



ESPECTROMETRIA DE NÊUTRONS DA FONTE DE $^{241}\text{Am-Li}$ UTILIZANDO O
SISTEMA DE MULTIESFERAS DE BONNER E A DECONVOLUÇÃO
EM REDES NEURAIAS

Victor Rocha Carvalho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2024

ESPECTROMETRIA DE NÊUTRONS DA FONTE DE $^{241}\text{Am-Li}$ UTILIZANDO O
SISTEMA DE MULTIESFERAS DE BONNER E A DECONVOLUÇÃO
EM REDES NEURAIAS

Victor Rocha Carvalho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Aprovada por: Prof. Ademir Xavier da Silva
Dr. Walsan Wagner Pereira
Dr. César Marques Salgado

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2024

Carvalho, Victor Rocha

Espectrometria de Nêutrons da fonte de $^{241}\text{Am-Li}$ utilizando o Sistema de Multiesferas de Bonner e a Deconvolução em Redes Neurais/ Victor Rocha Carvalho. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XIII, 38 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Nuclear, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 36 - 38.

1. Nêutrons. 2. Física Nuclear. 3. Metrologia. I. Silva, Ademir Xavier da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

Agradecimentos

Agradeço a Clara Velloso, minha companheira, que sempre me incentivou, me apoiou, me acalmou e esteve do meu lado num dos piores momentos da minha vida. Sem você, eu jamais teria conseguido ultrapassar nenhum obstáculo.

Agradeço ao meu orientador Prof. Ademir a toda ajuda, atenção e ensinamentos que me prestou durante o mestrado.

Agradeço ao Prof. Walsan por sempre me orientar desde a graduação. Sem seus ensinamentos e ideias esse trabalho não seria possível.

E gostaria de agradecer a Xara, que me fez companhia em toda a escrita da minha dissertação.

“Nada consegue suprimir a curiosidade de um humano”

Hajime Isayama

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESPECTROMETRIA DE NÊUTRONS DA FONTE DE $^{241}\text{Am-Li}$ UTILIZANDO O SISTEMA DE MULTIESFERAS DE BONNER E A DECONVOLUÇÃO EM REDES NEURAS

Victor Rocha Carvalho

Fevereiro/2024

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Programa: Engenharia Nuclear

Entre as aplicações da fonte $^{241}\text{AmLi}$ estão a espectrometria e dosimetria de nêutrons e a calibração de fluência de monitores de nêutrons. Contudo, ainda existem uma série de empecilhos para o uso dessa fonte na maioria dos laboratórios. Isso porque, as suas características físicas ainda são mal documentadas e variam entre fabricantes, além de existirem complicações na ordem de grandeza física para geração de nêutrons. Assim, este trabalho pretende obter o espectro de nêutrons e debater sobre os problemas da fonte. Utilizou-se a Espectrometria de Multiesfera de Bonner para obter a energia média, a taxa de fluência e as grandezas de radioproteção, tais como a equivalente de dose individual e a ambiente da fonte de nêutrons $^{241}\text{AmLi}$ pertencente ao Laboratório de Metrologia de Nêutrons – LN/IRD. As medições da fonte foram efetuadas com seis diferentes moderadores esféricos de polietileno em torno de um detector de nêutrons térmicos do tipo cintilador $^6\text{LiI(Eu)}$. Através disto, o espectro de nêutrons foi obtido por meio do *software* NeuraLN, desenvolvido pelo LN, que utiliza a técnica de redes neurais. Foi obtido um resultado de energia média condizente com a literatura e assim, é admissível propor um possível padrão de energia média da fonte de $^{241}\text{AmLi}$.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

NEUTRON SPECTROMETRY OF THE $^{241}\text{Am-Li}$ SOURCE USING THE BONNER
MULTISPHERE SYSTEM AND NEURAL NETWORK DECONVOLUTION

Victor Rocha Carvalho

February/2024

Advisor: Ademir Xavier da Silva

Department: Nuclear Engineering

Applications of the $^{241}\text{AmLi}$ source include neutron spectrometry and dosimetry, and fluence calibration of neutron monitors. However, there are still several barriers to the use of this source in most laboratories. This is because its physical properties are still poorly documented and vary between manufacturers, as well as complications in the physical order of magnitude for neutron generation. Therefore, the aim of this work is to find its spectrum and to discuss the problems of the source. We used Bonner Multisphere Spectrometry to obtain the average energy, fluence rate and radiation protection quantities such as individual equivalent dose and ambient of the $^{241}\text{AmLi}$ neutron source used in the Neutron Metrology Laboratory - LN/IRD. Source counts were performed with six different polyethylene spherical moderators around a $^6\text{Li(Eu)}$ scintillator type thermal neutron detector. The neutron spectrum was then obtained using the LN-developed NeuraLN software, which uses the neural network technique. An average energy result was obtained which agrees with the literature. It is therefore possible to propose a possible average energy pattern for the $^{241}\text{AmLi}$ source.

Sumário

1. Introdução	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Revisão De Literatura	2
2. Fundamentos Teóricos	6
2.1 Física Nuclear	6
2.1.1. Radiação Ionizante.....	6
2.1.2. Radiação Cósmica.....	6
2.1.3. Radiação Alfa (α).....	7
2.1.4. Radiação Beta (β)	7
2.1.5. Radiação Gama (γ).....	8
2.1.6. Radiação X.....	8
2.1.7. Nêutrons.....	9
2.1.7.1. Uma breve história sobre os nêutrons	9
2.1.7.2. Classificação dos Nêutrons	10
2.2. Elementos radiativos e fontes naturais	10
2.3. Elementos radioativos e fontes artificiais.....	11
2.4. Fontes de Nêutrons	11
2.5. Espectrometria de Nêutrons.....	12
2.6. Espectrometria de Multiesferas de Bonner.....	14
2.7. Redes Neurais	15
2.7.1. Inteligência Artificial	15
2.7.2. Sistema Nervoso e os Neurônios	15
2.7.3. Neurônio Artificial.....	16

2.7.4.	Organização em camadas.....	17
2.7.5.	Processo de aprendizagem	17
2.7.6.	Aprendizado Supervisionado	17
2.7.7.	Aprendizagem Não supervisionada	18
3.	Metodologia.....	19
3.1.	Fonte de $^{241}\text{AmLi}$	19
3.2.	Fonte de ^{252}Cf para rastreabilidade.....	20
3.3.	Infraestrutura – Laboratório de Baixo Espalhamento.....	20
3.4.	Espectrômetro de Multiesferas de Bonner.....	21
3.5.	NeuraLN	23
4.	Resultados e Discussão	25
4.1.	Radiação de Fundo do LBE.....	25
4.2.	Resultado da fonte de referência de ^{252}Cf	27
4.3.	Resultado da fonte de $^{241}\text{AmLi}$	29
5.	Conclusão	34
	Referências Bibliográficas	36

Lista de Abreviaturas

BNCT - *Boron Neutron Capture Therapy*

COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia

EMB - Espectrometria de Multiesfera de Bonner

IA - Inteligência Artificial

IAEA - *International Atomic Energy Agency*

ICRP - *International Radiation Protection Association*

INCA - Instituto Nacional de Câncer

IRD – Instituto de Radioproteção e Dosimetria

ISO - *International Organization for Standardization*

LBE – Laboratório de Baixo Espalhamento

LN – Laboratório de Metodologia de Nêutrons do LN/LNMRI

LNMRI – Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes

MCNP – Código de transporte de radiação baseado no método de Monte Carlo

NEURALN – Programa de Redes Neurais desenvolvido no LN/LNMRI/IRD

NPL - *National Physical Laboratory*

PNNL - *Pacific Northwest National Laboratory*

ROB3 – Matriz Resposta desenvolvida na tese de Lemos Junior

SAN4 – Matriz Resposta do programa BUNKI

SOURCES4C - Código que determina as taxas de produção de nêutrons e de espectros de reações (α,n)

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

UTA4 – Matriz Resposta do Programa BUNKI

Índice de Ilustrações

Figura 1 - Esquema da Radiação Alfa Adaptada. (Infoescola, 2023).	7
Figura 2 - Esquema da Radiação Beta Adaptada. (Radiation Dosimetry, 2022).	8
Figura 3 - Série Radioativa do ^{232}Th . (Tauhata, 2014).	11
Figura 4 - Decaimento Radiativo do ^{241}Am . (Autor, 2024).	12
Figura 5 - Esferas de Polietileno. (Michele Lorenzoli, 2016).	14
Figura 6 - Neurônio biológico. (Toda Materia, 2023).	16
Figura 7 - Neurônio de McCulloch-Pitts. (Rauber, 2014).	16
Figura 8 - Organização em camadas. (ICMC, 2023).	17
Figura 9 - Aprendizado supervisionado. (Fiorin, 2011).	18
Figura 10 - Fonte de $^{241}\text{AmLi}$. (Autor, 2024).	20
Figura 11 - Imagem do sistema utilizado no LBE. (Laboratório de metrologia de nêutrons, 2011).	21
Figura 12 - Esferas de polietileno usadas no EMB. (Autor, 2024)	22
Figura 13 - Esquema Simplificado do EMB. (LEMOS JUNIOR, 2009).	22
Figura 14 - Foto do sistema de EMB. Posicionamento da esfera moderadora no detector (em azul) e posicionamento da fonte de ^{241}AmF (em vermelho) no salão de baixo espalhamento do LN. (Autor, 2024).	23
Figura 15 - Imagem da tela do programa NeuraLN. (Autor, 2024)	24
Figura 16 - Espectro em energia da Radiação de Fundo no LBE	25
Figura 17 - Espectro de nêutrons obtido da medição de uma fonte de ^{252}Cf de com uma distância de 100 cm.	27
Figura 18 - Espectro comparado do experimental e da ISO 8529-1 de 2001.	28
Figura 19 - Comparação das contagens medidos normalizados.	30
Figura 20 - Espectro obtido da fonte de $^{241}\text{AmLi}$ a uma distância de 100 cm.	31
Figura 21 - Espectro obtido da fonte de $^{241}\text{AmLi}$ a uma distância de 53 cm.	31

Figura 22 - Comparação entre os resultados das medições de $^{241}\text{AmLi}$32

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Resultados de Energia média (MeV) e Taxa de Fluência ($n.cm^{-2}.s^{-1}$).....	26
Tabela 2 - Resultados de Taxa de Equivalente de Dose ambiente e Individual.	26
Tabela 3 - Resultados dos coeficientes de conversão fluência para $H^*(10)$ e $H_p(10,0)$	26
Tabela 4 - Resultados de Energia média (MeV) e Taxa de Fluência ($n.cm^{-2}.s^{-1}$).....	27
Tabela 5 - Resultados de Taxa de Equivalente de Dose ambiente e Individual.....	28
Tabela 6 - Resultados dos coeficientes de conversão fluência para $H^*(10)$ e $H_p(10,0)$	28
Tabela 7 - Resultados da medição com EMB a uma distância 100 cm da fonte - detector.....	29
Tabela 8 - Resultados da medição com EMB a uma distância 53 cm da fonte - detector.....	29
Tabela 9 - Resultados de energia média (MeV) e Taxa de Fluência ($n.cm^{-2}.s^{-1}$) da fonte de $^{241}AmLi$	32
Tabela 10 - Resultados de Taxa de Equivalente de Dose ambiente e Individual da fonte de $^{241}AmLi$	32
Tabela 11 - Resultados dos coeficientes de conversão fluência para $H^*(10)$ e $H_p(10,0)$ da fonte de $^{241}AmLi$	33

Capítulo 1

Introdução

Criado em 1973, o Laboratório de Metrologia de Nêutrons, sendo parte do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, é referência na área de metrologia de nêutrons no Brasil, sendo responsável pela guarda e manutenção do Padrão Brasileiro de Fluência de Nêutrons. O LN promove a disseminação de magnitudes pertinentes para os instrumentos de medição e exerce várias atividades para aplicações de radiação ionizante para indústria, na medicina e em outras áreas [1]. Ademais, o LN tem o compromisso de treinamento e desenvolvimento de pesquisas na área de metrologia e dosimetria de nêutrons, sendo algumas dessas linhas de pesquisa a medição experimental de fluência e espectros e simulações matemáticas com método de Monte Carlo.

Tendo o LN uma missão tão importante, é necessário conhecer os espectros das fontes de nêutrons e conseqüentemente quantificar as grandezas operacionais de radioproteção e dosimetria. Assim, através da espectrometria de nêutrons é possível obter o espectro de uma fonte de nêutrons, fazendo com que seja possível identificar quais elementos químicos a fonte é formada. Sem esse conhecimento não é possível avaliar exatamente as medições dos monitores de área ou dos monitores individuais de um indivíduo que está exposto em seu local de trabalho.

A fonte de neutrons de $^{241}\text{AmLi}$ é classificada com uma fonte de baixa energia, sendo usada na espectrometria e dosimetria de nêutrons, na calibração de fluência de monitores de nêutrons e em técnicas ativas de ensaio não destrutivo para salvaguarda nuclear e não proliferação [4]. Por exemplo, pode ser usada numa área controlada para averiguar equipamentos ou na inspeção de qualidade de elemento combustível de reatores nucleares [4]. Porém, essa fonte apresenta alguns problemas, sendo eles: Ser uma fonte não conhecida, assim, essa fonte não possui um padrão internacional, dificultando a utilização dessa fonte para calibração de equipamentos de detecção de nêutrons. Ter complicações em ordem de grandeza

física para geração de nêutrons. Atualmente, os fabricantes não têm produzido fontes de $^{241}\text{AmLi}$, de modo que as que se encontram disponíveis no mercado são antigas e muitas das documentações de fabricação já foram perdidas. Conseqüentemente, a falta de incentivo econômico para produção de novas fontes fez com que o preço para adquirir uma fonte de $^{241}\text{AmLi}$ torna-se inviável [9]. Uma alternativa que está sendo usada é a irradiação de alvos de lítio com aceleradores de partículas, assim gerando uma reação parecida com a fonte de $^{241}\text{AmLi}$. Há estudos usando essa alternativa para fonte para o uso em aceleradores baseados em BNCT para o uso de tratamentos de câncer. Isso é pelo fato que a variabilidade de dados de medições impediu a obtenção de um espectro em energia padronizado para a fonte de $^{241}\text{AmLi}$, o que torna uma limitação no conhecimento de seu espectro [9].

Sendo assim, este trabalho auxiliará na solução de alguns problemas, particularmente com relação a incertezas associadas a dosimetria de nêutrons para radioproteção, beneficiando tanto os profissionais da área de radioproteção quanto aqueles que estão expostos a campos de nêutrons.

1.1. Objetivo

Caracterizar o espectro em energia de nêutrons da fonte isotópica de $^{241}\text{AmLi}$ utilizando a tecnologia baseado em redes neurais.

1.2. Objetivos Específicos

Para a fonte de $^{241}\text{AmLi}$:

- Obter a grandeza física de fluência de nêutrons.
- Obter as grandezas de radioproteção de equivalente de dose ambiente e individual.
- Obter os coeficientes de conversão de fluência para os equivalentes de dose.

1.3. Revisão De Literatura

Vega-Carrillo *et al.* [2] realizaram uma revisão de fontes de nêutrons, onde ele vai se basear em duas publicações da IAEA, que usam dois intervalos de energia, um de 55 e outro de 60 grupos de energia. Essas fontes foram estimadas através do *MCNP5 code* usando um intervalo de energia de 31 grupos de energia, obtendo para cada fonte a energia média, equivalente de

dose ambiente, o equivalente de dose individual e a dose efetiva por unidade de taxa de fluência. As fontes usadas no trabalho são $^{24}\text{NaBe}$, $^{24}\text{NaD}_2\text{O}$, $^{116}\text{InBe}$, $^{140}\text{LaBe}$, $^{238}\text{PuLi}$, $^{239}\text{PuBe}$, ^{241}AmB , $^{241}\text{AmBe}$, ^{241}AmF , $^{241}\text{AmLi}$, $^{242}\text{CmBe}$, $^{210}\text{PoBe}$, $^{226}\text{RaBe}$, ^{252}Cf e $^{252}\text{Cf/D}_2\text{O}$. Na conclusão foi apresentado que as fontes de nêutrons medidas nesse trabalho podem ser usadas como fonte pontuais para calibração, além disso, eles descrevem os benefícios que um laboratório de possuir uma fonte de nêutrons e que é necessário novos estudos para obter resposta de detectores ativos e passivos de nêutrons. E dizem que outra área que deve ser explorada é usar detectores para encontrar drogas ilícitas, explosivos e materiais nucleares.

Weinmann-Smith *et al.* [3] realizaram medições experimentais usando o *5-Ring Multiplicity Counter (5RMC)* em 17 fontes de nêutrons de $^{241}\text{AmLi}$ e fizeram simulações matemáticas com o MCNP e SOURCES4C para ajustar o espectro dessa fonte. No trabalho também é citado que a fonte de $^{241}\text{AmLi}$ está numa situação complicada pois as características físicas determinantes da fonte estão mal documentadas e variam entre fabricantes, sendo que alguns desses não produzem mais essa fonte.

Tagziria *et al.* [4] realizaram uma avaliação através de medidas realizadas no NPL e comparando os resultados com simulações matemáticas com Monte Carlo usando um modelo realístico de espectro da fonte de $^{241}\text{AmLi}$ calculado por Geiger and Van der Zwan. No trabalho foi realizado a simulação de dois tipos de fontes de $^{241}\text{AmLi}$, que possuem composições diferentes de encapsulamento e tamanho, o que se reflete nos seus diferentes espectros de energia medidos, com o objetivo de chegar numa fonte ideal de $^{241}\text{AmLi}$. Baseado nisso, os cálculos foram feitos usando u-SPHERES e conseguiram chegar numa boa concordância entre as fontes de $^{241}\text{AmLi}$.

Thomas *et al.* [5] fizeram uma nota sobre a ISO 8529-1[11] comentando que ela precisa de uma atualização, e que por mais de 10 anos (atualmente 20 anos), não recebe uma atualização das fontes, assim, existindo um vácuo de conhecimento nesses 10 anos. Nessa revisão, eles comparam os resultados das fontes de nêutrons que estão presentes na ISO 8529-1, sendo elas a ^{241}AmB , $^{241}\text{AmBe}$, ^{252}Cf e $^{252}\text{Cf/D}_2\text{O}$ e comparam com os resultados encontrados atualmente. Eles encontraram resultados parecidos com a ISO 8529-1[11] para as fontes de $^{241}\text{AmBe}$ e ^{252}Cf , porém a fonte de ^{241}AmB tem pouco a apresentar e que os resultados de outros pesquisadores são parecidos entre si, porém diferentes da ISO 8529-1[11] e na fonte de $^{252}\text{Cf/D}_2\text{O}$ eles propõem uma atualização de espectro pois na ISO 8529-1[11] as medições foram baseadas em cálculos antiquados.

Bramblett *et al.* [6] apresentaram o primeiro conceito do Espectrômetro de Multiesferas de Bonner. Assim, os autores descrevem os benefícios desse tipo de detector, sendo eles: Uma sensibilidade de 0,1 a 2 MeV, determinar os formatos de espectros contínuos de nêutrons, consegue captar as faixas de energias de nêutrons, conseguir discriminar os raios gama, possuir um design simples de aplicar e com tem uma eficiência de 0,1%. Eles descrevem que o tamanho do cristal de ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ foi escolhido para discriminar as partículas gama e que 80% dos nêutrons térmicos incidentes são absorvidos e que a proporção do cristal é feito para que o máximo de nêutrons seja absorvido e minimizar a absorção de partículas gama. Ao longo do artigo, eles estabelecem como calibrar o detector, suas aplicações e alguns tipos de interações de emissor de nêutrons com o detector.

Lemos Junior [7] realizou o desdobramento de espectros de nêutrons usando as técnicas de Redes neurais e espectrômetro de Bonner, e para isso, é implementado o MCNP para criar uma matriz resposta (ROB3) para obter espectros de nêutrons. Primeiro ele simula no MCNP o detector do tipo cintilador de nêutrons térmicos ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ e as esferas de polietileno. Assim, ele usa esses resultados simulados e os resultados experimentais de outro trabalho dele mesmo e insere os valores na Rede Neural chamada NeuraLN do LN. É feito a comparação do ROB3 com outras matrizes resposta, SAN4 e UTA4, empregando as fontes de nêutrons usadas na ISO 8529-1 de 2001. Em sua conclusão, ROB3 obteve um erro estatístico de 3% e um acerto nos testes no NeuraLN de 100% com nêutrons monoenergéticos. Além disso, ele cita alguns possíveis trabalhos futuros, como, diminuir o erro estatísticos para um valor abaixo de 1%.

Santos [8] teve como objetivo de obter o espectro de nêutrons utilizando a Espectrômetro de Multiesferas de Bonner com detectores termoluminescentes. A escolha pelos detectores termoluminescentes invés do tradicional detector do tipo cintilador de ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ nesse tipo de espectrometria foi que os detectores de ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ não são tão eficientes em campos mistos intensos, é necessário equipamentos eletrônicos e existem dificuldades na utilização em espectrometrias de altas cotas. Assim, foram usados oito detectores termoluminescentes de fluoreto de lítio (LiF) para obter o espectro de nêutrons de uma fonte de nêutrons de ${}^{241}\text{AmBe}$ e o desdobramento foi realizada através do BUNKI. Os resultados demonstraram que esse tipo de técnica pode ser utilizado desde que saiba a sensibilidade dos detectores a radiação gama. O resultado do espectro está em concordância com a literatura e as discrepâncias foram por conta de baixa sensibilidade dos detectores termoluminescentes.

Mozhayev *et al.* [9] usaram duas fontes de $^{241}\text{AmLi}$, que foram disponibilizadas pelo PNNL, sendo fontes fabricadas em 1980 e que as documentações não foram localizadas. Além disso, os autores supõem que o processo de fabricação das fontes de $^{241}\text{AmLi}$ podem variar, até sendo de diferentes lotes. Foi realizado medições de partículas gama e de nêutrons, usando um detector portátil de alta pureza de germânio (HPGe) para detectar gama e um espectrômetro de nêutrons chamado ROSPEC. Além disso, foi feito simulações no Monte Carlo para obter o campo de nêutrons. Os resultados das fontes de nêutrons em gama foram bem similares, dando 13,9 Bq (0,375 Ci). Comparando os resultados de todos os espectros compilados medidos, obtiveram uma convergência de aproximadamente 0,46 MeV de energia média. Os autores concluíram que não existem mais fabricantes produzindo esse tipo de fonte de nêutrons, pois saíram do mercado ou foram adquiridas por outras empresas, assim, não tendo incentivo econômico para produzir novas fontes de $^{241}\text{AmLi}$, o que torna o preço de aquisição de novas fontes desse material proibitivo.

CAPÍTULO 2

Fundamentos Teóricos

2.1 Física Nuclear

2.1.1. Radiação Ionizante

É a radiação cuja energia é superior à energia de ligação dos elétrons de um átomo com o seu núcleo. Sendo assim, ela apresenta energia suficiente para arrancar elétrons de seus orbitais, podendo ionizar e excitar átomos e moléculas, provocando também a modificação nas estruturas dos mesmos [10]. São tipos de radiações ionizantes: radiações cósmicas, alfa, beta, gama, os raios X e nêutrons.

A radiação ionizante é produzida por processos de ajustes que ocorrem no núcleo ou nas camadas eletrônicas, ou pela interação de outras radiações ou partículas, como o núcleo ou o átomo [11].

2.1.2. Radiação Cósmica

A radiação cósmica, que faz parte da radiação de fundo, é constituída por partículas de alta energia na forma de nêutrons, prótons, radiação gama, mésons, neutrinos, núcleos leves e elétrons, todas estas oriundas do espaço sideral. Quando essas partículas entram na Terra, elas são freadas e colididas pela atmosfera terrestre e desviadas pelo cinturão magnético de Van Allen [11]. Além disso, quanto mais alto na atmosfera, mais radiação cósmica poderá ser encontrada. Um exemplo disso é que, no nível das montanhas ou nas altitudes alcançadas pelos aviões, pode-se detectar mais radiação cósmica do que no nível do mar [12].

A radiação cósmica, por ser muito energética, pode atravessar vários centímetros de chumbo facilmente e assim atingir vários seres vivos, causando danos e/ou mutações aos mesmos. Entretanto, os cientistas acreditam que isso foi crucial para a evolução da vida no planeta Terra, fazendo com que os terráqueos se tornassem mais resistentes à radiação ionizante [12].

2.1.3. Radiação Alfa (α)

Quando um elemento radioativo emite uma partícula alfa, ele dá origem a um novo elemento que apresenta número de massa com quatro unidades a menos e número atômico com dois unidades a menos que o original. Portanto, a partícula alfa é constituída de 2 prótons e 2 nêutrons, conforme a **Figura 1** [13].

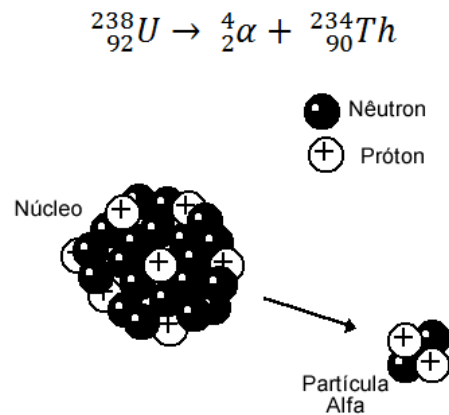


Figura 1 - Esquema da Radiação Alfa Adaptada. (Infoescola, 2023).

A partícula alfa é constituída de núcleos de He de alta energia emitida por núcleos de elementos pesados e sua energia se encontra em faixas de 4-8 MeV [14]. Este tipo de partícula tem um alto poder de ionização, porém apresenta um alcance pequeno, por se tratar de uma partícula pesada, possuir duas cargas elétricas e ionizar por interação de carga elétrica, sendo assim, uma radiação diretamente ionizante. Ela é facilmente barrada por papel, roupas e pela pele. Logo, o corpo humano tem uma blindagem natural contra a radiação do tipo alfa, no entanto, caso seja ingerido ou inalada pode causar efeitos devastadores ao corpo humano [15].

2.1.4. Radiação Beta (β)

A partícula beta é emitida quando um elemento radioativo se transforma em um novo elemento de mesmo número de massa, mas seu número atômico apresenta uma variação de unidade. Isso ocorre quando um nêutron presente no núcleo se decompõe e dá origem a um próton, um elétron e um antineutrino, podendo ser caracterizado conforme a **Figura 2** [13].

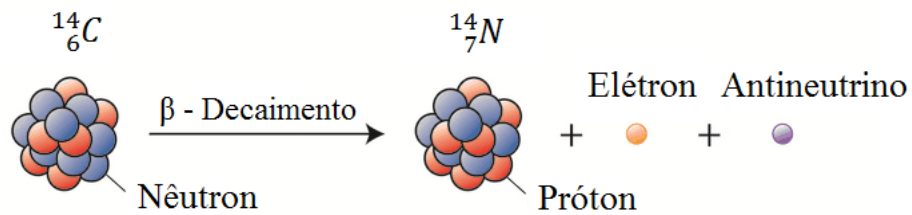


Figura 2 - Esquema da Radiação Beta Adaptada. (Radiation Dosimetry, 2022).

Além disso, existe dois tipos de decaimento beta: negativo (β^-) e positivo (β^+). No positivo, um núcleo rico em prótons emite um pósitron (os pósitrons são antipartículas de elétrons e têm a mesma massa que os elétrons, mas com carga elétrica positiva). No negativo um núcleo rico em nêutrons emite um elétron de alta energia [16].

Portanto, a partícula beta é constituída de elétrons e pósitrons, e por conta disso, é leve e rápida, diferentemente da partícula alfa. Esta partícula apresenta um poder de penetração e de ionização médio, conseguindo ser 50 a 100 vezes mais penetrante que a partícula alfa, podendo ainda ser detida por uma chapa fina de alumínio ou de chumbo [15]. Além disso, a partícula beta ioniza os átomos quando passa pelo meio material e perde energia consideravelmente [14].

2.1.5. Radiação Gama (γ)

Quando ocorre a emissão de radiação alfa ou beta de um elemento radioativo, o núcleo residual tem seus nucleons fora de configuração, em estado de excitação. Logo, para atingir o equilíbrio, esses elementos radioativos emitem a energia excedente sob a forma de radiação eletromagnética, chamada de radiação gama [11].

A radiação gama tem um poder de penetração e alcance elevado, contudo não possui carga elétrica e emite radiação ionizante indiretamente. A blindagem necessária para esse tipo de radiação diverge, pois depende da energia liberada. E por conta do seu grande poder de penetração, a partícula gama é um tipo de radiação pouco ionizante, pois quando ela atinge o corpo humano, acaba o atravessando e depositando pouca energia [15].

2.1.6. Radiação X

Os raios X têm uma alta energia que se origina na eletrosfera ou no freamento de partículas carregadas no campo eletromagnético do núcleo atômico ou dos elétrons [11].

A radiação X é similar com a radiação gama, pois ambas são constituídas de ondas eletromagnéticas e têm as mesmas características, se diferenciando pela formação. A radiação

gama é formada no núcleo atômico e a radiação X se forma fora do núcleo, sendo produzida através do impacto de elétrons energéticos sobre um alvo ou pelo rearranjo do núcleo [17].

2.1.7. Nêutrons

Os nêutrons são partículas extremamente abundantes. Tem uma massa praticamente igual ao do próton, sendo estável apenas quando ligado a um núcleo. Livre, ele se torna instável, portanto, por ser uma partícula neutra, ele interage com a matéria e diretamente com os núcleos, assim, podendo induzir uma reação nuclear, já que não sofre repulsões eletromagnéticas. Isso é possível, pois os nêutrons por não possuírem carga elétrica, logo não interagem com campos elétricos, fazendo que sua interação seja diretamente com o núcleo atômico, por isso o nêutron é muito usado para "enxergar" sem interferir nas camadas eletrônicas [18].

Por conta de não possuir carga elétrica e não sofrer repulsão eletromagnética, o nêutron tem um grande nível de penetração. A ionização que essa partícula emite, como a radiação gama e X, é definida como indiretamente ionizante, pois ele transfere sua energia através de interações diretas com o núcleo atômico. Além disso, o produto dessas interações produz outros tipos de radiações, essas podendo ser partículas carregadas que irão ionizar diretamente a matéria [14].

2.1.7.1. Uma breve história sobre os nêutrons

Em 1896, Wilhelm Conrad Röntgen descobriu os Raios X e Antoine Henri Becquerel demonstrou que os Raios X eram emitidos naturalmente por alguns materiais, assim, descobrindo a radioatividade. Ao longo dos anos, foram sendo propostos modelos atômicos diversos, sendo os mais importantes da história, em ordem cronológica, o modelo dos filósofos gregos Demócrito e Leucipo em 450 a.C sendo o primeiro, do químico John Dalton em 1808, o modelo do físico Joseph John Thomson em 1897 e em 1911 o modelo do físico Ernest Rutherford que tinha uma estrutura baseado no sistema solar. Rutherford também foi responsável pela descoberta do próton, porém, uma dúvida surgia no meio acadêmico nessa época em relação a massa do átomo. Como um núcleo de hidrogênio possuía metade da carga de um núcleo de hélio, mas esse contém quatro vezes mais massa? Assim, várias teorias estavam sendo propostas para tentar resolver essa incógnita. No início de 1920, Rutherford, depois Orme Masson começaram a acreditar que provavelmente existiria um tipo de "próton neutro". Em 1932, o físico James Chadwick realizou um experimento usando partículas Alfa, oriundos de um elemento radioativo, como o objetivo de bombardear um alvo de Berílio. Foi

observado nesse experimento que estava sendo emitido partículas sem cargas, e que elas conseguiam arrancar prótons de outros materiais. Assim, essas partículas foram batizadas de Nêutrons. Sendo assim, por volta de 12 anos após a proposta de Rutherford, o nêutron estava oficialmente descoberto.

2.1.7.2. Classificação dos Nêutrons

Os nêutrons podem ser classificados em três tipos: Nêutrons Térmicos, Nêutrons Epitérmicos e Nêutrons Rápidos.

Começando com os nêutrons térmicos, são os nêutrons em equilíbrio térmico com o meio. Sua energia depende da temperatura que se encontra no meio, podendo obter uma energia média de aproximadamente 0,025 eV numa temperatura de 300K. [18]

Nêutrons epitérmicos de forma geral é um tipo de nêutron que possui uma energia acima dos nêutrons térmicos e tem energia na faixa em que ocorre as ressonâncias de seção de choque de absorção da grande maioria dos materiais. A energia que difere os nêutrons térmicos dos epitérmicos é de 0,25 eV, definido pelo degrau do Cádmiio [18].

Os nêutrons rápidos possuem energia suficiente para interagir com a grande maioria dos núcleos através de reações limiares e não somente por captura neutrônica ou espalhamento. Sua energia média é de aproximadamente entre 100 a 200 keV. [18]

2.2.Elementos radiativos e fontes naturais

Um elemento químico é radioativo quando está na busca incessante do equilíbrio [11]. Na natureza, existem elementos estáveis e instáveis, os últimos sendo chamados de radionuclídeo. Um radionuclídeo irá buscar sua estabilidade a todo custo, através de processos radioativos que envolvem a emissão de radiação ionizante do tipo beta, alfa ou gama, como no exemplo apresentado na **Figura 3** [11].

As fontes naturais da radiação ionizante são os raios cósmicos e os radionuclídeos provenientes da crosta terrestre, encontrados em locais como no solo, nas rochas, nos materiais de construção, na água potável e no próprio corpo humano [19].

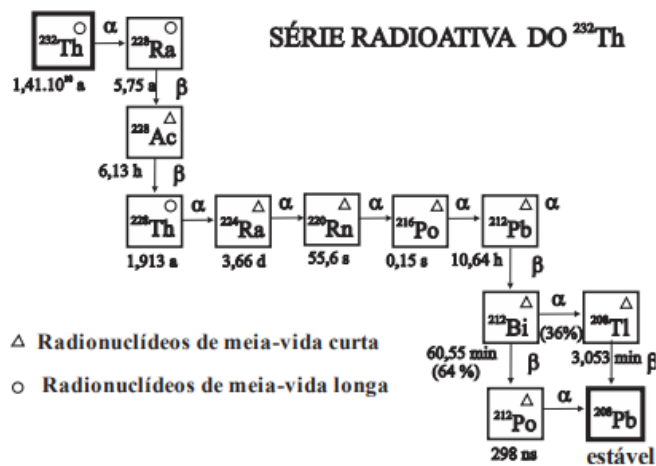


Figura 3 - Série Radioativa do ^{232}Th . (Tauhata, 2014).

2.3. Elementos radioativos e fontes artificiais

Os elementos radioativos artificiais são criação do homem. São radionuclídeos, obtidos através dos processos de fusão e colisão de núcleos atômicos. O processo de colisão ocorre, por exemplo, quando o núcleo de um elemento é bombardeado com nêutrons de outro elemento, gerando um elemento novo instável [20].

As fontes artificiais são encontradas: em dispositivos de diagnóstico e terapia na área médica, em aparelhos de controle, medidores e radiografia usados na indústria e comércio [11].

2.4. Fontes de Nêutrons

Esse tipo de fonte não é naturalmente encontrado. Não existe na natureza uma fonte emissora de nêutrons, pois os nêutrons não são gerados espontaneamente. O primeiro jeito descoberto de obter uma fonte de nêutrons foi naquele no experimento de irradiação de berílio pelo James Chadwick. É possível ter uma fonte de nêutrons a partir da união do elemento emissor alfa, como o ^{241}Am , ^{239}Pu ou ^{210}Po com outros elementos de menor número atômico (^{10}B , ^4Be e ^9F) utilizados como alvos, assim, sendo possível que a emissão da partícula alfa cria uma reação nuclear com o elemento alvo produzindo nêutrons por bombardeamento, que atingem uma vasta gama de energia. Esse tipo de fonte muito usado, por serem fontes de longa meia-vida e por garantirem um fluxo constante [18].

Como neste trabalho foi usado o elemento ^{241}Am como emissor de partículas alfa, na **Figura 4** abaixo é apresentado detalhadamente como é o decaimento radioativo até obter o amerício-241 e o decaimento radioativo desse elemento até se tornar um elemento estável.

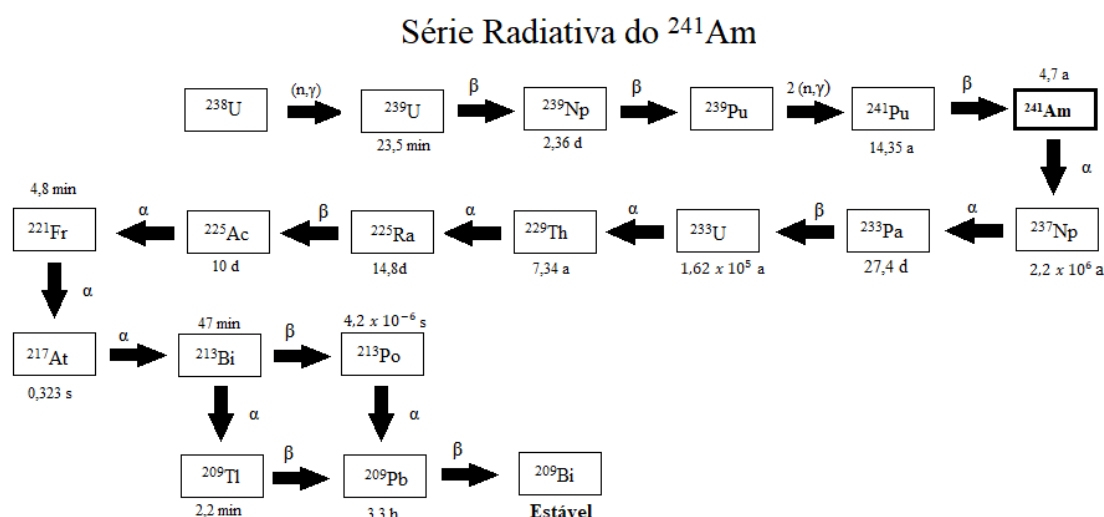


Figura 4 - Decaimento Radiativo do ^{241}Am . (Autor, 2024).

Também é possível obter nêutrons através da fissão nuclear. Nesse tipo de reação, um elemento pesado, tipo ^{235}U e ^{239}Pu tem seu núcleo rompido totalmente por um nêutron incidente, gerando muita energia, cerca de 200 MeV, e resultando em dois núcleos menores. Cada fissão gera por volta de 2 a 3 nêutrons, assim, matérias que sofrem fissões espontânea poderiam ser ótimas fontes de nêutrons, porém, apenas um isótopo que é gerado por fissão é usado como fonte de nêutrons, que é o ^{252}Cf que decai tanto por fissão espontânea como por emissão alfa [18].

Outro tipo de emissor de nêutrons são os reatores nucleares. Eles são responsáveis por gerar vários nêutrons. A fissão nuclear gera mais nêutrons que é consumido no reator, assim, fazendo que ocorra novas fissões que produzem mais nêutrons, que irão produzir mais fissões e mais nêutrons. Esse processo se chama de reação em cadeia, o principal motivo de como um reator nuclear funciona atualmente. Assim, os nêutrons são abundantes no reator nuclear, porém, possuem pouca energia devido a grande quantidade de material moderador (material termalizante).

2.5. Espectrometria de Nêutrons

Ao longo da descoberta dos nêutrons, foi sendo observado que os nêutrons são um tipo de partícula com um intervalo amplo de energia e por possuir um comportamento particular em faixas energéticas distintas. Os pesquisadores começaram a tentar desenvolver métodos para caracterizar seu espectro. Assim, teve o surgimento da espectrometria de nêutrons em 1932. Ela

contribuiu para o desenvolvimento da física nuclear, sendo a chave para o desenvolvimento de novas tecnologias nucleares, tais como o diagnóstico de fusão de plasma [21] e da proteção radiológica [22]. Os métodos de espectrometria de nêutrons podem ser classificados em sete grupos com princípios de detecção ou medição de energia [30][31]:

- 1) Método em que o nêutron é espalhado e a energia de um núcleo de recuo é medida;
- 2) Método baseado em medições da energia das partículas carregadas, liberadas em reações nucleares induzidas por nêutrons;
- 3) Método em que a velocidade do nêutron é medida;
- 4) Método em que um mínimo de energia do nêutron é indicado pelo surgimento de um efeito induzido por nêutrons, como uma energia específica do raio gama ou uma transição de fase;
- 5) Método em que a distribuição de energia do nêutron é determinada pelo desdobramento de um conjunto de leituras de detectores (geometria de detectores) que diferem na dependência energética de suas respostas aos nêutrons;
- 6) Método baseado em difração de nêutrons;
- 7) Método em que o tempo de distribuição da moderação de um pulso de alta energia do nêutron em um meio apropriado é medido.

O desenvolvimento da espectrometria de nêutrons pode ser dividido em três períodos: de 1932 a 1959, de 1960 a 1979, e de 1980 até hoje. Antes de 1960, muitos detectores de nêutrons, que são usados até hoje, foram criados. Como as câmeras de ionização e os contadores proporcionais, emulsões nucleares, cintiladores orgânicos entre outros.

No segundo período houve a introdução do método de esferas de Bonner [6] e avanços na técnica de espectrometria de nêutrons baseados em detectores de ionização a gás e nos detectores cintiladores. Além disso, foram realizadas as primeiras aplicações de detectores semicondutores na espectrometria de nêutrons.

O período de 1980 até hoje trouxe avanços tecnológicos consideráveis, principalmente na implementação de computadores na espectrometria. A espectrometria de nêutrons ganhou um aperfeiçoamento matemático por conta dos novos métodos de cálculo, como o desenvolvimento da função resposta mais apropriada ou o cálculo da eficiência de detecção de nêutrons dos diversos sistemas de detecção pela simulação com Monte Carlo [7].

2.6. Espectrometria de Multiesferas de Bonner (EMB)

Teve o seu primeiro protótipo introduzido por Bramblett *et al* [6] e o seu sistema é composto por esferas de polietileno (moderador) de diferentes diâmetros como na **Figura 5**, e, devido à sua geometria esférica (simétrica), permite uma resposta praticamente isotrópica. E o conjunto de esferas permite a moderação e posterior detecção de nêutrons emitidos pelas fontes relacionadas. Entre as vantagens da espectrometria com a EMB, podemos relacionar: a alta sensibilidade aos nêutrons e a discriminação aos fótons [23]. Esse método possui uma sensibilidade de 0,1 a 2 MeV que consegue determinar os formatos dos espectros contínuos de nêutrons e possui uma eficiência de cerca de 0,1%.

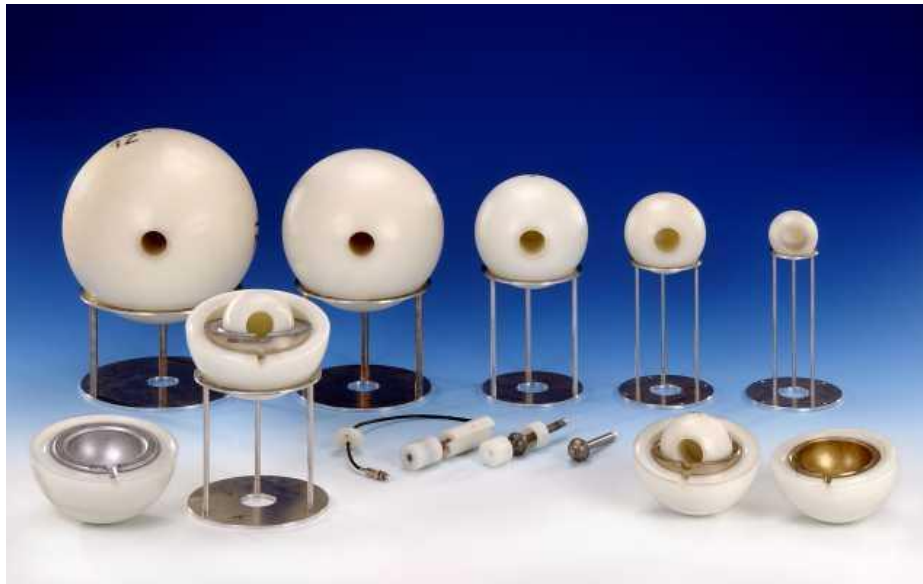


Figura 5 - Esferas de Polietileno. (Michele Lorenzoli, 2016).

Usando a referência da técnica original de Bramblett *et al*, esse método condiz em usar um detector de nêutrons térmicos com um cristal de ⁶LiI(Eu). O tamanho do cristal foi pensado para proporcionar uma boa discriminação de raios gama e possuir a capacidade de absorver 80% dos nêutrons térmicos incidentes. Portanto, o cristal foi desenvolvido para conseguir absorver o máximo de nêutrons térmicos incidentes e minimizar a absorção de raios gama [6]. Por fim, atualmente, o EMB é muito utilizado em aplicações na área de radioproteção, sendo os detectores mais usados são os contadores proporcionais de ¹⁰B_F₃, ³He e o detector cintilador de ⁶LiI(Eu).

2.7.Redes Neurais

2.7.1. Inteligência Artificial

A inteligência artificial é uma área de pesquisa da ciência de computação, com objetivo de simular a capacidade racional de resolução de problemas, sendo isso, simular inteligência [24].

Estudada academicamente desde 1950, porém apenas nos anos de 1990 foi possível um grande avanço nessa tecnologia. Isso só foi possível pelo grande avanço dos computadores nas últimas décadas [25].

Basicamente, um sistema com IA consegue não apenas manipular dados e armazenar, como também gerar, manipular conhecimento e deduzir novos conhecimentos [25].

Portanto, os pesquisadores usaram de base para construir a IA o cérebro humano, imaginando-o como um computador, sendo assim, um dos sistemas muito conhecido que usa esse conceito é a de Redes Neurais Artificiais[25].

2.7.2. Sistema Nervoso e os Neurônios

O sistema nervoso humano é dividido em medula espinhal, nervos e gânglios nervosos. Sendo formado fundamentalmente pelo tecido nervoso. Neste tecido, seu principal elemento são os neurônios, que são um tipo de célula altamente especializada em receber, conduzir e transmitir mensagens entre as células [26].

Como na **Figura 6**, é possível visualizar as partes de um neurônio, porém as partes mais importantes são os dendritos e os axônio, pois são responsáveis por realizar os impulsos nervosos, sendo esse, estímulos elétricos que são capturados pelos dendritos ou pelo próprio corpo celular que geram um impulso nervoso que percorre todo o axônio, até chegar a suas extremidades e quando isso ocorre, o impulso é transmitido a outro neurônio, sendo assim, ocorrendo a sinapse nervosa [26].

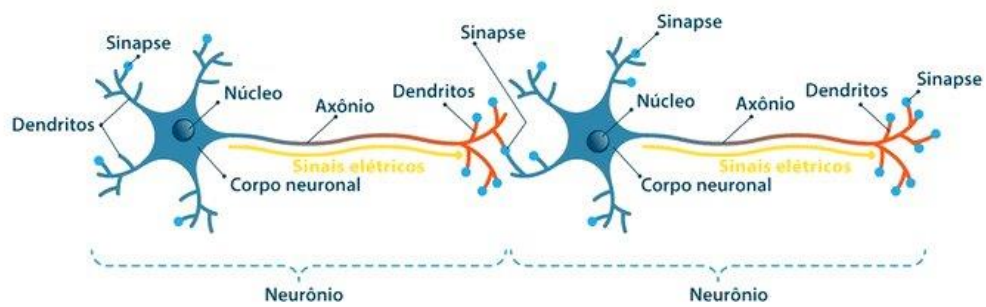


Figura 6 - Neurônio biológico. (Toda Materia, 2023).

A sinapse, de modo geral, é o ponto de união de dois neurônios, ocorrendo geralmente entre o axônio de um neurônio e o dendrito de outro. Além disso, o sistema nervoso pode realizar entre 1.000 a 10.000 sinapses com outros 1.000 neurônios [26].

2.7.3. Neurônio Artificial

O modelo de neurônio artificial de McCulloch e Pitts [27] usa a ideia do neurônio biológico de um modo simplificado. Então, empregando técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático, resultou num neurônio de n terminais de entrada X_1, X_2, \dots, X_n (representando os dendritos) e com apenas um terminal de saída (representando o axônio). Para simular o comportamento das sinapses, é usado pesos nos terminais de entrada, sendo eles, W_1, W_2, \dots, W_n , cujo valores podem ser positivos ou negativos. Assim, sinais são apresentados aos terminais de entrada e cada sinal é multiplicado por um número (peso) que indica a sua influência no terminal de saída. Esse modelo é apresentado na **Figura 7** abaixo [7].

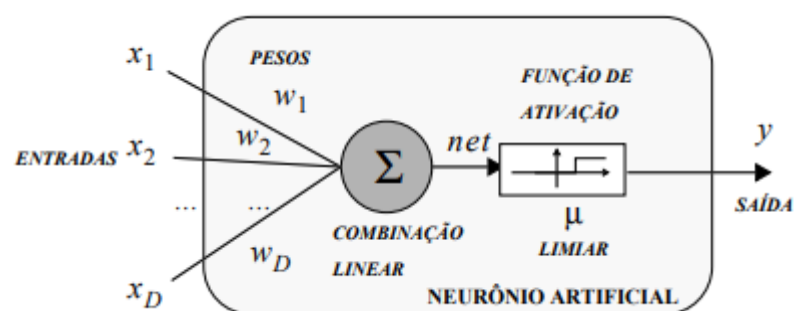


Figura 7 - Neurônio de McCulloch-Pitts. (Raubert, 2014).

2.7.4. Organização em camadas

As redes neurais têm grande potencial e flexibilidade por conta do conjunto de neurônios que estão interligados entre si. Assim, esse englobado de neurônios com o processamento local cria uma inteligência global de rede [24].

Como na **Figura 8**, é possível visualizar a organização os neurônios por camadas, que funciona da seguinte forma: As camadas de entrada vão receber um estímulo (uma informação), nas camadas intermediárias ou escondidas é feito a maior parte do processamento, através de conexões ponderadas e na camada de saída é obtido o resultado ou a nova informação gerada pela rede neural [24].

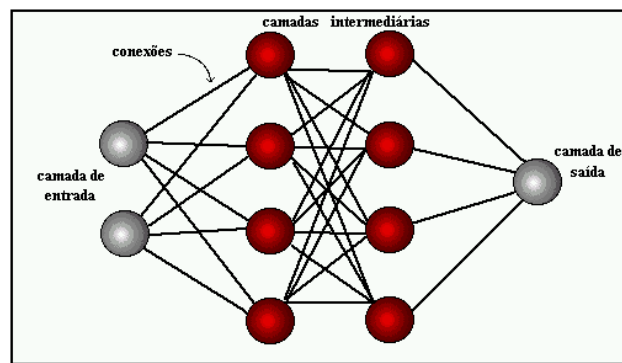


Figura 8 - Organização em camadas. (ICMC, 2023).

2.7.5. Processo de aprendizagem

As redes neurais têm a capacidade de aprender através de exemplos e encontrar padrões para alcançar uma resposta, para isso, é necessário treiná-la. O treinamento de uma rede neural é feito a partir de ajuste de pesos, assim, atingindo o aprendizado quando a rede neural conseguir chegar numa solução generalizada [24].

Existem vários métodos de treinamento para uma rede neural, mas de modo geral, é possível agrupar em dois modelos principais: Aprendizado Supervisionado e Aprendizado não supervisionado [7].

2.7.6. Aprendizado Supervisionado

Possui esse nome porque a saída desejada (resposta correta) é concedida por um supervisor externo (professor), e assim, a rede neural pode comparar o seu resultado com o ideal, deste modo, fazendo ajustes nos pesos. Na **Figura 9** é demonstrado como esse processo funciona. [7].

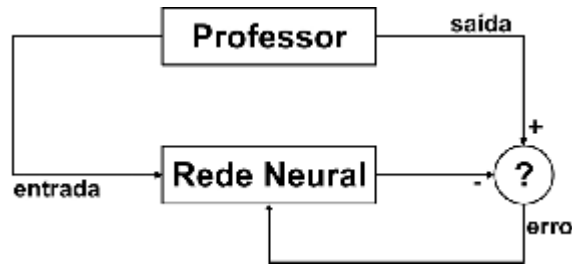


Figura 9 - Aprendizado supervisionado. (Fiorin, 2011).

O professor irá avaliar os resultados e indicará uma taxa de erro, visando melhor o aprendizado da rede neural. Logo, cada nova entrada, o professor irá ceder a resposta com a taxa de erro e assim, após vários ajustes de pesos, minimizando o erro. Portanto, após várias tentativas, cada novo ajuste de pesos irá ser cada vez menor, se encaminhando para uma possível solução. Porém, esse método de aprendizagem tem uma desvantagem, caso não haja o professor, esta rede não será capaz de aprender a tarefa [7].

Esse modelo pode ser implementado de duas formas, “*Offline*” e “*Online*”. No treinamento “*Offline*”, os dados conjuntos de treinamento não mudam, assim, com a rede obtendo uma solução, esta permanecerá fixa. No treinamento “*Online*”, os dados conjuntos de treinamento mudam, e a rede fica em constante processo de adaptação [7].

2.7.7. Aprendizagem Não supervisionada

Como o nome já pode sugerir, não existe um agente externo ou professor para auxiliar no processo de aprendizado. Logo, é disponibilizado para rede neural somente os padrões de entrada. Deste modo, só é possível treinar a rede neural se as informações que são processadas tiverem uma proporcionalidade ou redundância, assim, sendo possível desenvolver uma habilidade de formar representações internas para codificar características de entrada e criar classes ou grupos automaticamente. A vantagem desse modelo é que não precisa de um agente externo, porém, a desvantagem está ligada ao conjunto de dados para treinamento, sendo esse, obrigatoriamente redundantes para que a rede neural consiga aprender [7].

Capítulo 3

Metodologia

Os materiais utilizados para o levantamento das contagens para a realização da espectrometria foram:

- 3.1 Fonte de nêutrons de $^{241}\text{AmLi}$
- 3.2. Fonte de nêutrons de ^{252}Cf para rastreabilidade
- 3.3 Infraestrutura – LBE
- 3.4 Espectrômetro de Multiesferas de Bonner
- 3.5 NeuraLN

3.1.Fonte de neutrons de $^{241}\text{AmLi}$

A fonte usada nesse trabalho é uma fonte radioativa isotrópica de nêutrons que possui uma atividade de 100 mCi e com uma emissão de nêutrons por de $5,3 \times 10^3$ n/s. Tem seu número de série de 118. O material radiativo está blindado por um cilindro de chumbo de diâmetro e altura, respectivamente, de 2,75 cm e 5,4 cm. Abaixo está representado na **Figuras 10** a fonte de $^{241}\text{AmLi}$ usada neste trabalho.



Figura 10 - Fonte de $^{241}\text{AmLi}$. (Autor, 2024).

3.2. Fonte de nêutrons de ^{252}Cf para rastreabilidade

No LN é realizado medições da fonte de nêutrons de ^{252}Cf por ser uma referência na calibração de equipamentos. O ^{252}Cf é uma fonte de nêutrons conhecida por conta da ISO 8529-1[29] e muito usada na área. Porém, é uma fonte de nêutrons de difícil aquisição, pela complexidade de fabricação, assim, seu preço no mercado é exorbitante. Além disso, é uma fonte de baixa meia-vida. A fonte de ^{252}Cf usada de referência nesse trabalho possui um formato cilíndrico de diâmetro e altura, respectivamente, aproximadamente de 5,4 mm e 12 mm, sendo uma fonte fabricada em 2009. Possui o número de série de FTC-CF-3567, fabricado pela Frontier e com uma emissão de neutrons de $2,7 \times 10^8 \text{ n/s}$.

3.3. Infraestrutura – Laboratório de Baixo Espalhamento

O LBE tem esse nome por conta que foi planejado para minimizar a interação de radiação espalhada entre os materiais estruturais. Por isso, a estrutura do laboratório está instalada num prédio de $15,05 \times 7,80 \times 6,00 \text{ m}^3$ com paredes do tipo telha-forro. A telha-forro é feita com chapas de aço (certificadas pela Companhia Siderúrgica Nacional- CSN) tipo Galvalume AZ150 com 0,5 mm de espessura, forma trapézio 40 e núcleo de Poliestireno Expandido - EPS tipo F (autoextinguível) com 30 mm de espessura e densidade média de 13 kg/m^3 . O Galvalume (ou Zincalume) é produzido a partir de uma chapa de aço revestida por uma liga de alumínio

(55%), zinco (43,5%) e silício (1,5%) [1]. Como na **Figura 15**, o LBE possui uma sala com refrigeração e sinalização. Possui uma plataforma de 1,86 m do nível do solo, onde são posicionados a fontes radiativas e os equipamentos de calibração e de pesquisa [1].



Figura 11 - Imagem do sistema utilizado no LBE. (Laboratório de metrologia de nêutrons, 2011).

3.4. Espectrômetro de Multiesferas de Bonner

A EMB, utilizada no LN, consiste em seis esferas, **Figura 11**, com diâmetros de 5,08 cm (2 polegadas), 7,62 cm (3 polegadas), 12,7 cm (5 polegadas), 20,32 cm (8 polegadas), 25,4 cm (10 polegadas) e 30,48 cm (12 polegadas). Essas esferas são feitas de polietileno de alta densidade e, no seu centro, é utilizado um detector térmico de nêutrons do tipo cintilador de ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$.



Figura 12 - Esferas de polietileno usadas no EMB. (Autor, 2024)

Na **Figura 12** é possível ver a estrutura do detector, onde a captura dos pulsos é feita pelo fotomultiplicador do detector que são registrados num analisador multicanal [8], depois, as contagens são armazenadas num computador por um *software* chamado *Gamma Acquisition & Analysis*.

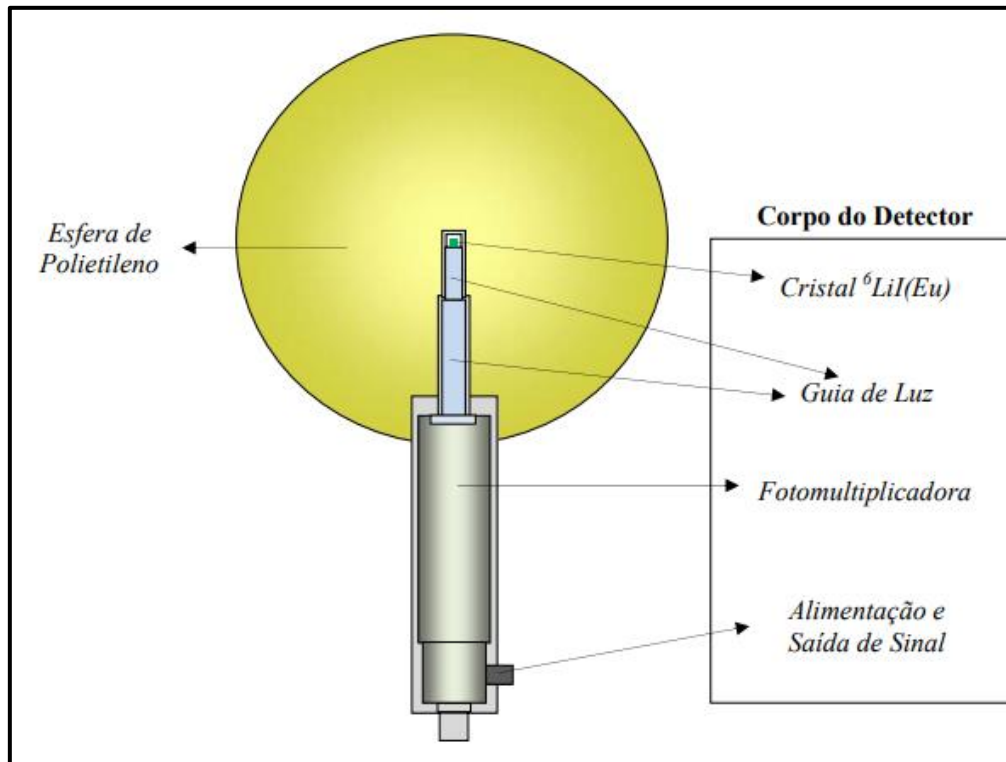


Figura 13 - Esquema Simplificado do EMB. (LEMOS JUNIOR, 2009).

Na **Figura 13** é demonstrado o setup das medições, sendo estabelecida as configurações das medições em uma distância fixa entre o detector e a fonte. As distâncias para a fonte de nêutrons de $^{241}\text{AmLi}$ foi 100 cm e de 53 cm. Foram realizadas sete medições (uma com cada esfera de polietileno, totalizando 6 medições e uma com o detector sem esfera) e cada contagem teve uma duração de 20h, com um total de 140h e sendo medido duas vezes, completando 280h de medição. Além disso, foi realizado medições de radiação de fundo no salão, onde foi realizado esse trabalho, assim, foi subtraído das contagens o valor da radiação de fundo.



Figura 14 - Foto do sistema de EMB. Posicionamento da esfera moderadora no detector (em azul) e posicionamento da fonte de ^{241}AmF (em vermelho) no salão de baixo espalhamento do LN. (Autor, 2024).

3.5. NeuraLN

A análise do espectro, ou seja, o padrão em energia, é realizado com a técnica de rede neural, que é utilizada para desdobrar os espectros de nêutrons. NeuraLN é o *software* criado no LNMRI/LN para fazer o desdobramento das informações obtidas a partir das taxas de contagem de nêutrons do *Gamma Acquisition & Analysis*. O NeuraLN é uma rede neural que usa o método de aprendizagem supervisionada com algoritmo de *Backpropagation* e *cross-validation*. Além

disso, os tipos de conexões de neurônios, é usado o *Feedforward*. Ele possui a capacidade de identificar um espectro em até sete vetores de entrada, igual está representado na **Figura 14**, onde é possível inserir nas sete entradas as taxas de contagens obtidas nas medições para cada esfera de Bonner. Essas informações são tratadas no NeuraLN para caracterizar o espectro, uma vez que os resultados obtidos a partir das taxas de contagem de cada esfera são apresentados como um espectro característico devido à diferença de diâmetro das esferas [7]. O *software* é atualizado regularmente, melhorando a precisão do desdobramento de nêutrons. São feitos treinamentos na rede neural para melhorar a precisão e diminuir a taxa de erro e é adicionado novos espectros que são usados como referência. Assim, neste trabalho foi usado a versão 2.1 do NeuraLN.

Detector	Valor
DETECTOR SEM ESFERA	0
DETECTOR DE 2"	0
DETECTOR DE 3"	0
DETECTOR DE 5"	0
DETECTOR DE 8"	0
DETECTOR DE 10"	0
DETECTOR DE 12"	0

Nome para o arquivo: saidactg.txt

OK

Figura 15 - Imagem da tela do programa NeuraLN. (Autor, 2024)

O *software* utiliza um modelo de resultados com 84 intervalos de energia de nêutrons [7] que possibilita o cálculo da dose equivalente ambiente e individual utilizando os coeficientes de conversão do ICRP 74 [28].

(2)

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1. Radiação de Fundo no LBE

A radiação de fundo está presente à nossa volta. Para conseguir resultados precisos das taxas temporais da fonte, é preciso antes remover as taxas temporais de radiação de fundo. Assim, na **Figura 16**, **Tabela 1**, **2** e **3** são apresentados, respectivamente, o espectro, a energia média, fluência de nêutrons, as grandezas de radioproteção e os coeficientes de conversão formados pela radiação de fundo medido dentro do LBE.

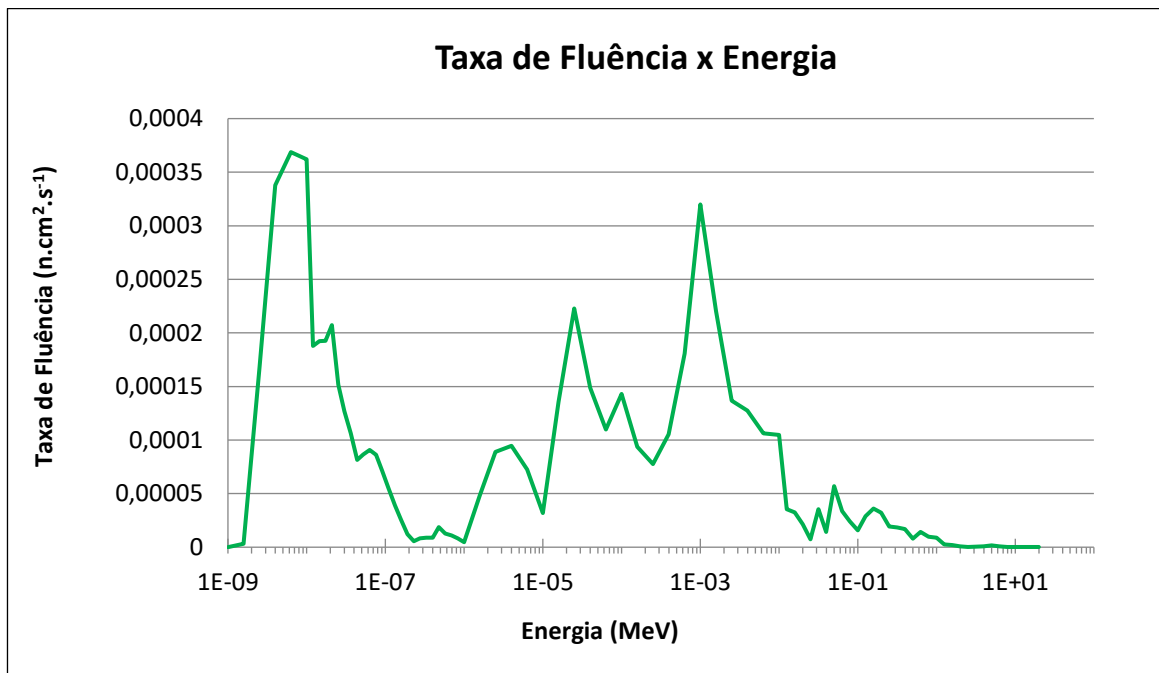


Figura 16 - Espectro em energia da Radiação de Fundo no LBE

Tabela 1 - Resultados de Energia média (MeV) e Taxa de Fluência ($\text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$).

Energia Média E (MeV)	Taxa de Fluência $\phi'(d)$ ($\text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
0,02 ± 0,00	0,01 ± 0,00

Tabela 2 - Resultados de Taxa de Equivalente de Dose ambiente e Individual.

Taxa Eq. de Dose Ambiente $H^*(10)$ ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)	Taxa Eq. de Dose Individual $H_p(10,0)$ ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
0,0004 ± 0,0000	0,0004 ± 0,0000

Tabela 3 - Resultados dos coeficientes de conversão fluência para $H^*(10)$ e $H_p(10,0)$.

Coef. de Conv. de Fluência para $H^*(10)$ $h^*(10)$ ($\text{pSv.cm}^2.\text{n}^{-1}$)	Coef. de conv. de Fluência para $H_p(10,0)$ $hp(10,0)$ ($\text{pSv.cm}^2.\text{n}^{-1}$)
18 ± 1	19 ± 1

4.2. Resultado da fonte de referência de ^{252}Cf

Na **Figura 17** é apresentado o espectro em energia da fonte de ^{252}Cf , que foi obtido usando as mesmas técnicas utilizadas nas fontes de $^{241}\text{AmLi}$ deste trabalho.

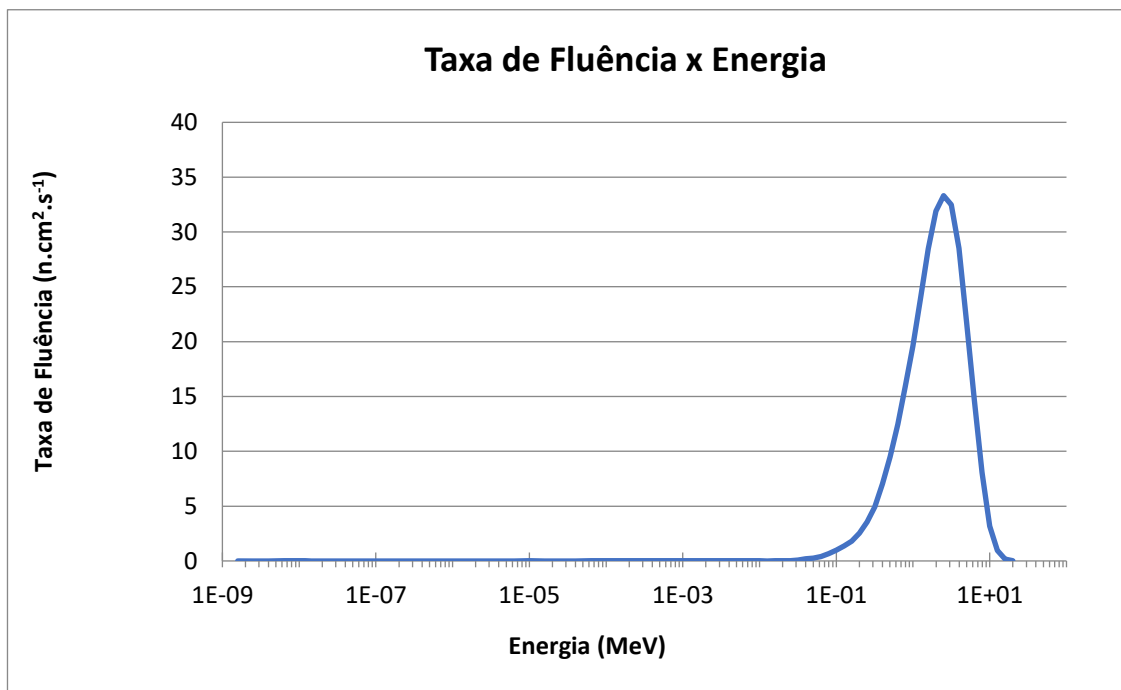


Figura 17 - Espectro de nêutrons obtido da medição de uma fonte de ^{252}Cf de com uma distância de 100 cm.

O espectro de fonte ^{252}Cf apresentou uma faixa de energia de 0,1 MeV a 10 MeV. Com um pico de energia de 2,5 MeV. Como se pode ver na **Tabela 4, 5 e 6** abaixo, a fonte de nêutrons de ^{252}Cf apresentou uma energia média de 2,06 MeV, sendo 2,13 MeV o valor esperado pela ISO 8529-1 [29] e 2,1 MeV o valor medido por Thomas *et al.* [5].

Tabela 4 - Resultados de Energia média (MeV) e Taxa de Fluência ($\text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

Energia Média	Taxa de Fluência
E (MeV)	$\phi'(d)$ ($\text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
2,06 \pm 0,10	309 \pm 15,5

Tabela 5 - Resultados de Taxa de Equivalente de Dose ambiente e Individual

Taxa Eq. de Dose Ambiente	Taxa Eq. de Dose Individual
$H^*(10)$ ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)	$H_p(10,0)$ ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)
432,52 \pm 21,6	449,09 \pm 22,5

Tabela 6 - Resultados dos coeficientes de conversão fluência para $H^*(10)$ e $H_p(10,0)$

Coef. de Conv. de Fluência para $H^*(10)$	Coef. de Conv. de Fluência para $H_p(10,0)$
$h^*(10)$ (pSv/n)	$h_p(10,0)$ (pSv/n)
389 \pm 19	404 \pm 20

Na **Figura 18** é comparado os espectros desse trabalho com a ISO 8529-1 [29], portanto, os resultados da fonte de nêutrons de ^{252}Cf foram satisfatórios. Assim, demonstram que a eletrônica dos equipamentos está funcionando perfeitamente. pois o espectro em energia encontrado condiz com o espectro da ISO 8529-1 de 2001[29].

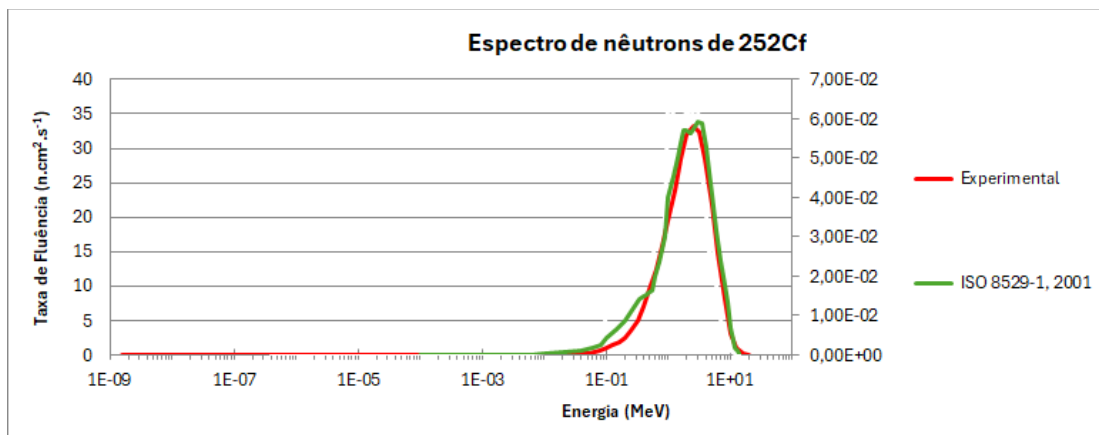


Figura 18 - Espectro comparado do experimental e da ISO 8529-1 de 2001

4.3. Resultado da fonte de $^{241}\text{AmLi}$

O *software Gamma Acquisition & Analysis* é responsável pela computação dos resultados captados pelo detector. Nas **Tabelas 7 e 8** abaixo é possível visualizar todos os dados que o *software* captou.

Tabela 7 - Resultados da medição com EMB a uma distância 100 cm da fonte - detector.

Fonte de AmLi - 100 cm de distância							
Esferas (Polegadas)	Número de contagens	Erro	Integral	Tempo(s)	Taxa Temporal	Radiação de Fundo	Taxa - Radiação de Fundo
0	1244,7	3,77%	1360,0	72000	0,0173	0,0147	0,003
2	1114	3,29%	1142	43200	0,0258	0,0214	0,004
3	3726,33	2,00%	3954,33	72000	0,0518	0,0194	0,032
5	6153,7	1,51%	6451,3	72000	0,0855	0,0233	0,202
8	2998	2,16%	3142	57600	0,0520	0,0117	0,143
10	2197,5	2,69%	2355	72000	0,0305	0,0054	0,081
12	1203	3,63%	1289	72000	0,0167	0,0050	0,037

Tabela 8 - Resultados da medição com EMB a uma distância 53 cm da fonte - detector.

Fonte de AmLi - 53 cm de distância							
Esferas (Polegadas)	Número de contagens	Erro	Integral	Tempo(s)	Taxa Temporal	Radiação de Fundo	Taxa - Radiação de Fundo
0	1057,3	4,05%	1146,7	72000	0,0147	0,0134	0,001
2	2404	2,61%	2583	72000	0,0334	0,0153	0,018
3	7657	1,27%	7868	72000	0,1063	0,0181	0,088
5	16213,7	0,92%	16938,3	72000	0,2252	0,0148	0,210
8	11111	1,18%	11834	72000	0,1543	0,0081	0,146
10	6246	1,50%	6545	72000	0,0868	0,0048	0,082
12	3047	2,28%	3256	72000	0,0423	0,0038	0,039

Na **Tabela 7** é visível que duas contagens estão com tempo reduzido do estabelecido. Isso ocorreu pois no LN, o salão de baixo espalhamento tem temporadas de altas demandas nas calibrações de equipamentos. Logo, essas duas medições tiveram que ter seu tempo reduzido. Mas isso não invalida o resultado, pois as contagens que foram usadas no NeuraLN são as taxas temporais, que são as contagens pelo tempo. Para efeito de comparação, na **Figura 18** é realizado uma normalização das taxas temporais, assim sendo possível comparar os resultados das medições de diferentes distâncias.

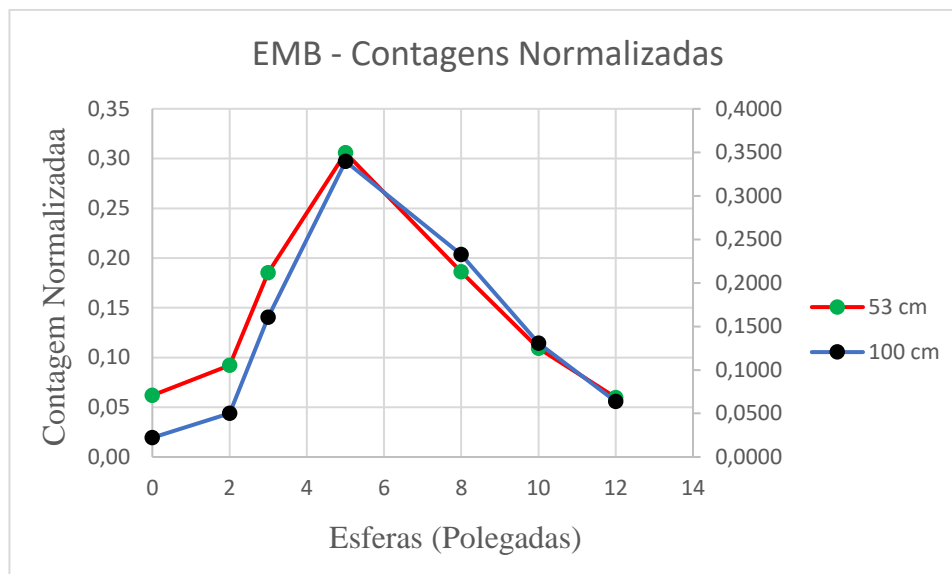


Figura 19 - Comparação das contagens medidos normalizados.

Na **Figura 18** é visível a normalização das contagens e que as duas medições correspondem. Apenas possuindo uma diferença por conta de distância entre a fonte e o detector. Com o detector mais próximo da fonte, o número de nêutrons captados pelo detector acaba gerando uma maior incerteza. Nas esferas 0 a 5 polegadas ocorre um aumento nas contagens progressivo, que se deve pelo baixo volume de material absorvedor. Assim, a partir da esfera de 8 polegadas, as contagens decaem rapidamente pelo aumento de material absorvedor. Sendo que no ponto da esfera 12 polegadas, temos um valor bem próximo das duas medições, justamente por ser a esfera com maior massa moderadora. Em questões numéricas, a medição sem esfera obteve uma alta variação entre as contagens obtidas, exatamente por ser a medição com zero moderação. E as medições com a esfera de 12 polegadas obtiveram uma diferença baixa, por volta de 7%. Além disso, essa diferença nos valores está relacionado a incerteza dos resultados, porém, a forma a qual as contagens se comportam demonstra que os resultados estão condizentes.

Através do NeuralN foi realizado o desdobramento do espectro de nêutrons da fonte de $^{241}\text{AmLi}$. Foi feito um refinamento no gráfico dos espectros em energia usando uma média móvel nas **Figura 19** e **20** para uma melhor visualização.

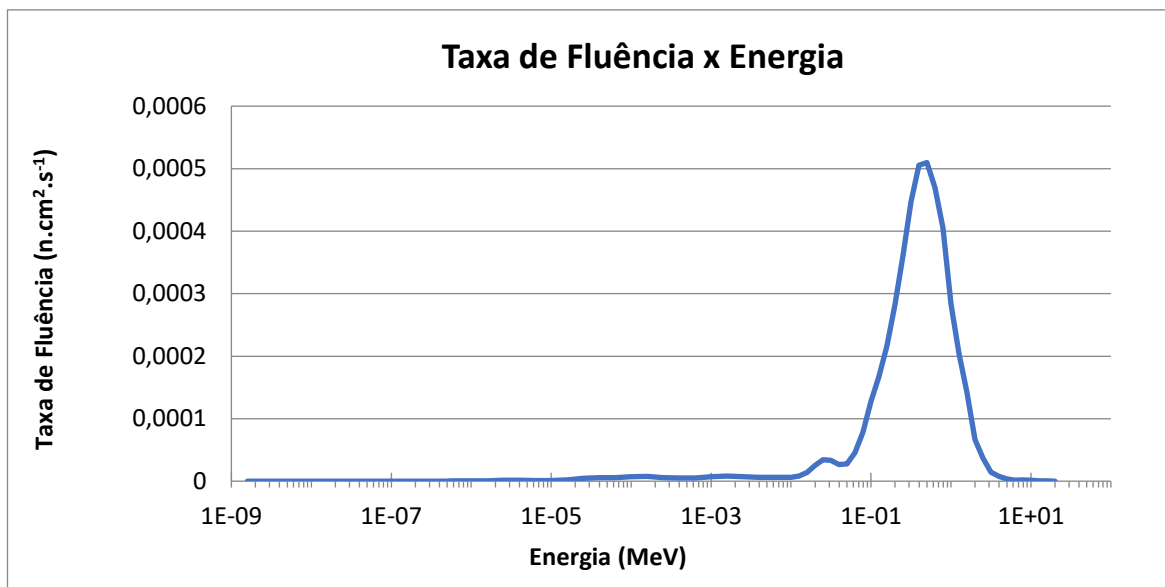


Figura 20 - Espectro obtido da fonte de $^{241}\text{AmLi}$ a uma distância de 100 cm.

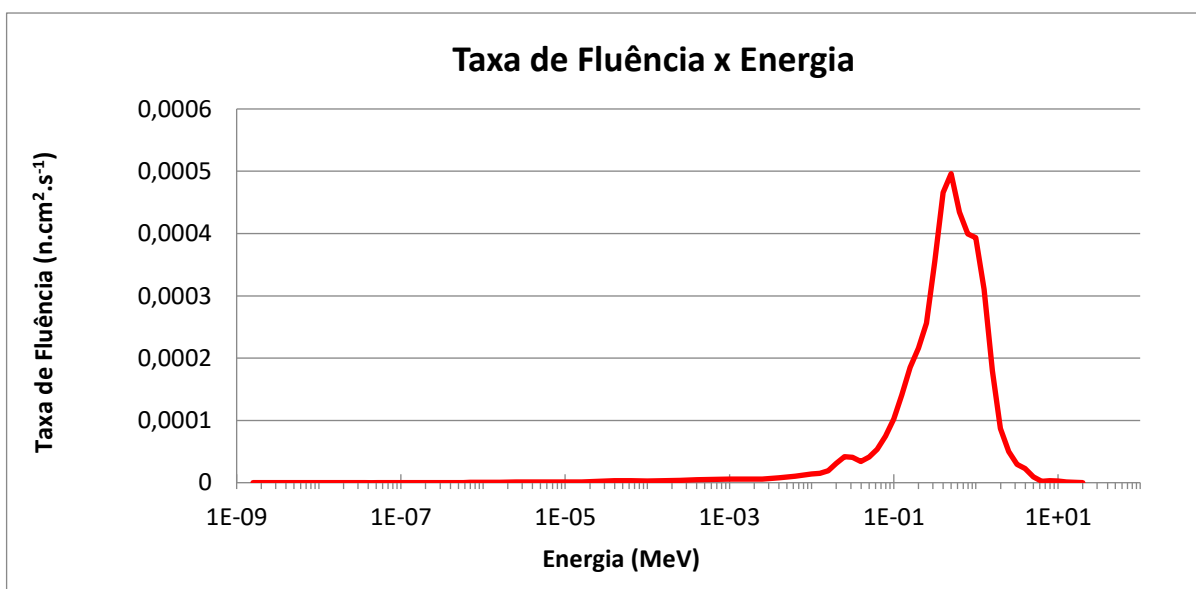


Figura 21 – Espectro obtido da fonte de $^{241}\text{AmLi}$ a uma distância de 53 cm.

A fonte de $^{241}\text{AmLi}$ produz nêutrons através de uma reação nuclear, emitindo nêutrons numa faixa de energia de 0,01 a 2 MeV e com uma energia de pico de aproximadamente de 0,4 MeV. A interação desses nêutrons com as esferas do EMB acaba moderando e absorvendo parte da energia dos nêutrons incidentes. Deste modo, faz com que nêutrons térmicos cheguem no centro da esfera e sejam contabilizados pelo cristal do detector. Assim, foi obtido uma taxa de fluência no pico por volta de $0,0005 \text{ n} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Na **Figura 21** fica mais visível a diferença entre os espectros, assim, é possível comparar os espectros das duas medições.

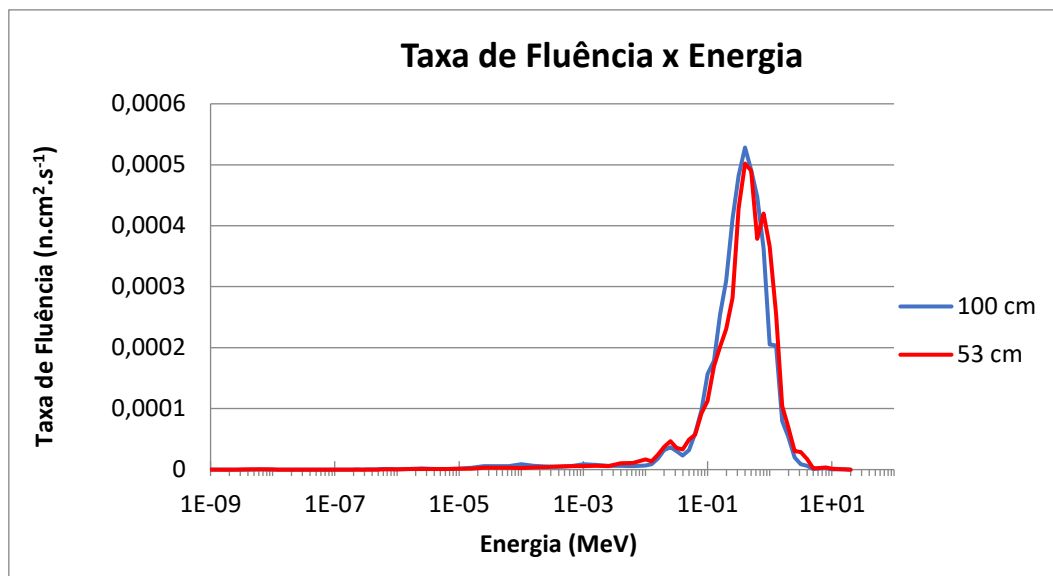


Figura 22 - Comparação entre os resultados das medições de $^{241}\text{AmLi}$.

A diferença entre as medições foi causada pela diminuição da distância entre a fonte e o detector, causando um espalhamento de nêutrons. Justamente fazendo com que o espectro de distância 53 cm fique inclinado para o lado de maior energia e causando deformidade no espectro. Na **Tabela 9** é disponibilizado o resultado em energia média e fluência de nêutrons da fonte de $^{241}\text{AmLi}$.

Tabela 9 - Resultados de energia média (MeV) e Taxa de Fluência ($\text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$) da fonte de $^{241}\text{AmLi}$.

$^{241}\text{AmLi}$	Energia Média			Taxa de Fluência		
	E (MeV)			$\phi'(d)$ ($\text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$)		
100 cm	0,44	\pm	0,02	0,0046	\pm	0,0002
53 cm	0,52	\pm	0,03	0,0046	\pm	0,0002

Para determinar os dados de taxa equivalente de dose individual $H_p(10)$ e dose ambiente $H^*(10)$ foi usado os dados recolhidos da conversão de fluência de nêutrons do NeuraLN, sendo apresentados respectivamente na **Tabela 10** e **Tabela 11**.

Tabela 10 - Resultados de Taxa de Equivalente de Dose ambiente e Individual da fonte de $^{241}\text{AmLi}$.

$^{241}\text{AmLi}$	Taxa Eq. de Dose Ambiente			Taxa Eq. de Dose Individual		
	$H^*(10)$ ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)			$H_p(10,0)$ ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)		
100 cm	0,0043	\pm	0,0002	0,0044	\pm	0,0002
53 cm	0,0045	\pm	0,0002	0,0046	\pm	0,0002

Tabela 11 - Resultados dos coeficientes de conversão fluência para H*(10) e Hp(10,0) da fonte de ²⁴¹AmLi.

²⁴¹ AmLi	Coef. de Conv. de Fluência para H*(10)			Coef. de Conv. de Fluência para Hp(10,0)		
	h*(10) (pSv.cm ² .n ⁻¹)			hp(10,0) (pSv.cm ² .n ⁻¹)		
100 cm	257	±	13	265	±	13
53 cm	271	±	14	280	±	14

O resultado em energia média das duas distâncias foi o esperado. A distância de 100 cm tendo uma energia média menor do que a distância de 53 cm. Os valores das taxas apresentam um resultado dentro da incerteza, demonstrando que os valores estão correspondendo independente da distância usada. E os coeficientes de conversão de fluência estão dentro do esperado.

Sendo a energia média determinada nesse trabalho de 0,48 MeV, sendo essa a média dos resultados obtidos, é possível fazer comparações com os resultados encontrado na literatura. Em 2016, Vega-Carrillo *et al.* [2] encontraram uma energia média da fonte de ²⁴¹AmLi de 0,4 MeV. Em 2004, Tagziria *et al.* [4] obtiveram 0,5 MeV. Em 2017, Weinmann-Smith *et al.* [3] obtiveram 0,5 MeV. E em 2021, Mozhayev *et al.* [9] compararam algumas literaturas sobre essa fonte e chegaram numa conclusão de que a fonte de ²⁴¹AmLi possui uma boa consistência nos resultados e acredita que sua energia média seja aproximadamente 0,46 MeV. Assim, realizando a média de todos os valores apresentados da literatura com a média em energia obtida no trabalho, foi obtido um valor de 0,47 MeV. Resultado que é bem próximo do resultado de Mozhayev *et al.* [9]. Vale ressaltar que essas diferenças de espectros podem ocorrer pelo fato por conta das proporções da fonte de nêutrons [21].

Capítulo 5

Conclusão

Este trabalho foi capaz de satisfazer o seu objetivo de reproduzir o espectro em energia, as taxas de fluência, as grandezas de radioproteção, tais como os equivalentes de dose individual e ambiente e os coeficientes de conversão de fluência para os equivalentes de dose da fonte isotópica de $^{241}\text{AmLi}$.

A fonte de nêutrons de $^{241}\text{AmLi}$ apresentou um excelente resultado, muito próximo de outras publicações. Assim, a fonte de $^{241}\text{AmLi}$ possui um valor médio de 0,47 MeV comparando com outros trabalhos. Contudo, a fonte não tem uma referência da ISO, o que invalida uma comparação.

É preocupante, por se tratar de uma fonte radioativa, a limitação do conhecimento sobre as características da fonte de $^{241}\text{AmLi}$. É crucial que haja um documento de referência dessa fonte feita pela ISO. Assim, um indivíduo ocupacionalmente exposto pode ter a consciência de que tipo de fonte e quais são suas grandezas com a qual está trabalhando. Ademais, existe um documento de referência sobre fontes de nêutrons que é a ISO 8529-1. Sendo que não há nele a fonte de nêutrons de $^{241}\text{AmLi}$. E nesse mesmo documento, levou 20 anos para obter uma atualização, que apenas atualizou os espectros das fontes de $^{241}\text{AmBe}$ e ^{252}Cf e excluiu a fonte de ^{241}AmB .

A fonte de $^{241}\text{AmLi}$ é uma fonte versátil, sendo mais fácil e barata de ser produzida, do que uma fonte de ^{252}Cf . Podendo ser mais uma opção para calibração de detectores, afinal, normalmente é usado fontes de $^{241}\text{AmBe}$. Além disso, é de importância para os laboratórios que trabalham com fontes de nêutrons terem o conhecimento sobre fontes de nêutrons, sendo que atualmente existem fontes de nêutrons sem o devido estudo, como a fonte desse trabalho. A pesquisa dessas fontes, as quais estão em deficiência, são extremamente necessários para trazer rastreabilidade das fontes de nêutrons. Portanto, são necessárias novas pesquisas, como experimentações e simulações para obter as características físicas dessa fonte e as diferenciando

por tamanho, para obter uma validação dos seus resultados. Podendo assim, obter mais uma fonte com rastreabilidade para usar em calibrações de equipamentos, ensaios não destrutivos, controle de qualidade de elemento combustível ou para realizações de outros serviços.

Referências Bibliográficas

- [1] “*Laboratório De Metrologia De Nêutrons*”. Disponível em: <<https://www.gov.br/ird/pt-br/assuntos/areas-de-atuacao/metrologia/metrologia-de-neutrons-1/apresentacao>>.
- [2] VEGA-CARRILLO, H. R.; MARTINEZ-OVALLE, S. A. “Few groups neutron spectra, and dosimetric features, of isotopic neutron sources”. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 117, p. 42–50, 2016.
- [3] WEINMANN-SMITH, R.; BEDDINGFIELD, D. H.; ENQVIST, A.; SWINHOE, M. T. “Variations in AmLi source spectra and their estimation utilizing the 5 Ring Multiplicity Counter”. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 856, p. 17–25, 2017.
- [4] TAGZIRIA, H.; WIEGEL, B.; KLEIN, H.; KNAUF, K.; WITTSTOCK, J.; ZIMBAL, A. “Measurement and Monte Carlo modelling of the JRC 241Am–Li(α ,n) source spectrum”. **Radiation Protection Dosimetry**, 2004.
- [5] THOMAS, D.; BEDOGNI, R.; MÉNDEZ, R.; THOMPSON, A.; ZIMBAL, A. “Revision of ISO 8529 — Reference Neutron Radiations”. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 180, n. 1–4, p. 21–24, 1 ago. 2018.
- [6] BRAMBLETT, R. L.; EWING, R. I.; BONNER, T. W. “A new type of neutron spectrometer”. **Nuclear Instruments and Methods**, v. 9, n. 1, p. 1–12, 1960.
- [7] LEMOS JUNIOR, R. M. *Desdobramento de espectros de nêutrons utilizando o método de Monte Carlo e redes neurais*. Tese de doutorado, 2009.
- [8] SANTOS, J. A. L. *Espectrometria de nêutrons com sistema de esferas de Bonner utilizando detectores passivos termoluminescentes*. Dissertação de mestrado, 2006.
- [9] MOZHAYEV, A. V.; MOORE, M. E.; MACE, E. K. “Characterization of two extraordinary AmLi neutron sources”. **Applied Radiation and Isotopes**, 2021.
- [10] NOUAILHETAS, Y. “Radiações Ionizantes e a vida”. **CNEN**. Rio de Janeiro, 2020.
- [11] TAUHATA, L.; SALATI, I. P. A.; DI PRINZIO, R.; DI PRINZIO, A. R. **Fundamentos de Radioproteção e Dosimetria**. CNEN. Rer.10. Rio de Janeiro, 2014.

- [12] CCIFUSP. “Raios cósmicos”. **Departamento de Física Nuclear**. Instituto de Física da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2021.
- [13] USBERCO, J.; SALVADOR, E. **Química, Volume Único**. 8ª ed. Editora Saraiva. São Paulo, 2010.
- [14] DORE, S. **Palestra introdutória- Curso de física da radiação I**. UFRJ. Rio de Janeiro, 2004.
- [15] SANTOS, V. **Radioatividade – 2ª parte**. UFRGS. Rio Grande do Sul, 2020.
- [16] CONNOR, N. “O que é o Decaimento Beta – Beta Radioatividade – Definição”. **Radiation Dosimetry**. 2020.
- [17] FEYNMAN. **Volume I. Lições de física**. Bookman. Companhia Editora. São Paulo, 2008.
- [18] ZAMBONI, C. B. **Fundamentos da física de nêutrons**. Editora Livraria da Física. São Paulo, 2007.
- [19] INCA. *Radiações ionizantes*. 2021. Disponível em: <<https://www.inca.gov.br/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/radiacoes/radiacoes-ionizantes>>.
- [20] BROWN, T. L.; LEMAY, H. E.; BURSTEN, B. E.; MURPHY, C. J.; WOODWARD, P. M.; STOLTZFUS, M. W. **Química a ciência central**. 13ª ed. Pearson. São Paulo, 2016.
- [21] ZIMBAL, A. “Compact NE213 neutron spectrometer with high energy resolution for fusion applications”. **Review of Scientific Instruments**, v. 75, n. 10, p. 3553–3555, 5 out. 2004.
- [22] THOMAS, D. J. “Neutron spectrometry for radiation protection”. **Radiation protection dosimetry**, v. 110, n. 1–4, p. 141–149, 2004.
- [23] THOMAS, D. J.; ALEVRA, A. V. “Bonner sphere spectrometers—a critical review”. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 476, p. 12–20, 2002.
- [24] HAYKIN, S. S. **Neural Networks and Learning Machines**. Pearson International Edition. 3ª Edição, Pearson, 2009.
- [25] TEIXEIRA, J. F. **O que é inteligência artificial**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- [26] AMABIS, J. M., MARTHO, G. R. **Fundamentos da Biologia Moderna**. Editora: Moderna, 4ª Edição. São Paulo, 2006.

- [27] MCCULLOCH W. & PITTS W. "A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity". **Bulletin of Mathematical Biophysics**, 5, p. 115-133, 1943.
- [28] ICRP 74. "Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation". **ICRP publication 74 International Commission on Radiological Protection**, 1995.
- [29] ISO-8529-1. **Characteristics and methods of production. International Organization for Standardization**, 2001.
- [30] BROOKS, F. D.; KLEIN, H. "Neutron Spectrometry - Historical review and present status", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, Section A Vol. 476 pp. 1-11, 2002.
- [31] THOMAS, D. J.; KLEIN, H. "Why is spectrometry needed for radiation protection", **Radiation Protection Dosimetry**, Vol. 107 pp. 13-21, 2003.