de radiação gama, numa amostra selada de ^{60}Co .

O teste foi aplicado, primeiramente, para os dados de espectroscopia gama da fonte de ^{60}Co obtidos com a utilização do suporte fixo, averiguando a repetitividade dos resultados em cada uma das 4 prateleiras, adquirindo o total de 40 contagens em 3 dias. Na sequência, utilizando a mesma fonte de ^{60}Co e após o intervalo de tempo de aproximadamente 26 dias, o teste foi novamente aplicado, trocando o suporte fixo pelo suporte automatizado, e efetuando as 40 contagens

em 2 dias. Procurou-se também padronizar e manter as mesmas distâncias entre as prateleiras do suporte fixo. Ao aplicar o teste de repetitividade, as condições experimentais foram as mais semelhantes possíveis, sendo necessário preservar o método, o laboratório, o operador, equipamentos, tipo de amostra, além de executar as medidas num curto intervalo de tempo. (CASTRO 2013)

Outra condição buscada foi que a metodologia aplicada para efetuar a aquisição das contagens por segundo (CPS), dos dois fotopicos da fonte de ^{60}Co utilizando o suporte fixo, fosse o mais próxima possível da metodologia adotada ao se utilizar o suporte automatizado. Em ambos os procedimentos a fonte era posicionada inicialmente na prateleira mais próxima ao detector, a prateleira 0; após efetuada a contagem a fonte era posicionada na prateleira 1, em seguida as contagens ocorriam na prateleira 2 e por último na prateleira 3. Ao findar desse ciclo, a fonte era posicionada novamente na prateleira 0 e repetia-se o procedimento experimental, sendo executado 10 ciclos de medidas para cada um dos suportes (o fixo e o automatizado).

Cada uma das contagens teve duração de 1800 segundos, com as medidas realizadas em tempo vivo, que leva em conta apenas o tempo de operação do detector e desconsidera o tempo em que ele esteve paralisado. O esquema da metodologia empregada, utilizando os dois tipos de suporte, pode ser visualizado na Figura 6.1.

FIGURA 6.1 – Esquema ilustrativo da metodologia utilizada tanto com o suporte fixo, quanto com o suporte automatizado (MARA).

6.3.1. Medidas Utilizando o Suporte Fixo

Primeiramente, realizou-se o experimento de repetitividade utilizando o suporte padrão de prateleiras fixas, confeccionado em alumínio e acrílico, que se encontrava como única opção de uso no laboratório. O processo de aquisição de dados foi repetido 10 vezes para cada uma das 4 posições de prateleiras, com distâncias fixas em relação ao detector. Nesse suporte, essas distâncias são as seguintes: a Prateleira 0 está praticamente em contato com o detector, deixando a amostra 0,33 (7) cm distante do detector; a Prateleira 1 está 3,48 (9) cm distante do detector; a Prateleira 2 está 6,59 (9) cm distante do detector e a Prateleira 3 está 9,77 (9) cm distante do detector. Quando adotada a prateleira 0 desse suporte como referência, temos a prateleira 1 distante dela em 3,15 (5) cm, a prateleira 2 posicionada a 6,26 (5) cm e a prateleira 3 a 9,44 (5) cm distante em relação a prateleira 0. Essas informações podem ser visualizadas na Figura 6.2, que apresenta a distância entre as prateleiras quando se adota a prateleira 0 como referência, a aparência do suporte fixo e a distância entre as prateleiras quando se adota o detector como referencial, sendo a prateleira 0 identificada por (P0), e as prateleiras 1, 2 e 3 respectivamente representadas por (P1), (P2) e (P3).

FIGURA 6.2 – Distâncias das prateleiras adotando a P0 como referência, distâncias das prateleiras adotando o detector como referência, ambos dimensionados com o suporte fixo.

Como mencionado, para executar o procedimento experimental, a mesma amostra foi contada por 1800 segundos em tempo vivo, intercalando as prateleiras ao concluir cada uma das contagens efetuada, sendo que as trocas de posicionamento da fonte entre as prateleiras foram feitas de forma manual.

A amostra radioativa de ^{60}Co possui o tempo de meia-vida de 5,2711 (8) anos, para maior compatibilidade entre os dados aferidos jogou-se necessário efetuar a correção da atividade da fonte, sempre em relação à primeira contagem dessa fonte em cada uma das 4 posições de prateleiras, a fim de retificar essa defasagem oriunda do decaimento radioativo. Cada um dos 10 ciclos executados, na aquisição dos fotopicos do ^{60}Co para cada uma das 4 posições de prateleiras no teste de repetitividade, foi identificado com uma letra, que seguiu a ordem alfabética de “A” até “J”, sendo que a letra “A” se refere ao primeiro ciclo supracitado numa determinada posição de prateleira e a letra “J”, conseqüentemente, faz referência ao último ciclo de contagens da amostra radioativa. Na sequência são apresentados os dados obtidos.

Na Tabela 6.3 são apresentados os valores mensurados das contagens por segundo (CPS) com o sistema do CANBERRA 06, para os dois fotopicos

característicos do ^{60}Co . Nas colunas seguintes são apresentados os valores corrigidos por conta do decaimento radioativo, além de informar a média dos dados, o desvio padrão e o valor percentual do desvio padrão relativo, e também o tempo morto do sistema durante a aquisição de dados em (%), para a amostra posicionada na prateleira 0 do suporte fixo.

TABELA 6.3 – Dados obtidos na posição de Prateleira 0 com o suporte fixo.

Energia (keV): Amostras	Dados obtidos		Dados corrigidos		Tempo Morto (%)
	1173,240 (3) CPS	1332,508 (4) CPS	1173,240 (3) CPS	1332,508 (4) CPS	
A	534,465 (588)	476,054 (524)	534,47 (59)	476,05 (52)	10,73
B	532,501 (586)	474,518 (522)	532,52 (59)	474,54 (52)	10,70
C	533,490 (587)	476,120 (524)	533,53 (59)	476,16 (52)	10,71
D	535,705 (589)	476,804 (524)	535,77 (59)	476,86 (52)	10,74
E	532,023 (585)	473,493 (521)	532,10 (59)	473,56 (52)	10,70
F	537,089 (591)	475,439 (523)	537,28 (59)	475,61 (52)	10,78
G	536,669 (590)	475,434 (523)	536,88 (59)	475,62 (52)	10,72
H	532,796 (586)	474,480 (522)	533,02 (59)	474,68 (52)	10,70
I	533,242 (587)	473,271 (521)	533,49 (59)	473,49 (52)	10,70
J	533,524 (587)	473,842 (521)	533,79 (59)	474,08 (52)	10,70
Média			534,28 (59)	475,06 (52)	
Desvio Padrão			1,79	1,16	
Desvio Padrão relativo (em %)			0,34	0,24	

As Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6, apresentam a mesma estrutura de informações contidas na Tabela 6.3, entretanto para a amostra posicionada respectivamente nas posições de prateleira 1, 2 e 3 do suporte fixo.

TABELA 6.4 – Dados obtidos na posição de Prateleira 1 com o suporte fixo.

Energia (keV): Amostras	Dados obtidos		Dados corrigidos		Tempo
	1173,240 (3) CPS	1332,508 (4) CPS	1173,240 (3) CPS	1332,508 (4) CPS	Morto (%)
A	169,490 (322)	151,310 (303)	169,49 (32)	151,31 (30)	3,53
B	170,346 (324)	150,903 (302)	170,35 (32)	150,91 (30)	3,53
C	169,623 (322)	150,882 (302)	169,64 (32)	150,89 (30)	3,52
D	169,372 (322)	150,682 (301)	169,39 (32)	150,70 (30)	3,52
E	170,455 (324)	150,782 (302)	170,48 (32)	150,80 (30)	3,52
F	170,119 (323)	150,774 (302)	170,18 (32)	150,83 (30)	3,52
G	169,980 (323)	151,137 (302)	170,05 (32)	151,20 (30)	3,52
H	169,471 (322)	150,610 (301)	169,54 (32)	150,67 (30)	3,52
I	170,429 (324)	150,383 (301)	170,51 (32)	150,45 (30)	3,53
J	169,687 (322)	150,995 (302)	169,81 (32)	151,10 (30)	3,52
Média			169,94 (32)	150,89 (30)	
Desvio Padrão			0,43	0,26	
Desvio Padrão relativo (em %)			0,25	0,17	

TABELA 6.5 – Dados obtidos na posição de Prateleira 2 com o suporte fixo.

Energia (keV): Amostras	Dados obtidos		Dados corrigidos		Tempo
	1173,240 (3) CPS	1332,508 (4) CPS	1173,240 (3) CPS	1332,508 (4) CPS	Morto (%)
A	77,462 (225)	68,432 (198)	77,46 (22)	68,43 (20)	1,68
B	77,367 (224)	68,960 (200)	77,37 (22)	68,96 (20)	1,69
C	76,934 (223)	69,059 (200)	76,94 (22)	69,06 (20)	1,68
D	77,150 (224)	68,472 (199)	77,16 (22)	68,48 (20)	1,68
E	77,594 (225)	68,631 (199)	77,62 (23)	68,65 (20)	1,68
F	77,558 (217)	68,815 (200)	77,59 (22)	68,84 (20)	1,68
G	77,625 (225)	68,452 (199)	77,66 (22)	68,48 (20)	1,68
H	77,114 (224)	68,712 (199)	77,15 (22)	68,74 (20)	1,68
I	77,091 (224)	68,684 (199)	77,13 (22)	68,72 (20)	1,68
J	77,103 (224)	68,599 (199)	77,16 (22)	68,65 (20)	1,68
Média			77,32 (22)	68,70 (20)	
Desvio Padrão			0,25	0,21	
Desvio Padrão relativo (em %)			0,32	0,31	

TABELA 6.6 – Dados obtidos na posição de Prateleira 3 com o suporte fixo.

Energia (keV): Amostras	Dados obtidos		Dados corrigidos		Tempo
	1173,240 (3) CPS	1332,508 (4) CPS	1173,240 (3) CPS	1332,508 (4) CPS	Morto (%)
A	43,224 (164)	38,551 (150)	43,22 (16)	38,55 (15)	0,99
B	43,292 (165)	38,329 (149)	43,29 (16)	38,33 (15)	0,99
C	43,219 (164)	38,639 (147)	43,22 (16)	38,64 (15)	0,99
D	43,116 (164)	38,377 (150)	43,12 (16)	38,38 (15)	0,99
E	43,308 (165)	38,744 (147)	43,32 (16)	38,76 (15)	1,00
F	43,327 (165)	38,499 (150)	43,34 (16)	38,51 (15)	0,99
G	43,041 (164)	38,784 (147)	43,06 (16)	38,80 (15)	0,99
H	43,299 (165)	38,624 (147)	43,32 (16)	38,64 (15)	0,99
I	43,117 (164)	38,598 (147)	43,14 (16)	38,62 (15)	0,99
J	43,295 (165)	38,440 (150)	43,33 (16)	38,47 (15)	0,99
Média			43,24 (16)	38,57 (15)	
Desvio Padrão			0,10	0,15	
Desvio Padrão relativo (em %)			0,23	0,39	

Após coletar os dados experimentais com a fonte de ^{60}Co seguiu-se os procedimentos do teste de repetitividade, a fim de averiguar a compatibilidade entre eles, por meio da equação (3.31) (pg. 30) e da inequação (3.29) (pg. 29), sendo que ambas já foram abordadas na seção 3 dessa dissertação. A equação (3.31) foi utilizada para determinar o valor do índice de repetitividade (r) para os dados obtidos, enquanto que a inequação (3.29) verificou as combinações de dados que ficavam acima desse índice (r).

$$r = 2,8.S_{ri} \quad (3.31)$$

$$|X_i - X_{i-1}| \leq r \quad (3.29)$$

O procedimento experimental consistiu em selecionar os resultados obtidos de CPS do grupo dos 10 dados coletados e caracterizados de A até J, para um dos fotopicos do ^{60}Co (primeiramente o de 1173,240 (3) keV), obtido com a amostra na posição de prateleira 0. Para esses dados de CPS foram calculadas a média e o desvio padrão, como apresentado na Tabela 6.3, e para determinar o índice de repetitividade (r) desses elementos foi utilizada a equação (3.31). Por

meio da inequação (3.29) foi verificado se o módulo da diferença das CPS obtidas na contagem A e na contagem B era maior do que o limite estabelecido pelo índice de repetitividade encontrado anteriormente, indicando que os dados são compatíveis sempre que o módulo dessa diferença for menor do que (r) . Essa mesma verificação foi efetuada entre as contagens A e C, A e D, A e E, A e F, A e G, A e H, A e I, A e J; depois entre: B e C, B e D, B e E, B e F, e assim por diante, resultando em 45 tipos de combinações possíveis para cada grupo de CPS obtido em cada uma das posições de prateleiras, para cada um dos fotopicos. Ainda para o mesmo fotopico, repetiu-se essa técnica para os dados obtidos com a amostra na posição de prateleira 1, depois para os dados obtidos com a amostra na prateleira 2, e por último com os dados da prateleira 3.

Em seguida, dando continuidade ao teste de repetitividade, esse procedimento foi repetido para os dados obtidos de CPS do fotopico com energia de 1332,508 (4) keV posicionada na prateleira de posição 0; efetuando a mesma análise para o grupo de dados obtidos com a amostra nas demais posições de prateleiras: 1, 2 e 3, apresentando na Tabela 6.7 todos os valores do índice de repetitividade (r) encontrados, a quantidade de interações entre os grupos de dados de CPS efetuadas por meio da inequação (3.29) que ficaram acima do valor de (r) , assim como o valor percentual dessas combinações discordantes de (r) .

TABELA 6.7 – Resultado do índice de repetitividade (r) , a quantidade de combinações de resultados na inequação que ficaram acima de (r) e da porcentagem dessas combinações discordantes de (r) , nas prateleiras do suporte fixo.

	1173,240 (3) keV			1332,508 (4) keV		
	Índice de Repetitividade (r)	Resultados discordantes de (r)		Índice de Repetitividade (r)	Resultados discordantes de (r)	
		(nº)	(%)		(nº)	(%)
Prateleira 0	5,009	1	2,2	3,251	2	4,4
Prateleira 1	1,189	0	0	0,724	2	4,4
Prateleira 2	0,698	1	2,2	0,589	1	2,2
Prateleira 3	0,283	1	2,2	0,424	2	4,4

6.3.2. Utilizando o MARA

Na sequência, o suporte fixo utilizado foi substituído pelo movimentador de amostra automatizado, buscando inserir na programação do dispositivo as mesmas distâncias descritas anteriormente, com relação ao suporte fixo, entre as prateleiras e o detector de radiação. Entretanto, devido à estrutura física do suporte automatizado, a distância mínima possível para definir a Prateleira 0 foi de 0,90 (7) cm. A partir dessa condição, optou-se por manter as mesmas distâncias de prateleiras atribuídas ao suporte fixo, gerando um ligeiro aumento, mas proporcional, em todas as distâncias de prateleiras programadas no suporte automatizado. Dessa forma, a Prateleira 1 está 4,05 (9) cm distante do detector, pois somou-se a distância entre as prateleiras 3,15 (5) cm com a base do suporte de valor 0,90 (7) cm. Seguindo o mesmo raciocínio, a Prateleira 2 está 7,16 (9) cm distante do detector e a Prateleira 3 está 10,34 (9) cm de distância do detector. A Figura 6.3 apresenta essas informações, ilustrando a distância entre as prateleiras quando se adota a prateleira 0 como referência, a aparência do suporte MARA e a distância entre as prateleiras quando se adota o detector como referencial, sendo a prateleira 0, 1, 2 e 3 identificadas respectivamente por (P0), (P1), (P2) e (P3).

FIGURA 6.3 – Distâncias das prateleiras adotando a P0 como referência, distâncias das prateleiras adotando o detector como referência, ambos dimensionados com o suporte MARA.

O processo de aquisição de dados também foi repetido por 10 vezes para cada uma das 4 posições de prateleiras e a mesma amostra foi contada por 1800 segundos, em tempo vivo, além de intercalar de forma automatizada as prateleiras ao concluir cada uma das contagens efetuada.

A correção proveniente do decaimento radioativo do radioisótopo de ^{60}Co também foi realizada para os dados obtidos com o auxílio do suporte automatizado, efetuando a correção sempre em relação à primeira contagem obtida, para cada uma das 4 posições de prateleiras do suporte. Cada um dos 10 ciclos executados, na aquisição dos dois fotopicos característicos da amostra de ^{60}Co para cada uma das 4 posições de prateleiras no teste de repetitividade, foi identificado com uma letra, que também seguiu a ordem alfabética de "A" até "J", como utilizado com o suporte fixo.

Na Tabela 6.8 são apresentados os valores obtidos das contagens por segundo (CPS), com o sistema do CANBERRA 06, para os dois fotopicos característicos do ^{60}Co , nas colunas seguintes são apresentados os valores corrigidos por conta do decaimento radioativo, além de informar a média dos dados, o desvio padrão e o valor percentual do desvio padrão relativo, e também o tempo

morto do sistema durante a aquisição de dados em (%), para a amostra posicionada na prateleira 0 do suporte automatizado.

TABELA 6.8 – Dados obtidos na posição de Prateleira 0 com o suporte automatizado.

Energia (keV): Amostras	Dados obtidos		Dados corrigidos		Tempo
	1173,240 (3) CPS	1332,508 (4) CPS	1173,240 (3) CPS	1332,508 (4) CPS	Morto (%)
A	434,063 (521)	385,703 (463)	434,06 (52)	385,70 (46)	8,44
B	434,679 (522)	386,273 (464)	434,69 (52)	386,29 (46)	8,42
C	434,802 (522)	386,921 (464)	434,83 (52)	386,95 (46)	8,42
D	434,882 (522)	385,599 (501)	434,93 (52)	385,64 (50)	8,43
E	435,433 (523)	385,648 (501)	435,50 (52)	385,71 (50)	8,42
F	436,081 (523)	386,218 (463)	436,26 (52)	386,37 (46)	8,43
G	435,576 (523)	386,030 (463)	435,77 (52)	386,20 (46)	8,40
H	435,597 (523)	386,540 (464)	435,80 (52)	386,72 (46)	8,44
I	434,718 (522)	385,698 (463)	434,94 (52)	385,90 (46)	8,44
J	434,115 (521)	386,937 (464)	434,45 (52)	387,24 (46)	8,43
Média			435,12 (52)	386,27 (47)	
Desvio Padrão			0,68	0,56	
Desvio Padrão relativo (em %)			0,16	0,14	

As Tabelas 6.9, 6.10 e 6.11, apresentam a mesma estrutura de informações contidas na Tabela 6.8, entretanto para a amostra posicionada respectivamente nas posições de prateleira 1, 2 e 3 do suporte automatizado.

TABELA 6.9 – Dados obtidos na posição de Prateleira 1 com o suporte automatizado.

Energia (keV): Amostras	Dados obtidos		Dados corrigidos		Tempo
	1173,240 (3) CPS	1332,508 (4) CPS	1173,240 (3) CPS	1332,508 (4) CPS	Morto (%)
A	146,424 (307)	131,105 (275)	146,42 (31)	131,11 (28)	2,93
B	146,647 (308)	130,632 (274)	146,65 (31)	130,64 (27)	2,92
C	146,504 (308)	130,505 (274)	146,51 (31)	130,51 (27)	2,92
D	147,091 (309)	130,762 (275)	147,11 (31)	130,78 (27)	2,93
E	147,198 (309)	130,404 (274)	147,22 (31)	130,42 (27)	2,92
F	146,805 (308)	130,241 (274)	146,86 (31)	130,29 (27)	2,92
G	146,285 (307)	130,851 (275)	146,35 (31)	130,91 (27)	2,92
H	146,906 (309)	130,821 (275)	146,97 (31)	130,88 (27)	2,92
I	146,898 (308)	130,373 (274)	146,97 (31)	130,44 (27)	2,92
J	147,127 (309)	129,994 (273)	147,24 (31)	130,10 (27)	2,87
Média			146,83 (31)	130,10 (27)	
Desvio Padrão			0,33	0,31	
Desvio Padrão relativo (em %)			0,22	0,24	

TABELA 6.10 – Dados obtidos na posição de Prateleira 2 com o suporte automatizado.

Energia (keV): Amostras	Dados obtidos		Dados corrigidos		Tempo
	1173,240 (3) CPS	1332,508 (4) CPS	1173,240 (3) CPS	1332,508 (4) CPS	Morto (%)
A	70,542 (212)	62,382 (187)	70,54 (21)	62,38 (19)	1,45
B	70,035 (210)	62,795 (188)	70,04 (21)	62,80 (19)	1,44
C	70,237 (211)	62,331 (187)	70,24 (21)	62,34 (19)	1,44
D	70,128 (210)	62,746 (188)	70,14 (21)	62,75 (19)	1,45
E	70,532 (212)	62,272 (187)	70,56 (21)	62,29 (19)	1,45
F	70,055 (210)	62,236 (187)	70,08 (21)	62,26 (19)	1,45
G	70,663 (212)	62,660 (188)	70,69 (21)	62,69 (19)	1,44
H	71,105 (213)	62,565 (188)	71,14 (21)	62,59 (19)	1,44
I	70,299 (211)	62,445 (187)	70,35 (21)	62,49 (19)	1,45
J	69,899 (210)	62,486 (187)	69,95 (21)	62,53 (19)	1,42
Média			70,37 (21)	62,51 (19)	
Desvio Padrão			0,37	0,19	
Desvio Padrão relativo (em %)			0,53	0,30	

TABELA 6.11 – Dados obtidos na posição de Prateleira 3 com o suporte automatizado.

Energia (keV): Amostras	Dados obtidos		Dados corrigidos		Tempo
	1173,240 (3) CPS	1332,508 (4) CPS	1173,240 (3) CPS	1332,508 (4) CPS	Morto (%)
A	39,991 (160)	35,806 (143)	39,99 (16)	35,81 (14)	0,86
B	40,394 (162)	35,929 (144)	40,40 (16)	35,93 (14)	0,86
C	40,213 (161)	35,842 (143)	40,22 (16)	35,84 (14)	0,87
D	40,405 (158)	35,918 (144)	40,41 (16)	35,92 (14)	0,87
E	40,373 (157)	35,771 (143)	40,39 (16)	35,78 (14)	0,87
F	40,158 (161)	35,937 (144)	40,17 (16)	35,95 (14)	0,87
G	40,361 (161)	35,826 (143)	40,38 (16)	35,84 (14)	0,86
H	40,576 (158)	35,691 (143)	40,60 (16)	35,71 (14)	0,87
I	39,991 (160)	35,895 (144)	40,02 (16)	35,92 (14)	0,86
J	40,193 (161)	35,817 (143)	40,22 (16)	35,84 (14)	0,86
Média			40,28 (16)	35,86 (14)	
Desvio Padrão			0,19	0,08	
Desvio Padrão relativo (em %)			0,47	0,22	

Assim como descrito anteriormente para os dados obtidos com o suporte fixo, foram utilizados os mesmos procedimentos ao aplicar o teste de repetitividade para as CPS mensuradas com o suporte automatizado, sendo utilizada a equação (3.31) para determinar o valor do índice de repetitividade (r) e a inequação (3.29) para verificar as combinações de dados que ficavam acima desse índice (r), além de apresentar também o valor percentual desses dados por meio da Tabela 6.12:

TABELA 6.12 – Resultado do índice de repetitividade (r), a quantidade de combinações de resultados na inequação que ficaram acima de (r) e da porcentagem dessas combinações discordantes de (r), nas prateleiras do suporte automatizado.

	1173,240 (3) keV			1332,508 (4) keV		
	Índice de Repetitividade (r)	Resultados discordantes de (r)		Índice de Repetitividade (r)	Resultados discordantes de (r)	
		(nº)	(%)		(nº)	(%)
Prateleira 0	1,915	1	2,2	1,560	1	2,2
Prateleira 1	0,919	0	0	0,873	1	2,2
Prateleira 2	1,021	3	6,7	0,541	0	0
Prateleira 3	0,528	2	4,4	0,216	2	4,4

7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após realizar o teste de repetitividade foram comparados os resultados obtidos dos espectros de energia emitidos pela fonte de ^{60}Co quando se utilizou o suporte fixo com os resultados adquiridos ao se utilizar o suporte automatizado. As Tabelas 7.1 e 7.2 reúnem algumas das principais informações de dados já apresentadas no capítulo 6, para facilitar a discussão deles nessa seção, mostrando o valor médio das CPS obtidas em cada uma das posições de prateleiras, os valores de desvio padrão e desvio padrão relativo para cada um dos grupos de dados, sendo que a primeira tabela se referente aos dados obtidos com o suporte fixo e a segunda aos dados obtidos com o suporte automatizado.

TABELA 7.1 – Dados obtidos com o suporte fixo.

	1173,240 (3) keV			1332,508 (4) keV		
	CPS médio	Desvio Padrão	Desvio	CPS médio	Desvio Padrão	Desvio
			Padrão			Padrão
			Relativo (%)			Relativo (%)
Prateleira 0	534,28 (59)	1,79	0,34	475,06 (52)	1,16	0,24
Prateleira 1	169,94 (32)	0,43	0,25	150,89 (30)	0,26	0,17
Prateleira 2	77,32 (22)	0,25	0,32	68,70 (20)	0,21	0,31
Prateleira 3	43,24 (16)	0,10	0,23	38,57 (15)	0,15	0,39

TABELA 7.2 – Dados obtidos com o suporte automatizado.

	1173,240 (3) keV			1332,508 (4) keV		
	CPS médio	Desvio Padrão	Desvio	CPS médio	Desvio Padrão	Desvio
			Padrão			Padrão
			Relativo (%)			Relativo (%)
Prateleira 0	435,12 (52)	0,68	0,16	386,27 (47)	0,56	0,14
Prateleira 1	146,83 (31)	0,33	0,22	130,10 (27)	0,31	0,24
Prateleira 2	70,37 (21)	0,37	0,53	62,51 (19)	0,19	0,30
Prateleira 3	40,28 (16)	0,19	0,47	35,86 (14)	0,08	0,22

Foi observado que as CPS obtidas com o suporte fixo para cada uma das 4 prateleiras estiveram na mesma ordem de grandeza das CPS obtidas com o suporte automatizado. Houve uma pequena diferença pelo fato das distâncias das prateleiras em relação ao detector de HPGe não serem exatamente as mesmas, pois as posições de prateleiras programadas no MARA, estão deslocadas 0,57 (10) cm estando mais distantes do detector do que as prateleiras do suporte fixo. Por exemplo, a prateleira 0 na configuração do MARA está a 0,90 (7) cm distante da superfície do detector, enquanto que a prateleira 0 do suporte fixo está a 0,33 (7) cm.

Ao analisar os resultados obtidos com o suporte automatizado para cada uma das 4 prateleiras (Tabela 7.2), nota-se que os desvios padrão apresentados são relativamente baixos, oscilando de 0,08 até 0,68. Isso aponta que houve uma baixa dispersão dos dados coletados, e eles variaram muito pouco em relação a um valor médio. Quando comparado os desvios padrão obtidos com o suporte fixo (apresentados na Tabela 7.1), com os desvios padrão obtidos com o suporte automatizado (Tabela 7.2), tem-se que em 5 casos, dos 8 totais, os dados obtidos com o MARA apresentando valores menores de desvios padrão. Com relação à informação do desvio padrão relativo percentual, que estima a precisão de uma média, pode-se observar na Tabela 7.2 que os dados obtidos com o suporte automatizado oscilaram de 0,14% a 0,53%. Portanto, mesmo para o maior valor obtido (medição da energia de 1173,240 (3) keV na prateleira 2), ainda é evidenciado um alto grau de concordância mútua entre as medidas individuais ou a reprodutibilidade das medidas, pois quanto menor for a dispersão dos dados maior será a precisão que eles apresentam.

Visando comparar os dois sistemas de suporte, são apresentadas as Figuras 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4 que ilustram os gráficos contendo a média normalizada dos pontos experimentais obtidos respectivamente nas posições de prateleiras 0, 1, 2 e 3, para as CPS correspondentes à energia de 1173,240 (3) keV tanto com o suporte fixo, quanto para o suporte automatizado (MARA). As Figuras 7.5, 7.6, 7.7 e 7.8 ilustram os gráficos contendo a média normalizada dos pontos experimentais obtidos respectivamente nas posições de prateleiras 0, 1, 2 e 3, para as CPS referentes à energia de 1332,508 (4) keV também para os dois tipos de suportes. Para viabilizar a comparação dos resultados obtidos pelos dois suportes em cada posição de prateleira foi necessária a padronização com a construção dos gráficos

por meio da média normalizada, uma vez que as médias das CPS obtidas com o suporte fixo são mais elevadas em relação às médias das CPS obtidas com o suporte automatizado, devido às diferenças na geometria já descritas. Esses gráficos apresentam uma faixa de incerteza que foi calculada com o desvio padrão dos dados da média normalizada, além de ilustrarem os pontos experimentais com as suas respectivas barras de erro, informadas pelo software Genie2k.

FIGURA 7.1 – Média normalizada e o desvio padrão para os dados referentes à energia de 1173,240 (3) keV, obtidos com o auxílio do suporte fixo e o MARA na posição de prateleira 0.

FIGURA 7.2 – Média normalizada e o desvio padrão para os dados referentes à energia de 1173,240 (3) keV, obtidos com o auxílio do suporte fixo e o MARA na posição de prateleira 1.

FIGURA 7.3 – Média normalizada e o desvio padrão para os dados referentes à energia de 1173,240 (3) keV, obtidos com o auxílio do suporte fixo e o MARA na posição de prateleira 2.

FIGURA 7.4 – Média normalizada e o desvio padrão para os dados referentes à energia de 1173,240 (3) keV, obtidos com o auxílio do suporte fixo e o MARA na posição de prateleira 3.

FIGURA 7.5 – Média normalizada e o desvio padrão para os dados referentes à energia de 1332,508 (4) keV, obtidos com o auxílio do suporte fixo e o MARA na posição de prateleira 0.

FIGURA 7.6 – Média normalizada e o desvio padrão para os dados referentes à energia de 1332,508 (4) keV, obtidos com o auxílio do suporte fixo e o MARA na posição de prateleira 1.

FIGURA 7.7 – Média normalizada e o desvio padrão para os dados referentes à energia de 1332,508 (4) keV, obtidos com o auxílio do suporte fixo e o MARA na posição de prateleira 2.

FIGURA 7.8 – Média normalizada e o desvio padrão para os dados referentes à energia de 1332,508 (4) keV, obtidos com o auxílio do suporte fixo e o MARA na posição de prateleira 3.

De acordo com os gráficos apresentados é possível observar que os dados experimentais das CPS com as suas respectivas barras de erro se enquadraram, em grande maioria, próximos ao valor da média normalizada e dentro da faixa de incerteza. Apenas em 3 dos 16 gráficos construídos foi possível identificar pontos fora desse limite, sendo encontrado 2 pontos externos à faixa de incerteza no gráfico da Figura 7.1 correspondente à prateleira 0 do suporte fixo, para a energia de 1173,240 (3) keV; 1 ponto na prateleira 2 do suporte automatizado para o mesmo tipo de energia; e 2 pontos na prateleira 1 do suporte automatizado para a energia de 1332,508 (4) keV. Isto pode ser atribuído à flutuação estatística já que foram obtidos 2 pontos discrepantes com o suporte fixo, para um total de 80 dados experimentais e 3 pontos discrepantes com o suporte automatizado para um total de também 80 dados experimentais, ambos compatíveis com o intervalo de confiança de 1σ .

Com relação ao teste de repetitividade aplicado, a Tabela 6.7 indica que quando utilizado o suporte fixo e aplicada a inequação (3.29) nos dados obtidos, são encontradas 10 comparações (em 360 efetuadas, ou seja menor que 3%) que

apresentam a diferença entre eles superior ao valor limitado pelo índice de repetitividade (r). Quando aplicada a mesma inequação (3.29) para os dados obtidos com o suporte automatizado, também 10 comparações (em 360 efetuadas) apresentaram a diferença entre eles superior ao valor limitado pelo índice de repetitividade (r). Portanto, o teste de repetitividade indica que os resultados obtidos com o MARA são equivalentes aos resultados obtidos com o suporte fixo, apresentando o mesmo grau de confiança no processo de aquisição de dados, sendo que em ambos os sistemas utilizados, apenas 2,8% das combinações entre os dados extrapolaram o limite imposto pelo teste de repetitividade.

Ao fazer uma análise para os dados obtidos, em cada uma das prateleiras e para os 2 fotopicos do ^{60}Co , foi observado que praticamente todas as interações de dados ficaram dentro do intervalo de 2σ , delimitados pelo teste de repetitividade, uma vez que menos de 5% das comparações obtidas com a inequação (3.29), por fotopico do ^{60}Co e por posição de prateleira, ficaram acima do índice de repetitividade. Nessa análise individualizada, apenas os dados obtidos com o MARA, na prateleira 2 e para a energia de 1173,240 (3) keV apresentou 6,7% das comparações (3 interações em 45 totais) acima do índice (r), conforme apresentado na Tabela 6.12. Como o desvio padrão (0,37) desses dados se encontra compatível com o valor da incerteza média (0,21), essa oscilação pode ser interpretada como uma flutuação estatística, devido ao processo de decaimento nuclear, e não é muito provável que seja de responsabilidade do sistema móvel automatizado. Outra observação realizada nessa posição de prateleira e para esse mesmo suporte é que o outro fotopico do ^{60}Co , correspondente a energia de 1332,508 (4) keV, apresentou todas as comparações de CPS adquiridas dentro do limite determinado pelo índice de repetitividade para aquele grupo de dados, indicando que nenhuma anormalidade por parte do sistema automatizado no posicionamento da amostra tenha ocorrido, reforçando assim o argumento utilizado anteriormente sobre esse evento indesejado das 6,7% das comparações estarem acima do índice (r), dos dados referentes à energia de 1173,240 (3) keV, ser uma flutuação estatística.

Nas Tabelas 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, 7.1 e 7.2 optou-se por informar a incerteza média dos dados para os valores “CPS médio”, pois a incerteza média dá uma noção da ordem de grandeza das incertezas dos dados obtidos, por

meio da flutuação estatística, que é sempre inerente nos fenômenos de origem nuclear.

8. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi projetado e confeccionado um suporte automatizado dotado de características que permitem a otimização de medidas de radioisótopos de meia-vida curta. Por meio da interface desenvolvida em Visual Basic foi permitido ao usuário que criasse e manipulasse a sua rotina de aquisições de dados de forma automatizada, levando praticidade à sua rotina de trabalho e evitando que o mesmo tivesse contato desnecessário com a fonte radioativa ao ter que efetuar a sua troca de posição em relação à superfície do detector. Esse sistema foi configurado de modo a não sobrecarregar o motor de passo e nem produzir ruído que cause desconforto ao operador.

De acordo com as ferramentas estatísticas utilizadas para os dados experimentais, foi possível obter uma boa resposta de uso por parte do suporte automatizado, indicando que a prateleira do MARA parou exatamente nas posições programadas, não evidenciando alterações de comportamento do motor de passo, ou falhas na execução da programação. Foi aplicado o teste de repetitividade mostrando que o sistema automatizado é confiável, e reproduz o sistema atualmente adotado pelo laboratório, com nível de confiança de 95%..

Nenhum inconveniente ocorreu durante as medições e aplicação do teste de repetitividade. O protótipo desenvolvido nesse projeto de mestrado, o MARA, não apresentou qualquer tipo de problema ao executar as suas tarefas, não apresentando travamento em nenhum momento ou quaisquer outros tipos de falhas durante as medições. Sempre respondeu de forma coerente à rotina programada pelo operador do sistema.

Ações futuras complementares podem ainda ser efetuadas para dar continuidade ao projeto, incluindo a expansão de seu uso e aplicação do movimentador de amostras radioativas automatizado em diversas áreas relacionadas à pesquisa científica, como a determinação dos valores de meia-vida em radioisótopo com curto tempo de meia-vida, na Análise por Ativação Neutrônica (AAN) e as medidas de fatores de interferência de produtos de fissão do Urânio para alguns radioisótopos sofrem severamente os efeitos ocasionados pela meia-vida curta, são alguns dos exemplos de aplicações que serão beneficiadas pelo dispositivo.

Uma importante tarefa para os usuários do sistema é a determinação da curva de eficiência para cada posição de prateleira, programada no MARA com os valores referentes ao suporte fixo, a fim de encontrar a relação das CPS em cada uma delas.

APÊNDICE A – EXPLICAÇÃO DETALHADA NO PROCESSO DE CONFECÇÃO DO MOVIMENTADOR DE AMOSTRAS RADIOATIVAS AUTOMATIZADO - MARA

Na seção 5 foi abordada de forma resumida os processos de desenvolvimento e confecção do movimentador de amostras radioativas automatizado, aqui serão apresentadas todas as etapas na elaboração da peça, sendo informada até as ferramentas utilizadas no software especializado em efetuar desenhos pelo computador. Dessa maneira, serão oferecidos elementos para que o leitor possa vir a reproduzir essa peça, caso julgue necessário.

Desenvolvimento da peça com o software do Autodesk

A peça foi confeccionada utilizando o software do Inventor Professional 2014, sendo dividida em 3 partes: O cilindro acoplador ao detector, a haste de sustentação e fixação no motor de passo, e a prateleira para posicionamento da amostra.

As três peças se iniciam da mesma maneira, devendo abrir o programa, selecionar um novo projeto e nos *Templates* clicar em *Metric* (para medidas baseadas no sistema internacional de medidas), e escolher o formato *Standard(mm).ipt* em “*Part – Create 2D and 3D objects*”. Depois clicar em “*Create 2D Sketch*” e selecionar um dos planos disponíveis. O desenvolvimento e a construção de cada uma das peças serão relatados a seguir.

Etapas de desenvolvimento do Cilindro

Para a confecção do cilindro acoplador ao detector, foi utilizada a ferramenta “*Circle – Center Point*” para projetar um círculo com 90 mm de diâmetro. Em seguida foi utilizada a ferramenta “*Extrude*” para que a peça adquirisse uma altura de 90 mm também, conforme ilustrado na Figura A.1. Caso tenha que ser corrigido o tamanho do diâmetro, selecionar a ferramenta “*Dimension*”, posicionando-a no círculo e digitar o valor correto do diâmetro desejado.

FIGURA A.1 – Utilização da ferramenta “*Extrude*” para confecção da peça cilíndrica.

Com a ferramenta “*Circle – Center Point*” foi desenhada uma circunferência de 65 mm de diâmetro, concêntrica à circunferência de 90 mm. Com a ferramenta “*Extrude*” foi feito um recorte na peça, utilizando a circunferência de 65 mm de diâmetro como referência, deixando o seu centro completamente oco, conforme ilustrado na Figura A.2.

FIGURA A.2 – Recorte no centro da peça com uma circunferência de 65 mm de diâmetro.

Na sequência foi desenhada uma circunferência de 77 mm de diâmetro, concêntrica a todas as outras anteriores. E foi aplicada a ferramenta “*Extrude*” numa determinada região da peça, recortando-a em 85 mm, conforme mostra a Figura A.3. O corpo cilíndrico do detector CANBERRA 06 possui 76,00 (5) mm de diâmetro, por isso projetou-se a peça com 77 mm de diâmetro de circunferência, para que o encaixe fosse bem rente entre os dois. A peça projetada possui de altura 90 mm, mas foi recortado apenas 85 mm, para que os 5mm restante funcionasse como um apoio do suporte projetado no topo do detector, evitando que todo o conjunto da prateleira automatizada deslizesse pelo corpo do detector. Porém não era interessante criar uma peça plástica que revestisse completamente a carcaça superior do detector, por isso foi mantida na sua extremidade superior uma abertura de uma circunferência com o diâmetro de 65 mm.

FIGURA A.3 – Recorte da peça em 85 mm de profundidade com uma circunferência de 77 mm de diâmetro.

Após a execução dessas etapas, o cilindro acoplador ao detector de radiação foi finalizado, e as Figuras A.4, A.5, A.6 e A.7 ilustram a peça concluída.

FIGURA A.4 – Parte superior da peça cilíndrica finalizada.

FIGURA A.5 – Parte inferior da peça cilíndrica finalizada.

FIGURA A.6 – Vista interior da peça cilíndrica finalizada.

FIGURA A.7 - Peça cilíndrica finalizada vista de perfil.

Etapas de desenvolvimento da Haste

A haste foi confeccionada com o intuito de fixar a peça plástica do cilindro acoplador ao detector, descrita anteriormente, com o trilho guia do motor de passo. Sendo que com esse o encaixe seria por meio de parafusos, e com aquele o encaixe ocorreria por meio de uma cola instantânea e potente como a da marca

Super Bonder. O trilho do motor de passo apresenta um cursor com 250 mm de extensão, porém apenas 200 mm de cursor útil, cuja a extensão foi aproveitada ao máximo para a projeção das distâncias entre as prateleiras do sistema automatizado. Outro problema limitante, que se levou em conta ao projetar a distância entre as prateleiras, é o fato do detector de HPGe do sistema CANBERRA 06 estar posicionado dentro de um invólucro de chumbo, que tem como função amenizar a radiação de fundo durante uma medida na aquisição de eventos nucleares, conforme ilustrado na Figura A.8. Diante disso, a distância entre o topo do detector até o teto da cabine de chumbo era de aproximadamente 235 mm.

FIGURA A.8 – Cabine de chumbo contendo o detector de HPGe no sistema CANBERRA 06.

A confecção da haste foi efetuada em três etapas, projetou-se primeiro a parte intermediária, a qual foi acoplada a peça plástica cilíndrica. Em seguida, foram confeccionadas as duas extremidades da haste, e por último projetou-se a marcação para o encaixe dos parafusos que fixariam a peça ao guia do motor de passo.

No software foi utilizada a ferramenta “*Rectangle – Two Point Center*” para desenhar um retângulo com 15 mm de base e 17 mm de comprimento. A haste foi pensada para ser uma estrutura quadrada com 15 mm de lado, entretanto como a parte central da haste tem que fazer a conexão com a peça cilíndrica, foi inserido 2 mm a mais de comprimento para que quando fizesse o encaixe entre as peças, não sobrasse um espaço vazio entre elas. Em seguida, com a ferramenta “*Extrude*” foi acrescentado uma altura de 90 mm ao retângulo, sendo esse o mesmo valor da altura do cilindro acoplador. Na Figura A.9 é ilustrada a forma inicial da haste projetada.

FIGURA A.9 – Confeção da parte central da haste retangular.

Depois de finalizada a construção da parte intermediária da haste, projetou-se as duas extremidades. Para a construção da extremidade superior foi desenhado um quadrado de 15 mm de lado, em cima do retângulo de 15 mm por 17 mm. Na sequência, com a ferramenta “*Extrude*” foi aplicada uma altura de 115 mm no quadrado desenhado, conforme ilustrado na Figura A.10. Já na extremidade inferior da haste foi repetido o procedimento de desenhar um quadrado com 15 mm de lado, em cima do retângulo de 15 mm por 17 mm, e com a ferramenta “*Extrude*” foi agregado a ele uma altura de 55 mm, conforme ilustrado na Figura A.11.

FIGURA A.10 – Confeção da parte superior da haste retangular.

FIGURA A.11 – Confeção da parte inferior da haste retangular.

O trilho metálico acoplado ao motor de passo já veio com algumas perfurações de 6,10 (5) mm de diâmetro, para o encaixe de parafusos com diâmetro de 3,00 (5) mm, por isso foi necessário construir na haste plástica as mesmas dimensões e distanciamento de perfurações para o encaixe dos parafusos. Essas marcações foram feitas na lateral da haste oposta ao encaixe com a peça cilíndrica, ou seja, elas foram feitas na lateral que ficaria em contato com o trilho do motor de passo. Para a construção dos furos na peça foram feitos sete circunferências com diâmetro de 3,2 mm, dispostas numa linha vertical ao longo da haste. Sendo que

os respectivos centros de cada uma dessas circunferências desenhadas foram distanciadas em relação à parte superior da haste em 12,5 mm; 52,5 mm; 92,5 mm; 132,5 mm; 172,5 mm; 212,5 mm e 252,5 mm, conforme mostrado na Figura A.12.

FIGURA A.12 – Marcações circulares para encaixe de parafusos na peça retangular da haste.

Entretanto, somente quando todas as circunferências já haviam sido desenhadas, alinhadas e distanciadas corretamente na haste, foi que se utilizou a ferramenta “*Extrude*”, simultaneamente, em todas as circunferências desenhadas na haste. Para que fosse criado o efeito de perfuração e que a peça ficasse completamente vazada, como ilustrado na Figura A.13. A aplicação tem que ser simultânea, pois quando se utiliza a ferramenta “*Extrude*” numa região da peça, os demais desenhos são automaticamente apagados, o que faria perder os desenhos das outras circunferências projetadas.

FIGURA A.13 – Recorte cilíndrico das marcações efetuadas na haste.

Na lateral da haste oposta aonde foram feitas as perfurações para o encaixe dos parafusos, ou seja, na lateral em que se dará a junção com cilindro plástico, foram feitas marcações em sextavado para o encaixe e fixação de porcas que ajudarão a prender os parafusos. Com a ferramenta “*Polygon*” foi desenhado o sextavado com 3,7 mm de lateral, cujo centro foi posicionado sobre o centro de cada uma das 7 circunferências que perfuraram a haste. A ferramenta “*Extrude*” foi utilizada para projetar na peça um polígono de 6 faces com 8mm de profundidade, conforme ilustrado na Figura A.14. Nessa lacuna gerada foi inserida uma porca rosqueada também no formato sextavado com 3,50 (5) mm de lateral, para fixar o parafuso adequadamente. No projeto, o espaço construído para encaixar a porca possui 0,2 mm de lateral a mais que o tamanho real da lateral do objeto metálico, pois a impressora 3D possui uma imprecisão excedente de 0,1 mm em relação ao esquema desenhado no Autodesk Inventor. O que fará o encaixe da porca ser perfeito, na lacuna projetada.

FIGURA A.14 – Recorte sextavado na haste retangular, para encaixe das porcas metálicas.

Para finalizar, na parte central da haste, com a ferramenta “*Circle – Center Point*”, foi feito o desenho de uma circunferência com 90 mm de diâmetro, e ajustado o para que o centro dela ficasse a uma distância de 45 mm de uma das bordas da base da haste (com medida de 15 mm), conforme ilustrado na Figura A.15. A circunferência desenhada tem a função de recortar uma das extremidades da haste, para que o encaixe com a peça plástica cilíndrica projetada na seção anterior seja perfeito, e preencha a lateral da peça ao efetuar a colagem entre elas. Entretanto, esse recorte cilíndrico teve que ser o último procedimento a ser realizado na haste, por causa da marcação dos orifícios para encaixe dos parafusos na peça. O software utilizado só permite a construção de desenhos e abertura de fendas em superfícies planas. Por isso, esse recorte só pôde ser feito após a finalização da marcação e perfuração de todos os receptores de parafusos na haste.

FIGURA A.15 – Acabamento cilíndrico, na parte central, em uma das laterais da haste.

Após a execução dessas etapas, a haste que tem como intuito fixar a peça plástica do cilindro acoplador ao detector, com o trilho guia do motor de passo foi finalizada. Nas Figuras A.16 e A.17 é ilustrada a peça concluída.

FIGURA A.16 – Vista traseira da haste finalizada.

FIGURA A.17 – Vista frontal da haste finalizada.

Etapas de desenvolvimento da Prateleira

Na confecção da prateleira para efetuar o posicionamento da amostra radioativa, foi feita a escolha da ferramenta “*Circle – Center Point*” para projetar um círculo com 90 mm de diâmetro. Na sequência, com a ferramenta “*Rectangle – Two Point Center*” foi desenhado um retângulo de 35 mm altura por 25 mm de base, próximo ao círculo. Com a ferramenta “*Dimension*” foi alinhado o centro do círculo e o centro do retângulo, inserindo o valor 0 mm como referência. Dessa forma, o centro do círculo tem que se encontrar, na vertical, distante da base do retângulo em 17,5 mm, que é a metade de 35 mm, conforme ilustrado na Figura A.18. Na sequência com a mesma ferramenta foi feito com que o centro do círculo ficasse distante do centro do retângulo em 49,5 mm, conforme ilustrado na Figura A.19.

FIGURA A.18 – Ajuste e nivelamento de centros: cilindro e retângulo.

FIGURA A.19 – Ajuste para confecção da base da prateleira.

Como visto anteriormente, a largura da haste foi projetada com 15 mm e quando acoplada ao cilindro com raio de 45 mm, a peça completa totalizou um tamanho de 60 mm. A prateleira em confecção tem que estar alinhada com o cilindro acoplado ao detector, porém ela não ficará afixada ao mesmo trilho do motor de passo que prende a haste plástica, sendo presa a uma peça metálica móvel, que usa o trilho do motor de passo como guia. Essa peça móvel está posicionada 2 mm atrás do trilho do motor de passo aonde a peça da haste plástica

foi afixada, totalizando 62 mm de distância até o centro da prateleira cilíndrica. Para chegar a esse valor (de 62 mm) foi somado os 45 mm de raio da parte cilíndrica com 17 mm da haste retangular, gerando a distância de 49,5 mm do centro do cilindro até o centro da peça retangular. Sendo que do centro da peça retangular até a sua extremidade, existe 12,5 mm de distância. Com a ferramenta “*Extrude*” a peça que está em 2 dimensões ficará com 3 dimensões, devendo selecionar tanto o cilindro como o retângulo desenhado para aplicar uma altura de 6 mm, conforme ilustrado na Figura A.20.

FIGURA A.20 – Aplicação da ferramenta “*Extrude*” na base da prateleira projetada.

Em seguida, na parte retangular da peça foi desenhado com a ferramenta “*Rectangle – Two Point*” um quadrilátero de 19 mm de base por 6 mm de altura, deixando-o centralizado e sobrando 8 mm em cada uma das laterais em relação à peça maior, conforme ilustrado na Figura A.21.

FIGURA A.21 – Marcação retangular na peça.

Nesse quadrilátero desenhado, foi utilizada novamente a ferramenta “*Extrude*”. Entretanto, o intuito não era aumentar ou alongar mais a peça, e sim cortá-la em 20 mm, conforme mostrado na Figura A.22. Pois essa fenda retangular de 19 mm de largura por 20 mm de comprimento criada na peça da prateleira, possui o espaço adequado para passar o trilho do motor de passo, com aproximadamente 15 mm de largura por 17 mm de comprimento.

FIGURA A.22 – Recorte retangular na peça.

Após essas etapas, concêntrico à circunferência com 90 mm de diâmetro da peça, foi construída uma circunferência menor, com o diâmetro de 34 mm. A ferramenta “*Extrude*” foi aplicada a esse objeto desenhado, com o intuito de cortar a peça em 3 mm. Gerado uma região circular rebaixada na prateleira, sem perfurá-la, conforme mostrado na Figura A.23. Essa região mais profunda tem a função de criar uma marcação na prateleira, para facilitar o posicionamento e encaixe de amostras radioativas contidas num recipiente conhecido popularmente como “panelinha”, cujo diâmetro corresponde a 31,60 (5) mm.

FIGURA A.23 – Marcação e recorte cilíndrico na prateleira, para posicionamento das amostras radioativas.

Para finalizar a peça, foi projetado os orifícios pelos quais se encaixariam os parafusos com 2,90 (5) mm de diâmetro, que prenderiam a peça plástica ao conector metálico móvel da haste do motor de passo. Para isso foi desenhado 2 circunferências com 3,1 mm de diâmetro, cujo os centros estavam separados por uma distância de 25 mm. E ao mesmo tempo o centro dessas circunferências estavam a uma distância de 3mm da borda da peça plástica, conforme ilustrado na Figura A.24. O dispositivo móvel no trilho do motor de passo, ao qual será parafusado essa peça plástica confeccionada, já apresentava orifícios sulcados, separados a uma distância de 25 mm, para encaixe de parafusos com 3,00 (5) mm de diâmetro.

FIGURA A.24 – Marcação circular na peça, para encaixe de parafusos.

Após projetar as circunferências na peça para o encaixe dos parafusos, foi utilizada a ferramenta “*Extrude*”, em cada uma delas, para a criação de cavidades com 16 mm de profundidade, conforme ilustrado na Figura A.25.

FIGURA A.25 – Recorte cilíndrico na peça, para encaixe de parafusos.

Após a execução dessas etapas, a confecção da prateleira para o suporte de amostras radioativas foi finalizada, as Figuras A.26, A.27, A.28 e A.29 ilustram a peça concluída.

FIGURA A.26 – Vista superior da prateleira finalizada.

FIGURA A.27 – Vista frontal da prateleira finalizada.

FIGURA A.28 – Vista traseira da prateleira finalizada.

FIGURA A.29 – Prateleira finalizada vista de perfil.

Confecção das peças na impressora 3D

Depois de utilizar o software do Autodesk Inventor para projetar as 3 peças que formam o suporte automatizado, elas foram reproduzidas numa impressora 3D. Entretanto, para submeter o projeto a uma impressora 3D foi necessário transformá-lo num arquivo de extensão (*.stl). Para efetuar essa conversão abriu-se o ícone (I pro) posicionado na parte superior da lateral esquerda

da tela de trabalho do Autodesk Inventor, selecionou-se a função [*Export*], depois [CAD Format], e na aba aberta escolheu-se o formato do tipo “STL Files (*.stl)” para gerar o arquivo a ser impresso em 3D.

Inicialmente, foi projetada uma única peça que apresentava a haste que seria fixada ao trilho do motor de passo fundida com o cilindro acoplador ao detector. Porém, as dimensões dessa peça única ultrapassavam os limites disponíveis na máquina da impressora 3D utilizada. Por isso, para que se tornasse viável a impressão, a peça foi fragmentada em duas partes, e depois de estarem confeccionadas, elas foram novamente unidas utilizando a cola da marca Super Bonder.

APÊNDICE B – PROGRAMAÇÃO DESENVOLVIDA PARA O ARDUÍNO

Nesse apêndice serão apresentadas as linhas de código desenvolvido para que o Arduíno pudesse controlar o motor de passo do sistema do MARA.

```
// Andares posicionados de acordo com o suporte antigo.

#include <AFMotor.h> //Biblioteca do Driver para o Stepper Motor

#include <EEPROM.h> //Biblioteca para ativar o comando de memória

char teclaDigitada; //Variável lê e grava a tecla digitada

int passo=0; //Declara a variável "passo" igual a Zero

AF_Stepper motor(200, 1); //Número de passos por volta e a porta em que o motor está
conectado

//Declaração de variáveis no lugar no nº de passos, para facilitar a substituição ou troca de
informações em todo o código de programação.

int andar0=0;

int andar1=1575;

int andar2=3130;

int andar3=4720;

void setup() {

    Serial.begin(9600); //Inicia comunicação serial a 9600 baud

    EEPROMRead(); //Função que vai recuperar a informação da variável passo q ficou gravada na
memória do Arduíno (para leitura e informar esse valor na tela)

    Serial.print("Passos dados pelo motor: "); //Exibe mensagem para informar o nº de passo
gravado na memória
```

```
Serial.print(EEPROMRead()); //Informa o n° do passo gravado na memória

Serial.println("  Insira o andar da prateleira e pressione Enter"); //Exibe mensagem de boas vindas


motor.setSpeed(300); //Seta a velocidade do giro do motor de passo

motor.release(); //Reseta a corrente nos pinos do motor


recupera(); //Função que vai recuperar a informação da variável passo q ficou gravada na memória do Arduíno (para fazer o reconhecimento do andar parado)

}

void loop() {

  if (Serial.available() > 0) { //Verifica se chegou algo pela serial

    teclaDigitada = Serial.read(); //Lê a serial e coloca o valor na variável teclaDigitada


    Serial.print("Foi digitado: "); //Imprime na Serial o valor recebido

    Serial.println(teclaDigitada); //Verifica se a letra a foi digitada


    if (passo==andar0) { //Elevador está no Andar 0

      switch (teclaDigitada) {

        case '0':

          break;


        case '1':

          do {

            motor.step(1, FORWARD, SINGLE); //(Número de passos, sentido Horário, tipo do passo)

            passo++;

          } while(passo<andar1);

        }

      }

    }

  }

}
```

```
        if (passo==andar1){
            motor.release();
        }
        break;

    case '2':
        do {
            motor.step(1, FORWARD, SINGLE); //(Número de passos, sentido Horário, tipo do
passo na alimentação da bobina)
            passo++;
        } while(passo<andar2);
        if (passo==andar2){
            motor.release();
        }
        break;

    case '3':
        do {
            motor.step(1, FORWARD, SINGLE); //(Número de passos, sentido Horário, tipo do
passo na alimentação da bobina)
            passo++;
        } while(passo<andar3);
        if (passo==andar3){
            motor.release();
        }
        break;
    }
}
```

```
if (passo==andar1){ //Elevador está no Andar 1

    switch (teclaDigitada){

        case '0':

            do {

                motor.step(1, BACKWARD, SINGLE); //(Número de passos, sentido Anti-horário, tipo
do passo na alimentação da bobina)

                passo--;

            } while(passo>andar0);

            if (passo==andar0){

                motor.release();

            }

            break;

        case '1':

            break;

        case '2':

            do {

                motor.step(1, FORWARD, SINGLE); //(Número de passos, sentido Horário, tipo do
passo na alimentação da bobina)

                passo++;

            } while(passo<andar2);

            if (passo==andar2){

                motor.release();

            }

            break;
```

```

    case '3':
        do {
            motor.step(1, FORWARD, SINGLE); //(Número de passos, sentido Horário, tipo do
passo na alimentação da bobina)
            passo++;
        } while(passo<andar3);
        if (passo==andar3){
            motor.release();
        }
        break;
    }
}

if (passo==andar2){ //Elevador está no Andar 2
    switch (teclaDigitada){
        case '0':
            do {
                motor.step(1, BACKWARD, SINGLE); //(Número de passos, sentido Anti-horário, tipo
do passo na alimentação da bobina)
                passo--;
            } while(passo>andar0);
            if (passo==andar0){
                motor.release();
            }
            break;

        case '1':
            do {

```

```
        motor.step(1, BACKWARD, SINGLE); //(Número de passos, sentido Anti-horário, tipo
do passo na alimentação da bobina)
```

```
        passo--;
```

```
    } while(passo>andar1);
```

```
    if (passo==andar1){
```

```
        motor.release();
```

```
    }
```

```
    break;
```

```
case '2':
```

```
    break;
```

```
case '3':
```

```
    do {
```

```
        motor.step(1, FORWARD, SINGLE); //(Número de passos, sentido Horário, tipo do
passo na alimentação da bobina)
```

```
        passo++;
```

```
    } while(passo<andar3);
```

```
    if (passo==andar3){
```

```
        motor.release();
```

```
    }
```

```
    break;
```

```
    }
```

```
}
```

```
if (passo==andar3){ //Elevador está no Andar 3
```

```
    switch (teclaDigitada){
```

```
        case '0':
```



```
do {  
    motor.step(1, BACKWARD, SINGLE); //(Número de passos, sentido Anti-horário, tipo  
do passo na alimentação da bobina)  
    passo--;  
} while(passo>andar0);  
if (passo==andar0){  
    motor.release();  
}  
break;  
  
case '1':  
do {  
    motor.step(1, BACKWARD, SINGLE); //(Número de passos, sentido Anti-horário, tipo  
do passo na alimentação da bobina)  
    passo--;  
} while(passo>andar1);  
if (passo==andar1){  
    motor.release();  
}  
break;  
  
case '2':  
do {  
    motor.step(1, BACKWARD, SINGLE); //(Número de passos, sentido Anti-horário, tipo  
do passo na alimentação da bobina)  
    passo--;  
} while(passo>andar2);  
if (passo==andar2){  
    motor.release();
```

```

    }

    break;

    case '3':

        break;

    }

}

```

EEPROMWrite(); //No final da execução do programa, a variável "passo" é salva no compartimento de memória da EEPROM.

```

}

}

void EEPROMWrite() //Comando para gravar a informação em duas posições da EEPROM
{

    byte a=((passo>>0) & 0xFF); //Cria o fragmento menos significativo na memória, chamado
    "byte a"

    byte b=((passo>>8)& 0xFF); //Cria o fragmento mais significativo na memória, chamado "byte
    b"

    EEPROM.write(3,a); //Grava na posição "3" da memória a informação fragmentada da
    variável, que foi chamada de byte "a".

    EEPROM.write(4,b); //Grava na posição "4" da memória a informação fragmentada da
    variável, que foi chamada de byte "b".

}

```

unsigned int EEPROMRead() //Comando para leitura da informação em duas posições da EEPROM

```

{

    byte a=EEPROM.read(3); //Leitura do "byte a" que está no compartimento "1" da posição da
    memória.

    byte b=EEPROM.read(4); //Leitura do "byte b" que está no compartimento "2" da posição da
    memória.

```

```
    return ((a<<0) & 0xFF)+((b<<8) & 0xFF00); //Comando para retornar ao valor inteiro de 16 bits.
}

void recupera() //Vai fazer a leitura da Memória
{
    passo = EEPROMRead(); //Faz a variável "passo" ficar com o valor de leitura da
    "EEPROMRead()" que ficou salva na memória de forma fragmentada, com o comando
    (EEPROMRead())

    if (passo == 0xff) passo=0; //Se a memória estiver vazia, o programa não trava com esse
    comando.
}
```

APÊNDICE C – INSTRUÇÕES DE UTILIZAÇÃO E MANIPULAÇÃO DA INTERFACE PARA AQUISIÇÃO AUTOMATIZADA DE DADOS

Nesta seção serão apresentadas as instruções para que se efetue, no sistema do CANBERRA 06, a aquisição automatizada de dados.

Primeiramente, o usuário deve se certificar de que o conjunto do sistema (*programming*, interface e o arquivo gerado controle.txt) esteja localizado no mesmo diretório para que o programa seja executado corretamente. Além disso, o microcontrolador Arduíno (responsável por movimentar o motor de passo do MARA) também deve ser instalado e conectado à interface USB do sistema. Existe a possibilidade do *programming* ser executado em outro computador, mas desde que o “controle.txt” gerado seja colocado no mesmo diretório do programa interface.

Há dois processos para executar a interface: diretamente do *programming*, ou através do *winrexx* (que já possui um atalho na área de trabalho e no menu iniciar). O *programming* é constituído por cinco janelas, sendo que a janela Principal é a primeira que o operador terá contato e a partir dela se tem acesso às demais janelas, como ilustrado na Figura C.1a. A janela da Área de Trabalho, que pode ser vista na Figura C.1b, apresenta os diretórios contendo a programação que fornecerá os comandos ao microcontrolador e ao software de aquisição Genie2k. Na Figura C.1d é possível visualizar a janela que contém as instruções do uso desse sistema automatizado. A janela com a Listagem do Processo de Medidas mostra toda a rotina de trabalho digitada pelo operador, enquanto que a janela de Detalhamento de Tempo e Temperatura é espaço destinado para que o operador crie a sua rotina de tarefas, sendo apresentadas respectivamente pelas Figuras C.1c e C.1e.

FIGURA C.1 – Janelas do *programming*: a) Janela Principal; b) Janela da Área de Trabalho; c) Janela com a Listagem do Processo de Medidas; d) Janela com Orientação para Inicialização; e) Janela de Detalhamento de Tempo e Temperatura.

Para iniciar a execução do programa, caso não seja encontrado o ícone de atalho na área de trabalho do computador, o *programming* é iniciado da seguinte maneira: ao clicar em [Iniciar], [Programas] deve ser selecionado, depois escolher a pasta [Elevador] para clicar em [ProgExe], que imediatamente já exibe na área de trabalho a Janela Principal (Figura C.1a). Nessa Janela Principal o usuário deve clicar no menu [Diretório], para que a janela Área de Trabalho seja aberta, conforme ilustrado na Figura C.2. Nessa janela, inicialmente, deve-se escolher o diretório para edição dos arquivos “controle.txt” e “programação.txt”, e isso ocorre ao selecionar o diretório (C:\) e ativar a pasta [Elevador]. Mesmo que a pasta [Elevador] já esteja inicialmente selecionada, o procedimento deve ser efetuado, a fim de evitar falhas na execução do programa. Após essa escolha, o botão [Editar Programação] é habilitado.

FIGURA C.2 – Seleção do diretório para execução do *programming*.

Ao clicar no botão [Editar Programação], são abertas simultaneamente as janelas de Detalhamento de Tempo e Temperatura (para o usuário inserir a programação da sua rotina de trabalho) e Listagem do Processo de Medidas (que apenas mostra o que foi digitado e programado pelo operador). Havendo o arquivo de controle no diretório, este será listado na janela, conforme Figura C.3.

O processo de programar a rotina de tarefas é bem intuitivo, e autoexplicativo, sendo necessário apenas acionar os botões correspondentes ao que se deseja e a listagem será preenchida. Nesse processo, o usuário deve digitar um nome (de sua escolha) para o arquivo a ser salvo, a fim de localizar depois as aquisições efetuadas pelo sistema. Para cada uma das medições, o usuário pode escolher se a aquisição será realizada em tempo vivo ou tempo real, além dele definir o número de medidas que ele deseja efetuar. Cada linha que aparecer na janela (Listagem de Processo de Medidas) faz referência a uma tarefa, dentro da

rotina de trabalho, a ser executada pelo programa na ordem crescente em relação à numeração da medida programada, devendo em cada uma dessas linhas ser definida a posição de prateleira em que se deseja produzir a aquisição, informar a quantidade de vezes que se pretende repetir essa medida, e estabelecer o intervalo de tempo em segundos para que as contagens sejam efetuadas. Uma vez programada uma linha no processo de aquisição automatizado, o operador pode adicionar ainda mais dezenove comandos para o mesmo arquivo dessa rotina de tarefas, inserindo novamente as informações de posição de prateleira, quantidade de vezes que deve ser repetida essa medida e o intervalo de tempo da aquisição.

FIGURA C.3 – Edição da programação da rotina de tarefas na janela (Detalhamento de Tempo e Temperatura) e roteiro do que foi programado na janela (Listagem do Processo de Medidas).

Após programar, o usuário clica no botão [Finalizar] e o arquivo controle.txt será alterado, bem como o programa.txt. Nestas condições as janelas de listagem e programação fecham-se, mas podem ser abertas de acordo com a necessidade do usuário. Na Figura C.4 podem ser visualizados, depois do operador finalizar a sua rotina de tarefas, a janela contendo a listagem do *programming* e o arquivo de programação.txt.

FIGURA C.4 – Janelas: a) Listagem do Processo de Medidas; b) programação.txt.

Para que se inicie a execução da rotina de tarefas programada, o usuário deve clicar na janela Principal em [Automático] e selecionar a opção [Execução], conforme ilustrado na Figura C.5. Realizado esse procedimento, o controle é passado para o programa interface e o *programming* é finalizado.

FIGURA C.5 – Instruções de inicialização da rotina de tarefas programada pelo usuário na aquisição de dados automatizado.

Depois de realizada todas as medições programadas, o operador localiza no computador todos os arquivos de extensão (.CHN), contendo o nome digitado por ele no processo de programação da rotina de tarefas, para efetuar a leitura de suas aquisições executadas.

Se o operador desejar converter o arquivo (.CHN) em (.TXT), deve realizar os seguintes procedimentos: Primeiro deve carregar o arquivo (.CHN) no programa (*Analyze Gamma*), do software Genie2k. Para que o programa faça a leitura do espectro de radiação, registrado no arquivo, é necessário clicar em [Analyse] e selecionar a opção [1. Execute Sequence], para escolher [Analyse de Picos (Tela)]. Com o espectro gerado, o usuário clica em [Options], escolhendo a opção [Report Window], para selecionar [Copy contents to Clipboard], dessa forma todos os dados numéricos gerados com a análise do software Genie2k são copiados. Um programa básico para edição de textos como o Bloco de Notas deve ser aberto e para inserir as informações copiadas utiliza-se o comando “Ctrl+v”. Esse arquivo de texto pode ser salvo com o nome que o operador desejar. Para apagar as análises geradas no software Genie2k, o usuário deve clicar em [Options], escolher novamente a opção [Report Window] e selecionar a função [Clear Contents].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aplicativo de celular “dB Sound Meter”, disponível em <<https://www.appannie.com/apps/ios/app/dbsoundmeter>>, acesso em 04/01/2016.

AUTODESK INVENTOR 2014 PROFESSIONAL. Disponível em <<http://www.autodesk.com/education/free-software/inventor-professional>>. Acesso em 30/04/2015.

BANZI, M.; CUARTIELLES, D.; IGOE, T.; MARTINO, G.; & MELLIS, D.. **Arduino, 2006**. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/>>. Acesso em 04/10/2015.

BRAMBILLA, T. P.. **Desenvolvimento de método para marcação de DMSA pentavalente com ^{99m}Tc e ^{188}Re** . 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nuclear, São Paulo, 2009.

CASTRO, A. F. R. et al.. **Validação de métodos internos de ensaio em análise química**. Guia RELACRE 13. Disponível em <<http://www.relacre.pt/assets/relacreassets/files/commissionsandpublications/Guia%20RELACRE%2013.pdf>>. Acesso em 30/04/2015.

CHUI, Q. S. H.; BARROS, C. B.; SILVA, T. D.. **Parâmetros r e R obtidos de programa interlaboratorial – como usá-los**. Química Nova, v.32, n.8. São Paulo, 2009.

EISBERG, R.; RESNICK, R.. **Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. 24.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 1979.

HOUTERSMANS, H.; SCHÄF, K.; REICHEL, F.; & DEBERTIN, K.. **International Comparison of Methods to Test the Validity of Dead-Time and Pile-Up Corrections for High Precision Gamma Ray Spectroscopy, Int. J. Appl. Rad. Isotope**, 1983.

INMETRO, 2010. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/CGCRE/DOQ/DOQ-CGCRE-8_03.pdf>. Acesso em 04/01/2016.

ISO 5725-2:1994. **Accuracy (trueness and precision) of Measurement Methods and Results. Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method**. International Organization for Standardization, Geneva, 1998.

KNOLL, G. F.. **Radiation Detection Measurement**. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.

LNHB. Laboratoire National Henri Becquerel. Table of radionuclides, Recommended data, updated: 19th November 2015. Disponível em <http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm>. Acesso em 13/12/2015.

MANN, P. S.. ***Introdução à Estatística***; tradução Eduardo Benedito Curtolo, Teresa Cristina Padilha de Souza. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

PETROUTSOS, E.. ***Dominado o Visual Basic 6***. São Paulo: Makron Books: 1999. Disponível em <<https://msdn.microsoft.com/pt-br/library/2x7h1hfk.aspx>>. Acesso em 13/10/2015.

VAGHETTI, C. A. O.; ROESLER, H.; ANDRADE, A.. ***Tempo de reação simples auditivo e visual em surfistas com diferentes níveis de habilidades: comparação entre atletas profissionais, amadores e praticantes***. Revista Brasileira de Medicina do Exercício e do Esporte, v.13, n.2, abr. 2007.

YOSHIMURA, E. M.. ***Física das Radiações: Interação da radiação com a matéria***. Revista Brasileira de Física Médica, v. 3, p.57-67, fev. 2009.

ZAHN, G. S.; DOMIENIKAN, C.; CARVALHAES, R. P. M.; GENEZINI, F. A.. ***Development of a time-variable nuclear pulser for half life measurements***. 2013.