

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
FACULDADE DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS E LETRAS DE RIBEIRÃO PRETO  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

LUCAS DADALT MORERO

Caracterização dosimétrica de laboratório de calibração de detectores de nêutrons  
utilizando Método Monte Carlo

Ribeirão Preto

2021

Moreno, D. L	Caracterização dosimétrica de laboratório de calibração de detectores de nêutrons utilizando Método Monte Carlo		Mestrado FFCLRP 2021
--------------	---	--	----------------------------



LUCAS DADALT MORERO

Caracterização dosimétrica de laboratório de calibração de detectores de nêutrons  
utilizando Método Monte Carlo

**Versão Original**

Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia,  
Ciências e Letras de Ribeirão Preto da USP como  
parte das exigências para a obtenção do título de  
Mestre em Ciências.

Área de concentração: Física Aplicada à Medicina e  
Biologia

Orientadora: Patrícia Nicolucci

Ribeirão Preto

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

### **Ficha Catalográfica**

**Morero, D. L.**

Caracterização dosimétrica de laboratório de calibração de detectores de nêutrons utilizando Método Monte Carlo / Lucas Dadalt Morero; orientadora, Patrícia Nicolucci. – 2021

90 f.: il.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Física Aplicado à Medicina e Biologia, Departamento de Física, Faculdade de Filosofia, Ciência e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2021.

1. Nêutrons – 2. Calibração de detectores – 3. Simulação Monte Carlo – 4. MCNP – 5. Radioproteção

Nome: MORERO, Lucas Dadalt

Título: Caracterização dosimétrica de laboratório de calibração de detectores de nêutrons utilizando Método Monte Carlo

Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da USP como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Banca Examinadora

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Moisés e Elizabeth, alicerces sempre presentes em minha vida. Grato ao amor, ao suporte e aos exemplos de vida que são.

À minha irmã, Daresa, minha maior amiga e companheira. Grato por toda amizade, suporte e amor incondicional.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro agradecimento é para todos que foram fundamentais para o desenvolvimento do presente Mestrado. Destarte, destaco a orientadora Patrícia Nicolucci, o empreendedor José Luiz Bruçó e a pesquisadora Karla Patrão que tiveram a coragem de acreditar no desenvolvimento de um projeto ímpar da tríplice hélice da inovação. Isto posto, fica claro que a organização dos três setores, academia, iniciativa privada e governo, foram indispensáveis para a elaboração do projeto e como escreveu Immanuel Kant: “Ciência é conhecimento organizado”.

Não posso esquecer de agradecer a todos os colaboradores que contribuíram para minha formação e expandiram meus horizontes. À Nilza, da secretaria, por toda presteza, agilidade e carinho. Ao professor Adilton, por explorar o empreendedorismo, e, assim, fazer com que isto sobrevivesse dentro de mim, durante a graduação. Ao professor Alexandre Souza Martinez, pelas discussões e diálogos a respeito da história da física. Ao professor Carlos Ernesto Garrido, pelas concisas e duras críticas e discussões. Aos professores Antônio José da Costa e Marcelo Mulato, pelas aulas fantásticas “*out of the box*”. Destaco ainda o professor que me motivou, através de aulas esplendorosamente fantásticas, sem que soubesse, a ter ânimo, disposição e curiosidades mais do que suficientes para a conclusão do curso. Obrigado professor Martin Eduardo Poletti. Em suma, agradeço aqui a todos os professores. Cito aqui William Ramsay: “Progresso é feito por tentativa e falha, as falhas são geralmente muito mais numerosas que o sucesso e, ainda assim, são não registradas”. O motivo é que pensei inúmeras vezes, durante a graduação, em desistir.

A toda a comunidade e às amigadas que tive na universidade, que contribuíram, direta ou indiretamente, para a construção tanto das minhas perspectivas sobre o mundo quanto para o desenvolvimento do presente trabalho. Declaro ser este um espaço pequeno para tanto, mas destaco os amigos e referências acadêmicas Luis Felipe Santos Mendes e Gilberto Nakamura, os amigos Luis, Wellington, Everton, Wesley, Pedros e Leonardo. Aos grandes amigos de república Victor Trinca e Nairon Galvez e a todo o grupo que convivi no Cidra: Camila, Miriã,



Fernanda, Caio, Ivón, Cassiana e Patrícia. Agradeço ainda aos orientadores de iniciação científica, que se tornaram amigos: Nelson Augusto Alves e Antônio José da Costa Filho. Como relatou Wernher von Braun: “Pesquisa é o que estou fazendo e não sei o que estou fazendo”.

Aos amigos, acadêmicos e de levantamento de copo, que o mestrado me proporcionou: Caio, Vivian, Paulinho, Natasha e Kaio. Obrigado pelas histórias, estórias, drinks, conselhos, sugestões e por compartilharem tantos perrengues, risadas, ideias e momentos. Sobre ideias destaco Linus Pauling: “Se você quer ter boas ideias, você precisa ter muitas ideias” juntamente com Albert Einstein: “Nós não conseguimos resolver problemas pensando da mesma forma como eles foram criados”.

Agradeço ainda a todos os amigos diretamente exógenos à construção do trabalho acadêmico. A meu amigo de mais longa data Ramiro Nunes da Silva, à amiga e parceira Karol Senarese, às amigas para toda vida Iara Souza Lima, Mariana Chaves Micheletto, Julia Avelar Leme e Laísa Vieira. Obrigado por fazerem parte da minha vida e, como descreveu Nikola Tesla: “Nossas virtudes e falhas são inseparáveis como força e matéria. Quando elas se separam, o homem não é mais”.

À minha família, minha mãe Elizabeth Dadalt e meu pai Moisés de Paiva Morero pelo suporte, contribuição e exemplo que são na vida para eu me tornar a pessoa que sou hoje. A pessoa curiosa, questionadora e livre em que me tornei é fruto de vossas, veneravelmente, presenças. Minha irmã, Daresa Camila da Silva, também é responsável pela pessoa que sou hoje. Todo seu brilho, entusiasmo e retórica são pilares de exemplos que tenho como referência. Obrigado por todos os anos que vivemos juntos, em que, além de uma família, fomos amigos e havemos de assim ser pelo resto de nossas vidas. À minha família que proveu tanto suporte para que eu crescesse sem medos, aponto Marie Curie: “Nada na vida é para ser temido, apenas para ser compreendido. Agora é tempo de entendermos mais, de forma que tenhamos menos medos”.

Um agradecimento especial aos que estiveram, colossalmente, presentes durante esses dois últimos anos. Primeiro, a madame Caramuru, Marina Pires, por todos os diálogos diários com conselhos, críticas, elogios e pedaladas nos fins de

semana, regadas a garapa e descontração. Além disso, agradeço a toda a sua ajuda para o desenvolvimento do presente trabalho. Agradeço ao amigo e guru Titi, Tiago Chaud de Paula, um *workaholic* nato e uma das pessoas com maior coração que já conheci. Agradeço pelos ensinamentos, sugestões e por sempre estar escutando toda minha reclamação sobre a vida. Por fim, agradeço ao ancião José Carlos Borges, por todas as longas conversas, divagações, discussões e pelos ensinamentos, não somente a respeito da Física, mas, sim, em todos os campos em que se é possível imaginar. Obrigado por serem gigantes e, como Newton escreveu: “Se eu vi mais longe, foi por estar nos ombros de gigantes”.

A todos brasileiros contribuintes à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que proveram o fomento financeiro necessário para a realização do projeto. Não sei se valeu a pena do ponto de vista financeiro, mas agradeço e deixo a reflexão de Henrich Rohrer: “Ciência é andar constante em uma corda bamba entre fé cega e curiosidade, entre perícia e criatividade, entre padrão e inovação, entre experiência e epifania, entre ambição e paixão, entre arrogância e convicção – em resumo, entre o velho ontem e o novo amanhã”.

Ao(s) deus(es), que, em todas suas formas, estados e concepções fazem parte direta ou indiretamente de todas as nossas realidades.

Jules Henri Poincaré escreveu: “O cientista não estuda a natureza porque é útil, ele estuda a natureza porque ele tem prazer, tem prazer em sua beleza. Se a natureza não fosse linda, não valeria a pena ser descoberta e, se a natureza não valesse a pena ser descoberta, não valeria a pena viver a vida.”

Lloyd West: Quando digo que meu deus é contíguo ao cosmos, espero sugerir que meu deus é aquele sistema para o qual não existe um super sistema. Apresso-me em acrescentar que meu deus NÃO é nada e tudo, mas sim o TODO. Eu não adoro todas as partes, mas sim a coisa toda como uma totalidade. Posso aceitar a perda de uma única árvore, mas lutarei para salvar a floresta. A biosfera é um tomo mais sagrado do que qualquer espécie isolada, incluindo o *Homo sapiens*.

## EPÍGRAFE

“An experiment is a question which Science poses to Nature, and a measurement is the recording of Nature’s answer.” – **MAX PLANCK**

## RESUMO

MORERO, L. D. **Caracterização dosimétrica de laboratório de calibração de detectores de nêutrons utilizando Método Monte Carlo** [dissertação]. Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia, Ciência e Letras de Ribeirão Preto, Departamento de Física; 2021.

Qualquer atividade que envolva exposição à radiação ionizante deve considerar três princípios: justificção, otimização e limitação da dose. As aplicações com nêutrons, em específico, abrangem inúmeras áreas como: análise por ativação de nêutrons, tratamentos médicos pela terapia de captura de nêutrons pelo boro, o setor energético com reatores de fissão, prospecção de petróleo, entre outras. Todos os tipos de equipamentos de monitoração e detecção de radiação precisam ser calibrados para adequada usabilidade. Sendo assim, a calibração de detectores de nêutrons visando a monitoração de áreas é obrigatória. O único laboratório da América Latina que é rastreado ao BIPM é o Laboratório de Metrologia de Nêutrons/LNMRI/IRD. Em 2019 iniciou-se uma transferência de tecnologia do processo de calibração e irradiação de detectores de área e individuais em campos de referência de nêutrons gerados por fontes isotrópicas para a Metrobras Metrologia das Radiações Ionizantes. Portanto, foi necessária uma caracterização dos campos neutrônicos do laboratório da Metrobras, que utilizará fontes de  $^{241}\text{AmBe}$ . Neste trabalho, essa caracterização foi realizada utilizando-se o método Monte Carlo para transporte de radiação. Foram caracterizadas as taxas de fluência de nêutrons e de equivalente de dose ambiente em diferentes pontos do laboratório, bem como as posições de calibração de detectores em diferentes escalas de uso. Resultados apontam que o laboratório se encontra apto para realizar calibração de detectores de nêutrons conforme recomendações da ISO 8529-1.

**Palavras-chave:** Nêutrons; Calibração de detectores; Simulação Monte Carlo; MCNP; Radioproteção.

## ABSTRACT

MORERO, L.D. **Dosimetric characterization of a neutron detector calibration laboratory using Monte Carlo Method**[dissertation]. Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia, Ciência e Letras de Ribeirão Preto, Departamento de Física; 2021.

The use of radiation must be justified, optimized, and limited. Applications with neutrons cover areas such as chemical analysis with the NAA technique, medical treatments with the BNCT technique, the energy sector with fission reactors, oil prospecting, among many other areas. All types of equipment need to be calibrated for proper use. Therefore, the calibration of neutron area monitors is mandatory according to CNEN NN 3.01. The only laboratory in Latin America that is traced to BIPM is the Neutron Metrology Laboratory/LNMRI/IRD. In 2019, a technology transfer of the process of calibration and irradiation of area and individual monitors in reference fields of neutrons generated by isotropic sources to Metrobras Metrology of Ionizing Radiations was initiated. Therefore, a characterization of the laboratory's neutron field of  $^{241}\text{AmBe}$  sources was necessary. In this work, this characterization was performed using the Monte Carlo method for radiation transport. The neutron fluence and ambient dose equivalent rates at different points in the laboratory were characterized, as well as the detector's calibration positions for different usage scales. Results show that the laboratory is able to perform the calibration of neutron monitors according to ISO 8529-1 recommendations.

**Keywords:** Neutrons; Detector calibration; Monte Carlo Simulation; MCNP; Radioprotection.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Classificação dos nêutrons quanto à sua energia .....	26
<b>Tabela 2</b> - Características de fontes gama-nêutron .....	34
<b>Tabela 3</b> - Características de fontes alfa-nêutron .....	36
<b>Tabela 4</b> - Fator de Qualidade (Q) em função de (L) .....	38
<b>Tabela 5</b> - Coeficiente de conversão para equivalente de dose ambiente .....	40
<b>Tabela 6</b> - Interpretação do valor de erro relativo do MCNP5.....	46
<b>Tabela 7</b> - Características das duas fontes de <sup>241</sup> AmBe do LCDNM.....	47
<b>Tabela 8</b> - Espectro de nêutrons de referência da fonte de <sup>241</sup> AmBe.....	48
<b>Tabela 9</b> - Materiais utilizados para a construção do LCDNM.....	52
<b>Tabela 10</b> – Modelagens utilizadas para simular o LCDNM .....	53
<b>Tabela 11</b> – Posicionamento dos detectores nas simulações .....	58
<b>Tabela 12</b> - Taxa de fluência de nêutrons em função da distância .....	64
<b>Tabela 13</b> - Ajuste de potência da taxa de fluência .....	65
<b>Tabela 14</b> - Taxa de equivalente de dose ambiente em função da distância .....	70
<b>Tabela 15</b> - Ajuste de potência da taxa de equivalente de dose ambiente.....	70
<b>Tabela 16</b> - Taxa de equivalente de dose ambiente em diferentes posições .....	75
<b>Tabela 17</b> - Posições estimadas para a calibração de detectores de nêutrons.....	81

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Esquema de decaimento dos nêutrons.....	25
<b>Figura 2</b> - Esquema de interações dos nêutrons com a matéria.....	27
<b>Figura 3</b> - Esquema do espalhamento elástico de nêutrons .....	27
<b>Figura 4</b> - Esquema do espalhamento inelástico dos nêutrons.....	29
<b>Figura 5</b> - Esquema da absorção do nêutron e emissão de raios gama.....	30
<b>Figura 6</b> - Esquema da absorção do nêutron e emissão de partículas carregadas .	31
<b>Figura 7</b> - Esquema da absorção do nêutron e emissão de partículas neutras .....	31
<b>Figura 8</b> - Decaimento do $^{252}\text{Cf}$ por decaimento alfa para $^{248}\text{Cf}$ .....	33
<b>Figura 9</b> - Esquema de interações de fonte gama-nêutron.....	34
<b>Figura 10</b> - Esquema de interações de fonte alfa-nêutron.....	35
<b>Figura 11</b> - Esquema de grandezas relacionadas à radiação ionizante.....	37
<b>Figura 12</b> - Coeficiente de conversão de fluência para $\text{H}^*$ .....	41
<b>Figura 13</b> - Espectro de nêutrons da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ extraído da ISO 8529-1.....	47
<b>Figura 14</b> – Planta baixa e modelos do LCDNM. ....	50
<b>Figura 15</b> – Detalhes do poço de armazenamento das fontes .....	51
<b>Figura 16</b> – Planta baixa com as indicações das posições dos detectores .....	57
<b>Figura 17</b> - Fluência de nêutrons em função da energia .....	60
<b>Figura 18</b> - Fluência espectral de nêutrons em diferentes distâncias .....	62
<b>Figura 19</b> - Fluência de nêutrons em diferentes distâncias fonte-detector .....	63
<b>Figura 20</b> - Taxa de fluência de nêutrons em função da distância fonte-detector...	66
<b>Figura 21</b> - Fator de espalhamento para fluência de nêutrons .....	68
<b>Figura 22</b> - Taxa de equivalente de dose ambiente em função da distância.....	71
<b>Figura 23</b> - Fator de espalhamento com base no equivalente de dose ambiente ...	72
<b>Figura 24</b> - Mapa da taxa de equivalente de dose ambiente para a fonte exposta..	77
<b>Figura 25</b> - Mapa da taxa de equivalente de dose ambiente para a fonte recolhida	78
<b>Figura 26</b> - Comparação entre equivalente de dose ambiente e individual .....	80

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- CIDRA** – Centro de Instrumentação, Dosimetria e Radioproteção
- CNEN** – Comissão Nacional de Energia Nuclear
- CODATA** - *Committee on Data for Science and Technology*
- BIPM** – *Bureau International des Poids et Mesures*
- ICRU** – *International Commission on Radiation Units and Measures*
- ICRP** – *International Commission on Radiological Protection*
- IAEA** - *International Atomic Energy Agency*
- IPEN** – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
- IRD** – Instituto de Radiação e Dosimetria
- ISO** – *International Organization for Standardization*
- JSC** - *Johnson Space Center*
- LCR** – Laboratório de Ciências Radiológicas
- LCDNM** – Laboratório de Calibração de Detectores de Nêutrons da Metrobras
- LNMRI** – Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes
- MCNP** - *Monte Carlo N-Particle*
- MMC** – Método Monte Carlo
- NRC** - *Nuclear Regulatory Commission*
- USP** – Universidade de São Paulo



# SUMÁRIO

RESUMO .....	9
ABSTRACT .....	10
LISTA DE TABELAS .....	11
LISTA DE FIGURAS .....	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	13
1 INTRODUÇÃO .....	16
1.1 MOTIVAÇÃO .....	19
1.2 OBJETIVOS.....	20
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	21
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	24
3.1 OS NÊUTRONS .....	24
3.2 INTERAÇÃO DOS NÊUTRONS COM A MATÉRIA .....	26
3.2.1 Espalhamento elástico.....	27
3.2.2 Espalhamento inelástico.....	28
3.2.3 Captura neutrônica .....	29
3.3 AS FONTES DE NÊUTRONS .....	32
3.3.1 Fontes Isotópicas.....	32
3.4 GRANDEZAS E UNIDADES .....	36
3.4.1 Fluência .....	37
3.4.2 Dose absorvida.....	37
3.4.3 Equivalente de dose .....	38
3.4.4 Equivalente de dose individual.....	39
3.4.5 Equivalente de dose ambiente .....	39
3.5 MÉTODO MONTE CARLO .....	41
3.5.1 MCNP.....	42
3.6 CARACTERIZAÇÃO DE UM LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DE DETECTORES DE NÊUTRONS....	43
3.6.1 Espalhamento de nêutrons .....	43
4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	45
4.1 CÓDIGO MONTE CARLO PARA O TRANSPORTE DE PARTÍCULAS (MCNP) .....	45
4.2 FONTE DE RADIAÇÃO.....	46
4.3 CARACTERIZAÇÃO DA SALA DO LCDNM .....	49

4.3.1	Dimensões do laboratório .....	49
4.3.2	Materiais utilizados na construção do LCDNM .....	51
4.3.3	Modelagens do LCDNM no MCNP5.....	53
4.4	CÁLCULO DA TAXA DE FLUÊNCIA DE NÊUTRONS.....	54
4.5	CÁLCULO DA TAXA DE EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTE (H*) .....	54
4.6	FATOR DE ESPALHAMENTO DE NÊUTRONS.....	55
4.7	POSICIONAMENTOS DOS DETECTORES DE NÊUTRONS PARA CALIBRAÇÃO .....	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	59
5.1	FLUÊNCIA DE NÊUTRONS .....	59
5.1.1	Fluência de nêutrons para diferentes modelos de laboratório .....	59
5.1.2	Caracterização da fluência de nêutrons do LCDNM .....	61
5.1.3	Comparação dos valores de taxa de fluência de nêutrons do LCDNM .....	64
5.1.4	Fator de espalhamento através da fluência de nêutrons .....	67
5.2	EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTE.....	69
5.2.1	Comparação dos valores de taxa de equivalente de dose ambiente .....	69
5.2.2	Fator de espalhamento através do equivalente de dose ambiente .....	72
5.2.3	Taxa de equivalente de dose ambiente em posições de interesse .....	74
5.2.4	Mapa da taxa de equivalente de dose ambiente do LCDNM.....	76
5.3	EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTE E O EQUIVALENTE DE DOSE INDIVIDUAL .....	79
5.4	ESTIMATIVAS DAS POSIÇÕES DE CALIBRAÇÃO PARA O LCDNM .....	81
6	CONCLUSÕES.....	82
7	REFERÊNCIAS.....	83

# 1 INTRODUÇÃO

Desde a descoberta, em 1932, por James Chadwick (Chadwick, 1932), os nêutrons têm se tornado uma ferramenta indispensável na área industrial, médica e de pesquisa. Nêutrons podem ser encontrados, naturalmente, na atmosfera terrestre, oriundos de raios cósmicos e em processos de desintegração radioativa, como a fissão espontânea. Nêutrons também são produzidos artificialmente, através de aceleradores lineares (Dzitko et al., 2021), cíclotrons (Abolaban et al., 2021) e reatores nucleares (MacConnachie and Novog, 2021).

Na indústria, o principal uso dos nêutrons é na área energética, seja para a prospecção de carvão, gás ou petróleo que, juntos, correspondem a mais da metade da produção energética mundial (IEA, 2021). O nêutron também é um item fundamental para o processo utilizado em usinas nucleares: a fissão nuclear (Okumura et al., 2021).

Na área médica, o maior uso é na Terapia de Captura de Nêutrons por Boro (BNCT) (Barth et al., 1990). Outros usos também merecem menção, como a terapia com nêutrons rápidos (Fowler, 1964) e a análise por ativação com nêutrons (NAA) (Greenberg et al., 2011). Além disso, deve ser considerada, ainda, a presença indesejada dos nêutrons em salas de aceleradores lineares de alta energia (Kondo et al., 2021).

Na área científica, os nêutrons podem ser utilizados de várias formas, seja para a análise de materiais com a ativação de nêutrons (Sjöberg and Mommsen, 2021), como para a criação de novos materiais, como plásticos, polímeros ou reagentes químicos. Os nêutrons também são ferramentas presentes em estudos relacionados às estruturas cristalina e molecular (Meilleur et al., 2013), física nuclear, estudos de fissão e fusão, entre outros (Rinaldi, 2009).

Os instrumentos detectores de nêutrons utilizados na indústria, medicina ou pesquisa devem ser devidamente calibrados (Schuhmacher, 2004). A periodicidade de calibração depende de tipo e condição do instrumento, nível de uso, fatores ambientais, entre outros parâmetros.

Um ponto muito importante quando se aborda nêutrons é a proteção de trabalhadores (Hertel et al., 2021) atuando em áreas com reatores, aceleradores de partículas, prospecção de petróleo, etc, que devem utilizar dosímetros individuais para nêutrons (Eisenhauer et al., 1985).

Em toda a América Latina, um único laboratório rastreado ao *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) calibra medidores de nêutrons, tratando-se do Laboratório de Metrologia de Nêutrons (LM) que compõe o Laboratório Nacional de Metrologia de Radiações Ionizantes (LNMRI), localizado no Instituto de Radiação e Dosimetria (IRD), da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). O laboratório é referência na área de metrologia de nêutrons e é responsável pela manutenção do padrão brasileiro da grandeza fluência de nêutrons.

Em 2018, a CNEN abriu um edital para transferência de tecnologia do processo de calibração e irradiação de monitores de área e individuais em campos de referência de nêutrons gerados por fontes radioisotópicas. A vencedora do Edital foi a Metrobras Laboratório de Calibração Ltda, empresa localizada em Jardinópolis - SP, que desenvolve colaboração com o Centro de Instrumentação, Dosimetria e Radioproteção (CIDRA), que é um órgão vinculado ao Departamento de Física da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Ribeirão Preto (FFCLRP) da Universidade de São Paulo (USP).

Uma característica importante de um laboratório de calibração de nêutrons é a radiação espalhada, que deve ser quantificada. O Laboratório de Calibração de Detectores de Nêutrons da Metrobras (LCDNM) foi projetado e construído seguindo sugestões do LM e recomendações do documento *Reference neutron radiations – Part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field* (ISO, 2000), de modo a minimizar a fluência de nêutrons espalhados. A radiação espalhada é complexa e depende de vários fatores, como dimensões do laboratório, materiais utilizados na sua construção, geometria e posição da fonte, posições de calibração, entre outros.

Sendo assim, neste trabalho foram realizados cálculos computacionais para estimativa das características dos campos neutrônicos do LCDNM. Os valores obtidos para fluência, taxa de equivalente de dose ambiente e espalhamento em cada posição

de interesse foram importantes para a prévia avaliação metrológica e dosimétrica do laboratório.

## **1.1 Motivação**

A principal motivação deste trabalho foi auxiliar no planejamento e na construção de um novo laboratório para calibração de detectores de nêutrons, a fim de expandir a capacidade de calibração de detectores de nêutrons tanto para usuários nacionais como internacionais. Outra grande vantagem do novo laboratório é que o LNMRI passaria a exercer com mais abrangência as atividades de desenvolver, manter e disseminar os padrões nacionais para radiações ionizantes e radioatividade.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho teve como objetivo geral uma avaliação da adequação das instalações do LCDNM. Para atingir este objetivo, foram estabelecidos dois objetivos específicos:

- a) Caracterização dos campos neutrônicos do LCDNM e comparação com outros estudos;
- b) Estimativa das taxas de equivalente de dose ambiente em posições relevantes para calibração e proteção radiológica no LCDNM.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A grande aplicabilidade dos nêutrons em setores diversos, porém altamente específicos, limita sua disponibilidade apenas para países tecnologicamente capazes de produzir energia nuclear, extrair petróleo, utilizar da terapia de captura de nêutrons pelo boro ou, ainda, utilizar os nêutrons para ativação de materiais (Lacoste, 2010). A grande variedade de aplicações necessita e implica em vários espectros e fluência de nêutrons, o que torna o processo de medição mais complexo.

Todo laboratório destinado para calibração de nêutrons sempre tende a planejar tanto a geometria quanto os materiais do laboratório para obterem o menor espalhamento, quanto possível, dos nêutrons.

Existem laboratórios desenvolvidos para estudos metroológicos, dosimétricos e, também, pesquisa de novos detectores, como é o caso do *Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety* (IRSN) (Gressier et al., 2003).

Sendo assim, existe uma quantidade considerável de laboratórios de nêutrons caracterizados no mundo todo:

- a) *Nuclear Engineering Department of the Polytechnic University of Madrid* (DIN – UPM) na Espanha (Gallego et al., 2004);
- b) *Svedberg Laboratory* (TSL) na Suécia (Prokofiev et al., 2007);
- c) *Australia's Nuclear Science and Technology Organisation* (ANSTO) na Austrália (Meriaty, 2009);
- d) *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL) nos Estados Unidos (Radev, 2009);
- e) *Paul Scherrer Institute* (PSI) na Suíça (Hoedlmoser et al., 2011);
- f) *Institute for Nuclear Science and Technology* (INST) no Vietnã (Le et al., 2017);
- g) *Advanced Industrial Science and Technology* (AIST) no Japão (O'Rourke et al., 2020), entre outros.

No Brasil, existem alguns laboratórios de nêutrons: o LNMRI (Souza et al., 2007), o Laboratório de Calibração do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares



(IPEN) (Alvarenga et al., 2013) e o Laboratório de Ciências Radiológicas (LCR) (Pereira et al., 2018).

É importante destacar que existem ainda outros laboratórios e instalações que utilizam fontes de nêutrons e que não foram mencionados. Além disso, os laboratórios de nêutrons costumam sofrer alterações estruturais com o intuito de reduzir o espalhamento dos nêutrons ou aumentar a capacidade de uso. Portanto, após tais alterações são realizadas novas caracterizações (Rene Vega-Carrillo et al., 2012).

Quanto aos laboratórios de calibração existem algumas instalações que não estão rastreadas ao BIPM. Os únicos países que fazem parte do comitê de medidas de nêutrons são: Espanha, China, França, República Checa, Rússia, Itália, Coreia, Estados Unidos, Brasil, Japão, Canadá, Alemanha, Inglaterra, Canadá e Eslováquia.

A caracterização de laboratórios de nêutrons tem como um dos principais objetivos a quantificação do espalhamento em diferentes posições do laboratório. Para tanto são comumente utilizados, experimentalmente, métodos como os de: cone de sombras, ajuste generalizado, semiempírico e o do ajuste reduzido (ISO, 2000). Uma quantidade considerável dos trabalhos utilizam, também, o Método Monte Carlo para realizar simulações computacionais dos campos neutrônicos do laboratório (Alvarenga et al., 2019; Grande et al., 2020; Le et al., 2018).

No tocante aos pacotes computacionais de simulação Monte Carlo para aplicação com campos de nêutrons, três tem destaque: MCNPX, GEANT4 e FLUKA (Agostinelli et al., 2003; Battistoni et al., 2007; Waters et al., 2007). Existem diferentes abordagens para simulação dos campos neutrônicos de uma instalação: utilização de detectores pontuais (Pereira et al., 2014) ou detectores de fluxo médio em uma célula (Murata et al., 2014).

Outro fator importante é quanto ao nível de detalhe do modelo empregado na simulação. Podem ser consideradas: fontes de dimensões pontuais ou reais, geometria detalhada da fonte, de estruturas nas vizinhanças dos laboratórios, entre outras (Rene Vega-Carrillo et al., 2012).

A contribuição do espalhamento na resposta do detector é definida na ISO 8529-2 como a alteração na leitura do instrumento devido ao espalhamento da sala e

não como a alteração na fluência ou no taxa de equivalente de dose ambiente (ISO, 2000). Isso acontece pois cada instrumento apresenta resposta diferente para fluência energética e taxa de equivalente de dose ambiente, grandezas que dependem tanto da geometria quanto dos materiais do instrumento (Clem and Dorman, 2000).

Sendo assim, pode-se citar modelagens computacionais:

- a) realistas, que simulam as geometrias e materiais dos instrumentos (Bourne et al., 2014; Van Der Ende et al., 2016);
- b) simplificadas, utilizando detectores pontuais ou anelares (Le et al., 2017; Maglieri et al., 2015; Nishino et al., 2016);
- c) outras que simulam as técnicas experimentais, como o cone de sombras, para estimar o espalhamento (Alvarenga et al., 2020a; Méndez-Villafañe et al., 2010).

A literatura apresenta estudos que investigam o impacto do tamanho dos laboratórios na fluência de nêutrons espalhados (Khabaz, 2015), a contribuição de cada arranjo experimental para o espalhamento (Olsher et al., 2007) e que comparam os próprios métodos para avaliação do espalhamento (Jun et al., 2008), entre outros.

Desta forma, este trabalho visa usar uma metodologia computacional para estudar o espalhamento de nêutrons em um novo laboratório de calibração de detectores de nêutrons utilizando uma modelagem que permita avaliar os diferentes componentes do laboratório na fluência neutrônica e no equivalente de dose ambiente.

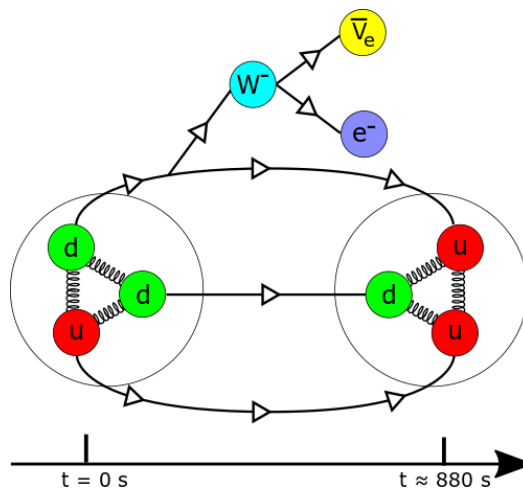
## 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 3.1 Os nêutrons

Em 1920, no artigo *Bakerian Lecture: Nuclear constitution of atoms* Rutherford supõe a existência de um átomo de massa unitária e com carga nuclear zero (Rutherford, 1920) . Em 1932, com a publicação do artigo *Possible Existence of a Neutron*, de J. Chadwick na *Nature*, foi relatada a descoberta da existência do nêutron (Chadwick, 1932). Chadwick utilizou um detector que consistia em uma câmara de ionização conectada a um amplificador e um oscilógrafo para registro. O experimento consistiu em bombardear Berílio com partículas alfa do Polônio. A radiação resultante da interação do feixe de partículas alfa com Berílio era de difícil explicação se fossem assumidas as conservações de momento e energia das colisões. Chadwick observou que as dificuldades desaparecem se fossem consideradas partículas de massa 1 unidade e carga nula, os nêutrons.

O *Committee on Data for Science and Technology* (CODATA) apresenta informações como massa do nêutron  $1,674927211(84) \times 10^{-27}$  kg ou 1,00866491595 u. O tempo de meia-vida fora do núcleo é de, aproximadamente, 880,2 s de acordo com informações do *Particle Data Group* (Mohr et al., 2016). O decaimento beta do nêutron (n) resulta em um próton (p), um elétron (e) e um antineutrino ( $\bar{\nu}_e$ ). O nêutron é um bárion, eletricamente neutro, composto por um quark “up” (u) e dois quarks “down” (d). Os quarks “up” têm carga  $2/3$  e os quarks “down” têm carga  $-1/3$ . O decaimento envolve a emissão de um bóson ( $W^-$ ) do quark “down” dentro do nêutron, convertendo-o em um quark “up” e, conseqüentemente, convertendo o nêutron em próton. O bóson, então, decai para um elétron e um antineutrino como representado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (Nico, 2009).

**Figura 1** - Esquema de decaimento dos nêutrons. Na simbologia  $t$  representa o tempo de meia-vida do nêutron fora do núcleo;  $u$  representa um *quark* “up”;  $d$  um *quark* “down”,  $W^-$  um bóson,  $e^-$  um elétron e  $\bar{\nu}_e$  um antineutrino. Verifica-se que no decaimento do *quark* “down” para o *quark* “up” existe a emissão de um bóson.



Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

Os nêutrons apresentam características distintas por serem eletricamente neutros. Tal característica faz com que não tenham nenhum tipo de atração ou repulsão Coulombiana e, portanto, interagem diretamente com o núcleo através de forças nucleares. Por não interagirem por forças Coulombianas são capazes de penetrar blindagens mais espessas e, assim, ser usados para fornecer informações das regiões mais internas das amostras (Eberhardt et al., 2005).

Por serem eletricamente neutros, os nêutrons são classificados como radiações indiretamente ionizantes. Os nêutrons, em específico, apresentam cascatas de interação capazes de ionizar a matéria, incluindo o tecido biológico. Diante dessa problemática, surge a necessidade de monitoração da radiação de nêutrons. A monitoração é uma tarefa complexa, visto a grande variação energética envolvida em suas aplicações e a presença das radiações que geralmente os acompanham, como é o caso da radiação gama.

Os nêutrons espalhados fazem com que cada ponto do laboratório apresente um espectro diferente do espectro de referência e, portanto, taxas de doses diferentes, que podem implicar em erro sistemático se não propriamente caracterizados.

Atualmente, não existe concordância completa quanto às classificações dos nêutrons de acordo com a energia. Diferentes organizações, como o *Nuclear*

*Regulatory Commission (NRC), Johnson Space Center (JSC), International Atomic Energy Agency (IAEA)*, adotam diferentes valores e definições para as energias dos feixes de nêutrons. Sendo assim, neste trabalho, foram definidas três regiões para definição da energia dos nêutrons, conforme disposto na Tabela 1.

**Tabela 1** - Classificação dos nêutrons quanto à sua energia. Os intervalos escolhidos levam em consideração os valores de algumas organizações como NRC, JSC E IAEA, o coeficiente de conversão de fluência para equivalente de dose ambiente e a faixa de energias consideradas relevantes para um laboratório de calibração comercial.

Nomenclatura	Energia
Lentos	$E < 1 \text{ eV}$
Intermediários	$1 \text{ eV} < E < 10 \text{ keV}$
Rápidos	$E > 10 \text{ keV}$

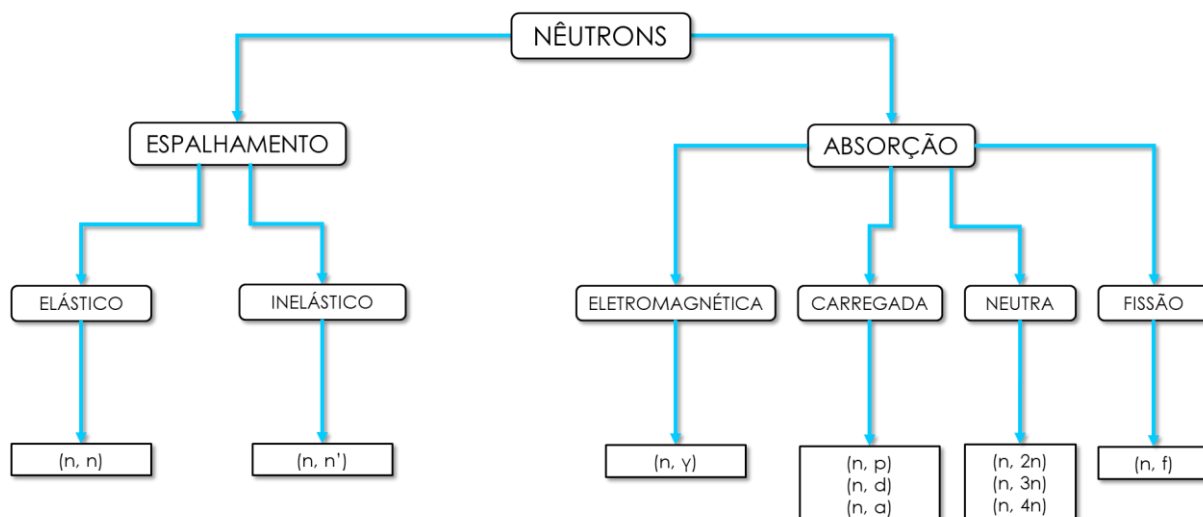
Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

### 3.2 Interação dos nêutrons com a matéria

A interação dos nêutrons com a matéria pode ser descrita através da seção de choque dessas partículas com a matéria. A seção de choque ( $\sigma$ ) pode ser definida para radiações em geral e está relacionada como a probabilidade de interação de uma radiação com a matéria. Fisicamente, pode ser representada pela área aparente que um centro de interação, como um elétron, um núcleo ou um átomo, como um todo, apresenta quando interage com a radiação incidente. A unidade é o  $\text{m}^2$ , mas, comumente, utiliza-se a unidade *barn* (*b*), que equivale a  $10^{-28} \text{ m}^2$ .

A interação dos nêutrons com a matéria depende da energia do nêutron incidente e do material alvo (Knoll, 2010) e pode ser separada em dois tipos de efeitos: espalhamento ou absorção. O espalhamento é subdividido em elástico e inelástico e a absorção é subdividida em eletromagnética, carregada, neutra e de fissão. Um esquema desses processos pode ser observado na Figura 2.

**Figura 2** - Esquema de interações dos nêutrons com a matéria. O nêutron interage com a matéria através de interações de espalhamento e absorção. As interações podem ser classificadas em relação à natureza das partículas emitidas e quanto à forma de interação.

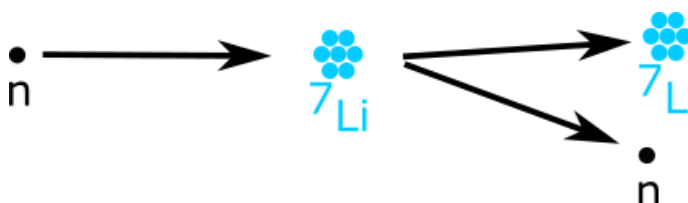


Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

### 3.2.1 Espalhamento elástico

Nas interações de espalhamento, existe uma redução na energia do nêutron incidente e a alteração da trajetória. O espalhamento elástico ocorre quando a energia cinética total do nêutron e do núcleo alvo não se altera pela interação como representado na Figura 3.

**Figura 3** - Esquema do espalhamento elástico de nêutrons. O nêutron tem a capacidade de interagir com um núcleo de  ${}^7\text{Li}$  conservando a energia cinética total do nêutron e do núcleo alvo.



Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

Considerando-se um nêutron com energia cinética  $E$  colidindo com um núcleo de massa  $A$ , escreve-se que a perda de energia média é:

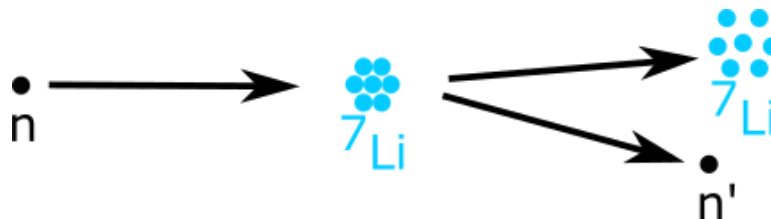
$$\Delta \bar{E} = \frac{2EA}{(A+1)^2} \quad (1)$$

Portanto, para reduzir a velocidade dos nêutrons com o menor número possível de interações elásticas é preciso usar núcleos com massa pequena. A critério de exemplo, considerando-se o hidrogênio, com  $A = 1$ , tem-se que a perda de energia média é de  $0,5 E$ . Desta forma, um nêutron perde metade da energia cinética inicial após colidir com um núcleo de hidrogênio. Para os nêutrons atingirem o equilíbrio térmico ( $0,025 \text{ eV}$ ) são necessárias, aproximadamente, 27 colisões. Salienta-se que o número de colisões para termalizar o nêutron depende do número de massa,  $A$ , do núcleo alvo e da energia dos nêutrons incidentes. Quanto maiores forem a energia do nêutron e o  $A$  do núcleo, maior será a quantidade de colisões para a termalização (Rinard, 1997).

### 3.2.2 Espalhamento inelástico

O espalhamento inelástico é similar ao espalhamento elástico, porém a energia cinética total do nêutron e do núcleo alvo é alterada pela interação, como esquematizado na Figura 4. Isso ocorre porque existe um rearranjo do núcleo alvo para um estado excitado que pode emitir radiação. Portanto, a energia cinética total dos nêutrons espalhado e do núcleo é menor que a energia cinética total do nêutron incidente. A diferença da energia cinética é utilizada para levar o núcleo alvo a um estado excitado (Lehar et al., 1961).

**Figura 4** - Esquema do espalhamento inelástico dos nêutrons. O nêutron tem a capacidade de interagir com um núcleo de  ${}^7\text{Li}$ , provocando uma excitação do núcleo. Como o núcleo é excitado, a energia cinética total do nêutron e do núcleo alvo é alterada pela interação.



Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

As equações que descrevem a perda de energia média nesse tipo de interação são mais complexas, pois dependem dos níveis de energia do núcleo alvo. Na prática, observa-se uma alteração da trajetória do nêutron e uma redução de sua energia. Além disso, é interessante destacar que o núcleo alvo precisa ter estados energéticos excitados. Portanto, é necessário que o nêutron incidente tenha energia suficiente para transferir e provocar o processo de excitação no núcleo alvo.

### 3.2.3 Captura neutrônica

Nos processos de absorção que também são comumente denominados de captura, o nêutron incidente é capturado pelo núcleo alvo e então podem ser emitidas vários tipos de radiações. Uma das formas de separar os tipos de interação de absorção é através das radiações emitidas pelo núcleo: eletromagnéticas, carregadas, neutras ou produtos de fissão.

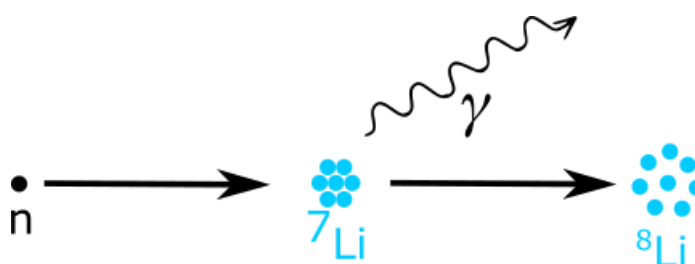
As interações de absorção são o que tornam a especificação das blindagens de nêutrons complexa. Isso ocorre porque vários tipos de radiações diferentes, como gama, elétrons, alfa e até mesmo produtos de fissão podem ser produtos, dependendo da energia dos nêutrons incidentes e dos núcleos presentes.



### 3.2.3.1 Emissão de raios gama

A emissão de raios gama ocorre quando a absorção do nêutron pelo núcleo resulta, entre outros produtos, em radiação gama. A representação dessa interação pode ser observada na Figura 5.

**Figura 5** - Esquema da absorção de um nêutron e emissão de raios gama. O nêutron, ao incidir com o  ${}^7\text{Li}$ , tem a possibilidade de ser absorvido pelo mesmo e, assim, existe a formação de  ${}^8\text{Li}$  juntamente com a emissão de radiação gama.

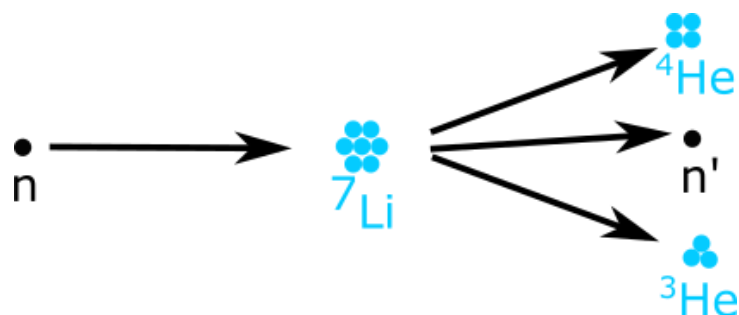


Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

### 3.2.3.2 Emissão de partículas carregadas

Ocorre quando a absorção do nêutron pelo núcleo resulta, entre outros produtos, em partículas carregadas, como deutério, trítio, partículas alfas, entre outras, como mostra o exemplo da Figura 6.

**Figura 6** - Esquema da absorção de um nêutron e emissão de partículas carregadas. O nêutron ao incidir com o núcleo de  ${}^7\text{Li}$  pode ser absorvido pelo mesmo resultando em três produtos: um núcleo de  ${}^4\text{He}$ , um núcleo de  ${}^3\text{He}$  e um nêutron.

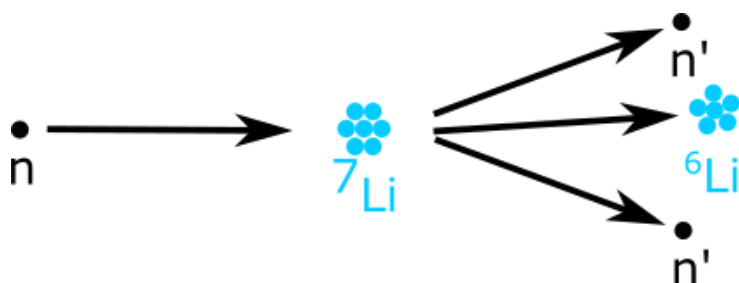


Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

### 3.2.3.3 Emissão de partículas neutras

Esse tipo de interação ocorre quando a absorção do nêutron pelo núcleo resulta, entre outros produtos, em outros nêutrons. A emissão, na interação de absorção, na qual um único nêutron é absorvido e um nêutron é liberado, é indistinguível de um evento de espalhamento (Rinard, 1997). Portanto, pode existir liberação de mais de um nêutron, como no exemplo da Figura 7.

**Figura 7** - Esquema da absorção de um nêutron e emissão de partículas neutras. O nêutron ao incidir com o núcleo de  ${}^7\text{Li}$  pode ser absorvido pelo mesmo resultando em um núcleo de  ${}^6\text{Li}$  e dois nêutrons.



Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

### 3.3 As fontes de nêutrons

Cada fonte de nêutrons apresenta um espectro energético e atividade que, juntos, são como uma assinatura específica de cada fonte. As fontes de nêutrons podem ser separadas em três grupos: aceleradores de partículas, reatores nucleares e fontes radioativas (Knoll, 2010).

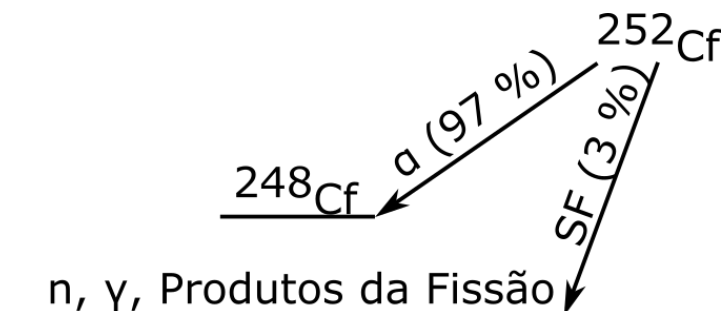
#### 3.3.1 Fontes Isotópicas

É o método mais acessível e mais utilizado para calibração de detectores de nêutrons. Os motivos para tal são: o custo de aquisição, inferior aos outros dois grupos, uma fluência relativamente baixa, espectros energéticos bem conhecidos, portabilidade das fontes e facilidade de operações. As fontes isotópicas podem ser divididas em três subgrupos, de acordo com a reação utilizada para produção do feixe de nêutrons: fissão espontânea, reações alfa ( $\alpha$ , n) e reações gama ( $\gamma$ , n) (Knoll, 2010).

##### 3.3.1.1 Fissão espontânea

A fissão espontânea é geralmente encontrada em elementos de alto número atômico. Alguns materiais decaem por fissão espontânea, emitindo nêutrons, como é o caso de  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{249}\text{Bk}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$ , entre outros (Blinov, 1985). O decaimento do  $^{252}\text{Cf}$  é representado na Figura 8.

**Figura 8** - Decaimento do  $^{252}\text{Cf}$  por decaimento alfa para  $^{248}\text{Cf}$  e por fissão espontânea produzindo nêutrons, raios gama e produtos de fissão.



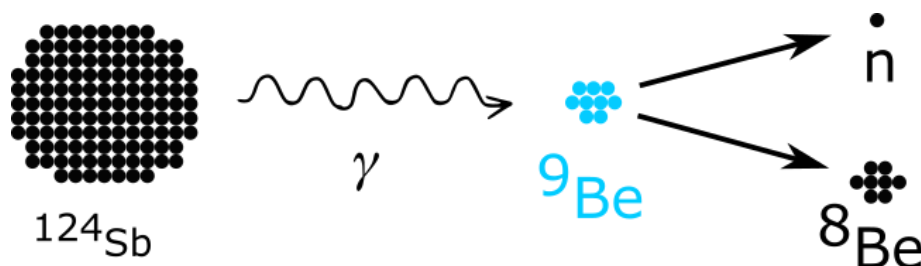
Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

A fonte de  $^{252}\text{Cf}$  é uma das fontes recomendadas pelas organizações internacionais para uso em calibração de detectores (ISO, 2001). As principais desvantagens dessas fontes são a meia vida curta (2,645 anos) e a emissão de outras radiações, como gama. É uma das fontes mais utilizadas para a calibração de detectores (Guzman-Garcia et al., 2015; Kim et al., 2015; Lacoste, 2010).

### 3.3.1.2 Fontes ( $\gamma$ , n)

Consistem na composição de um elemento emissor de gama de alta energia e um elemento que, quando absorve a radiação gama, tem a capacidade de liberar nêutrons, como mostra o esquema da Figura 9 (Wattenberg, 1947). As principais desvantagens de tais fontes são os elementos emissores de gama de alta energia terem meia-vida curta e alta atividade, que podem ser um risco radiobiológico, além de contaminantes do feixe de nêutrons.

**Figura 9** - Esquema de interações de fonte gama-nêutron. O núcleo de  $^{124}\text{Sb}$  é capaz de emitir raios gama com energia suficiente para interagir com o núcleo de  $^9\text{Be}$  que decai emitindo um nêutron para  $^8\text{Be}$ .



Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

Na Tabela 2 podem ser vistas algumas combinações de elementos que produzem nêutrons.

**Tabela 2** - Características de algumas fontes gama-nêutron. As fontes de gama de altas energias geralmente apresentam tempo de meia-vida curtos:  $E_\gamma$  é a energia dos raios gama emitidos pela fonte para produzir nêutrons de energia média  $E_n$ .

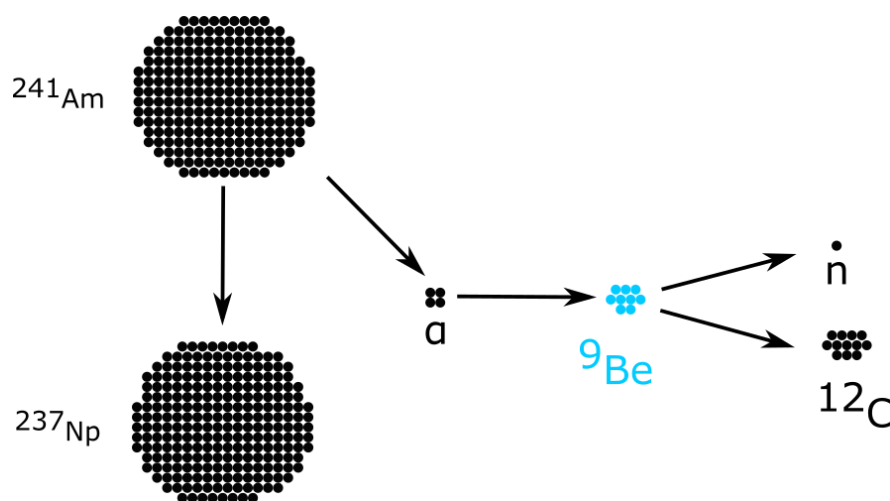
Fonte	Meia vida (h)	$E_\gamma$ (MeV)	$E_n$ (MeV)	Taxa de emissão (nêutrons/s)
$^{24}\text{Na} + \text{Be}$	15,0	0,966	0,83	$1,3 \times 10^5$
$^{24}\text{Na} + \text{D}_2\text{O}$	15,0	0,261	0,22	$2,7 \times 10^5$
$^{88}\text{Y} + \text{Be}$	2496,0	0,166	0,158	$1,0 \times 10^5$
$^{124}\text{Sb} + \text{Be}$	1440,0	0,031	0,0248	$1,9 \times 10^5$

Fonte: Poston (2003, p. 610).

### 3.3.1.3 Fontes ( $\alpha$ , n)

As reações do tipo alfa ( $\alpha$ , n) constituem combinações entre um emissor alfa e um elemento com baixo número atômico, como o Berílio, que incorpora a partícula alfa, emitindo nêutrons e outras radiações. A Figura 10 representa tais interações.

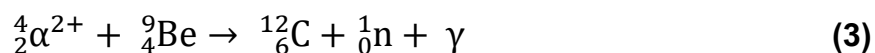
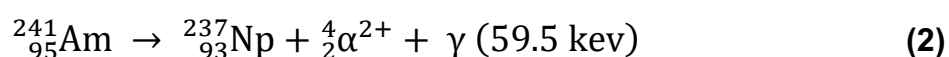
**Figura 10** - Esquema de interações de fonte alfa-nêutron. O núcleo de  $^{241}\text{Am}$  é capaz de emitir partículas alfa com energia suficiente para interagir com o núcleo de  $^9\text{Be}$ , resultando na formação de um núcleo de  $^{12}\text{C}$  e um nêutron.



Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

As fontes de  $^{241}\text{AmBe}$  são compostas por uma mistura de  $^{241}\text{Am}$  com  $^9\text{Be}$ . A radiação alfa do  $^{241}\text{Am}$  interage com o núcleo do  $^9\text{Be}$ , formando  $^{12}\text{C}$ ,  $^1_0\text{n}$  e radiação gama.

Na reação (2) é possível observar o decaimento do  $^{241}\text{Am}$  e na reação (3) a interação da partícula alfa com o  $^9\text{Be}$  (Bedogni *et. al.*, 2014).



A fonte de  $^{241}\text{Am}$  é uma das fontes recomendadas pelas organizações internacionais (ISO, 2001) para calibração de detectores de nêutrons. Sua principal vantagem é seu longo tempo de meia vida (433,6 anos). Entretanto, ela não tem dimensões diminutas como a fonte de  $^{252}\text{Cf}$  e sua taxa de emissão de nêutrons por unidade de massa é menor que o  $^{252}\text{Cf}$ . Algumas características de fontes alfa-nêutrons podem ser conferidas na Tabela 3.

**Tabela 3** - Características de algumas fontes alfa-nêutron. Na tabela  $E_\alpha$  é a energia das partículas alfas emitidas pela fonte para produzir nêutrons de energia de energia média  $E_n$ .

Fonte	Meia vida (anos)	$E_\alpha$ (MeV)	$E_n$ (MeV)	Taxa de emissão ( $10^6$ n/s.Ci)
$^{210}\text{Po} + \text{B}$	0,379	2,8	5,0	0,2
$^{210}\text{Po} + \text{Be}$	0,379	4,0	10,8	2,5
$^{241}\text{Am} + \text{Be}$	458,0	4,3	11,0	2,0
$^{226}\text{Ra} + \text{Be}$	1622,0	4,5	13,2	15,0

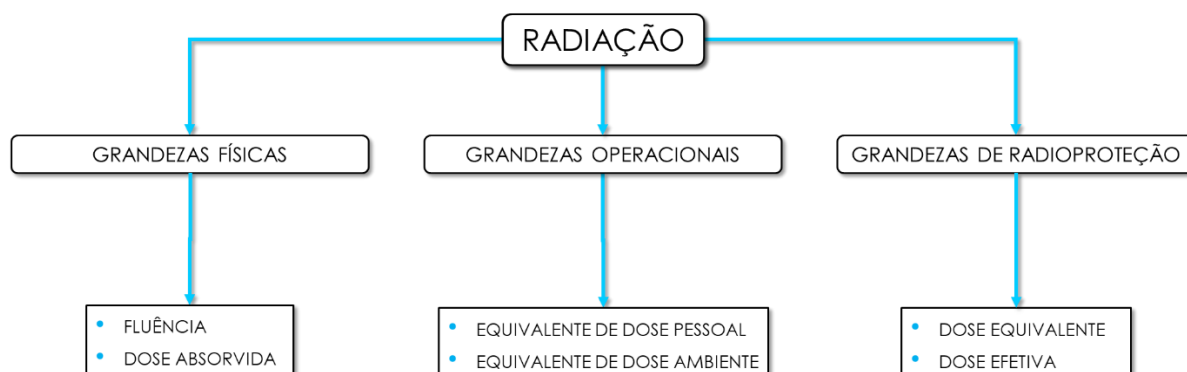
Fonte: Poston (2003, p. 609).

Vários laboratórios utilizam fontes de  $^{241}\text{AmBe}$  para calibração de detectores de nêutrons (Lacoste, 2010; Le et al., 2018; Lebreton et al., 2007; Yücel et al., 2014). Os principais motivos são o tempo de meia-vida longo e a distribuição energética que abrange as energias utilizadas na maioria das aplicações que utilizam nêutrons (Bedogni et al., 2014).

### 3.4 Grandezas e unidades

Foi no primeiro Congresso Internacional de Radiologia, em 1925, que a Comissão Internacional de Medidas e Unidades de Radiação (*International Commission Radiation and Measurements - ICRU*) foi criada. Três anos mais tarde, em 1928, foi criada a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (*International Commission on Radiological Protection - ICRP*). Desde então a ICRU recomenda grandezas físicas básicas e operacionais enquanto que a ICRP recomenda as grandezas limitantes de radioproteção (Clarke and Valentin, 2009). A representação da categorização das grandezas pode ser observada na Figura 11.

**Figura 11** - Esquema de grandezas relacionadas à radiação ionizante. As grandezas podem ser separadas em grandezas físicas, operacionais e de radioproteção.



Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

### 3.4.1 Fluência

A contagem de nêutrons por unidade de área pode ser compreendida como uma das principais ferramentas da metrologia de nêutrons. A fluência ( $\phi$ ) é definida como:

$$\phi \text{ (m}^{-2}\text{)} = \frac{dN \text{ (partículas)}}{da \text{ (m}^2\text{)}} \quad (4)$$

onde  $dN$  corresponde ao número de nêutrons incidentes em uma esfera de secção de área  $da$ . No Sistema Internacional de Unidades a unidade é  $\text{m}^{-2}$ .

### 3.4.2 Dose absorvida

A dose absorvida ( $D$ ) é a grandeza utilizada para representar a quantidade de energia cedida à matéria pelas radiações ionizantes, sendo definida como:



$$D \text{ (Gy)} = \frac{dE \text{ (J)}}{dm \text{ (kg)}} \quad (5)$$

onde ( $dE$ ) corresponde à energia entregue por radiação ionizante para o material de massa ( $dm$ ). No Sistema Internacional de Unidades a unidade é  $J.kg^{-1}$  que é especialmente denominada como Gray (Gy).

### 3.4.3 Equivalente de dose

O equivalente de dose é o produto da dose absorvida ( $D$ ) pelo fator de qualidade da radiação ( $Q$ ) (ICRP, 2016):

$$H \text{ (Sv)} = Q \cdot D \frac{\text{(J)}}{\text{(kg)}} \quad (6)$$

O fator de qualidade ( $Q$ ) é tabelado, como disposto na Tabela 4, e pode ser encontrado no documento Fatores de Ponderação para as Grandezas de Proteção Radiológica (CNEN – 3.01/002).

**Tabela 4** - Fator de Qualidade ( $Q$ ) em função da transferência linear de energia não restrita na água ( $L$ ).

$L$ na água (em keV/ $\mu$ m)	$Q$ ( $L$ )
< 10	1
10 – 100	0,32L – 2,2
100	300/ $\sqrt{L}$

Fonte: CNEN - 3.01/002 (2011, p. 1).

### 3.4.4 Equivalente de dose individual

O equivalente de dose individual ( $H_p$ ) é definido como o equivalente de dose em uma profundidade ( $d$ ) no tecido mole. Tal grandeza tem unidade em Sievert (Sv) no Sistema Internacional de Unidades e é obtida diretamente pelo monitor individual devidamente calibrado:

$$H_p \text{ (Sv)} = H_{T,d} \frac{\text{(J)}}{\text{(kg)}} \quad (7)$$

onde ( $H_{T,d}$ ) corresponde ao equivalente de dose a uma profundidade ( $d$ ) no tecido mole.

### 3.4.5 Equivalente de dose ambiente

O equivalente de dose ambiente ( $H^*$ ) é definido como o equivalente de dose que seria produzido por um campo expandido e alinhado com a esfera ICRU a uma profundidade ( $d$ ) oposta ao sentido do campo alinhado. Sendo assim, o equivalente de dose ambiente a 10 cm de profundidade pode ser representado como:

$$H_{10}^* \text{ (Sv)} = \int h_{10}^*(E) \Phi(E) dE \frac{\text{(J)}}{\text{(kg)}} \quad (8)$$

onde ( $h_{10}^*$ ) é o coeficiente de conversão de fluência para equivalente de dose ambiente e ( $\Phi$ ) é a fluência. No Sistema Internacional de Unidades a unidade é  $\text{J.kg}^{-1}$ , que é especialmente denominada como Sievert (Sv).

O coeficiente de conversão de fluência para equivalente de dose ambiente ( $h_{10}^*$ ) pode ser encontrado no documento ICRP 74 – *Conversion Coefficients for use*

in *Radiological Protection against External Radiation*. A Tabela 5 apresenta os valores do ICRP 74.

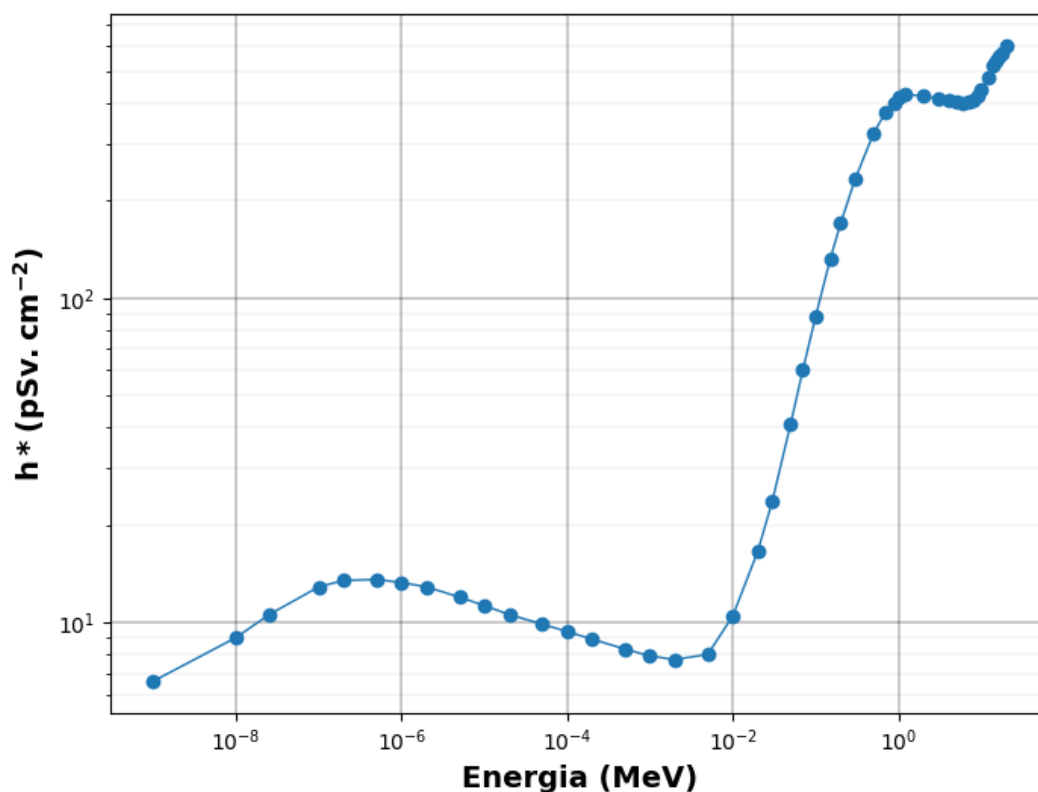
**Tabela 5** - Coeficiente de conversão para equivalente de dose ambiente por unidade de fluência de nêutrons em unidades de pSv.cm<sup>-2</sup>.

Energia (MeV)	$h_{10}^*$ (pSv . cm <sup>-2</sup> )
1,00E-09	6,60
1,00E-08	9,00
2,53E-08	10,6
1,00E-07	12,9
2,00E-07	13,5
5,00E-07	13,6
1,00E-06	13,3
2,00E-06	12,9
5,00E-06	12,0
1,00E-05	11,3
2,00E-05	10,6
5,00E-05	9,90
1,00E-04	9,40
2,00E-04	8,90
5,00E-04	8,30
1,00E-03	7,90
2,00E-03	7,70
5,00E-03	8,00
1,00E-02	10,5
2,00E-02	16,6
3,00E-02	23,7
5,00E-02	41,1
7,00E-02	60,0
1,00E-01	88,0
1,50E-01	132
2,00E-01	170
3,00E-01	233
5,00E-01	322
7,00E-01	375
9,00E-01	400
1,00E-00	416
1,20E-00	425
2,00E-00	420
3,00E-00	412
4,00E-00	408
5,00E-00	405
6,00E-00	400
7,00E-00	405
8,00E-00	409
9,00E-00	420
1,00E+01	440
1,20E+01	480
1,40E+01	520
1,50E+01	540
1,60E+01	555
1,80E+01	570
2,00E+01	600

Fonte: ICRP 74 (1996, p. 200).

A Figura 12 mostra os coeficientes de conversão de fluência para equivalente de dose ambiente, onde é possível observar que, para energias menores que 0,01 MeV,  $h_{10}^*$  é, no mínimo, 10 vezes menor que para energias superiores a 0,1 MeV.

**Figura 12** - Relação do coeficiente de conversão de fluência para equivalente de dose ambiente por unidade de fluência, em função da energia dos nêutrons.



Fonte: Adaptado de ICRP 74 (1996, p. 200).

### 3.5 Método Monte Carlo

O Método Monte Carlo (MMC) é uma ferramenta matemática amplamente utilizada para simulação de problemas representados por processos estocásticos. Portanto, é utilizado nas mais diversas áreas da ciência, como biofísica, astrofísica, dosimetria, etc. O MMC é utilizado, também, para avaliar a interação da radiação com a matéria. Sendo assim, é viável para simulação de aceleradores de partículas, impactos de blindagens, avaliação de distribuição de doses, entre muitas outras aplicações (Yoriyaz, 2015).

O MMC consiste na utilização de números pseudoaleatórios para cálculo computacional de fenômenos físicos. Em transporte de radiação, por exemplo, o MMC consiste no acompanhamento de uma partícula desde a fonte até um limite estabelecido como absorção, saída da região de acompanhamento, ultrapassar uma dada quantidade de interações, energia mínima, etc. A partir da amostragem da função densidade de probabilidade de interações com os números pseudoaleatórios é possível obter o valor médio de grandezas como a fluência ou o equivalente de dose ambiente (Kirk, 2010). Três pacotes computacionais são destaque para a simulação de nêutrons: Fluka, Geant e MCNP (Agostinelli et al., 2003; Battistoni et al., 2007; X-5 Monte Carlo Team, 2008).

### 3.5.1 MCNP

MCNP é o acrônimo para *Monte Carlo N-Particle Transport*, tendo sido desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Los Alamos (EUA). Trata-se de uma ferramenta estatística que utiliza o método Monte Carlo para descrever o transporte de radiação em termos de grandezas macroscópicas (Waters et al., 2007).

Atualmente, o MCNP é um dos códigos computacionais mais utilizados na área de transporte de radiação, envolvendo nêutrons, fótons, elétrons e partículas carregadas.

O MCNP5, uma das versões do MCNP, permite estudar a trajetória completa de um nêutron e monitorar seu comportamento desde a emissão por uma fonte, até o escape do meio em estudo ou absorção pelo meio. Portanto, é possível estimar o espalhamento pela estrutura de um determinado laboratório, o equivalente de dose ambiente em diferentes locais dele, a geração de fótons, etc.

## **3.6 Caracterização de um laboratório de calibração de detectores de nêutrons**

A calibração de qualquer detector depende de dois fatores: o instrumento em si e a qualidade da radiação utilizada. A calibração de um instrumento deve ser realizada posicionando-o em um ponto de referência do campo de radiação, onde o valor de uma grandeza de interesse, como o equivalente de dose ambiente, é conhecido (Schuhmacher, 2004).

A calibração de instrumentos deveria, idealmente, ocorrer no vácuo, para que a interação da radiação com o arranjo experimental e a estrutura do laboratório não interferisse na leitura do instrumento. Como isso não é possível, existe um conjunto de correções que devem ser aplicadas para minimizarem a influência do arranjo e das técnicas experimentais (Lacoste, 2010).

Para a calibração de detectores de nêutrons, é recomendada, sobretudo, a correção do espalhamento de nêutrons, uma característica intrínseca de cada laboratório, resultante dos materiais, dimensões e posicionamentos das estruturas do laboratório, como piso, arranjo experimental e paredes (Guzman-Garcia et al., 2015).

### **3.6.1 Espalhamento de nêutrons**

Os laboratórios de calibração de detectores de nêutrons são construídos para apresentarem, dentro do possível, o mínimo de espalhamento. A recomendação da ISO 8529-2 é que qualquer sala de calibração de nêutrons não seja responsável por aumentar em mais que 40% a leitura do instrumento nos pontos de calibração (ISO, 2000).

Quatro técnicas são recomendadas pela ISO 8529-2 para se avaliar esta questão: método do ajuste reduzido, método semiempírico, método do ajuste generalizado e método do cone de sombras. Métodos computacionais também podem ser utilizados para estimar o espalhamento. Dentre os métodos computacionais destacam-se a

substituição de estruturas (Alvarenga et al., 2020b; Pereira et al., 2014) e a relação entre o feixe total e o feixe direto (Fantidis et al., 2012; Naismith and Thomas, 1996; Sun et al., 2020) .

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de avaliar a fluência do campo de nêutrons do LCDNM, bem como avaliar o espalhamento do feixe, sua contribuição para o equivalente de dose ambiente e avaliar as posições adequadas para realizar calibrações de detectores de nêutrons, foram realizadas simulações computacionais utilizando o código MCNP5.

### 4.1 Código Monte Carlo para o transporte de partículas (MCNP)

O MCNP5 foi utilizado para a simulação das fontes de  $^{241}\text{AmBe}$ , dos modelos de laboratório e das grandezas estudadas. Com este código, é possível registrar o transporte dos nêutrons desde o local definido como fonte até quando ele é totalmente absorvido através de interações com o meio ou até que saia do sistema. Dessa forma, foi possível estimar grandezas relacionadas às características de construção da instalação, como espalhamento de radiação nos componentes do laboratório, além de grandezas de radioproteção.

No MCNP5 é possível simular e registrar nêutrons com energias de até 20 MeV. O MCNP5 apresenta uma série de *tallies*, que são formas de registrar diferentes grandezas, sendo possível registrar-se energia depositada, fluência energética, em uma área ou em um ponto, entre diversas outras grandezas. No presente trabalho, foram utilizados, principalmente, o *tally* F4 para registro da fluência média através de uma área e o *tally* F6 para deposição de energia.

A fonte de nêutrons utilizada no MCNP5 foi do tipo SDEF com o espectro da fonte de  $^{241}\text{AmBe}$  da ISO e formato de um cilindro com diâmetro de 3,32 cm e 10,6 cm de altura. Além disso, foi utilizado um feixe omnidirecional. Para converter fluência em equivalente de dose ambiente foram utilizados os *cards* DE e DF, que correspondem às energias e aos coeficientes de conversão de fluência para equivalente de dose ambiente para as respectivas energias. Demais *cards* como PHYS, responsável pelas considerações físicas e CUT, responsável pelos *cutoffs* de energia, foram utilizados de



acordo com parâmetros padrões do MCNP5 (Waters et al., 2007). O erro relativo (R) é um parâmetro do MCNP5 para estimar o intervalo de confiança de um *tally*. Portanto, a precisão de uma simulação é relacionada ao valor de R e, conforme o manual MCNP5, existem quatro categorizações para o erro relativo, conforme dispostas na Tabela 6.

**Tabela 6** - Interpretação do valor de erro relativo do MCNP5.

Valor de R	Qualidade do <i>Tally</i>
$R > 0,5$	Ruim
$0,2 < R < 0,5$	Considerável
$R < 0,1$	Confiável (exceto para detectores pontuais)
$R < 0,05$	Confiável (para detectores pontuais)

Fonte: X-5 Monte Carlo Team (2008, p. 116).

Como as simulações foram realizadas com detectores não pontuais foram utilizadas  $3 \times 10^8$  histórias primárias em todas as simulações de modo a garantir-se valores de R inferiores a 0,1.

## 4.2 Fonte de radiação

O LCDNM deverá utilizar duas fontes de  $^{241}\text{AmBe}$  que foram calibradas no LN-LNMRI e previstas para serem transferidas para a Metrobras em 2021. A calibração foi realizada utilizando procedimento PT02B-008 – Padronização secundária de fontes de nêutrons do LN-LNMRI. As fontes são cilíndricas, com altura de 106 mm e diâmetro de 33,2 mm para a fonte de 592 GBq e de 12,6 mm e 25,8 mm, respectivamente, para a fonte de 37 GBq. A Tabela 7 apresenta as principais características da fonte de  $^{241}\text{AmBe}$  mais intensa calibrada em 3 de setembro de 2019.

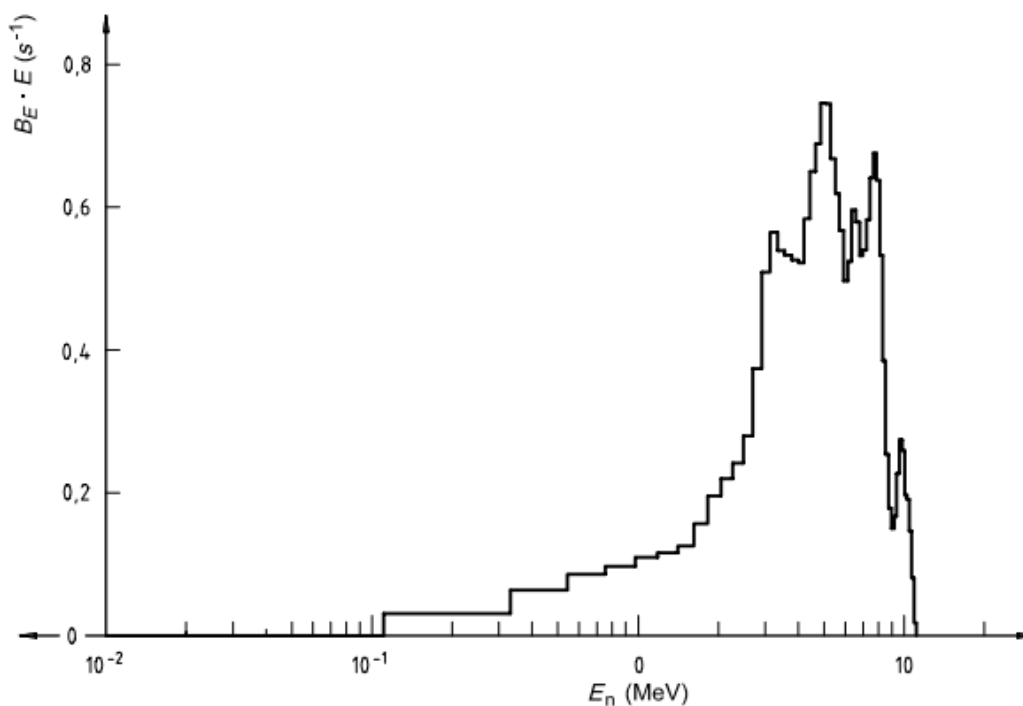
**Tabela 7** - Características da fonte de  $^{241}\text{AmBe}$  do LCDNM. U corresponde à incerteza expandida na taxa de emissão para 99,45% e  $k$  é o fator de abrangência.

Atividade (GBq)	Taxa de emissão ( $\text{s}^{-1}$ )	U ( $\text{s}^{-1}$ )	k
592,0	$4,054 \times 10^7$	$9,1 \times 10^5$	2

Fonte: Certificado de calibração emitido pelo LN/LBE (2021).

Para as simulações foi utilizado o espectro da fonte de  $^{241}\text{AmBe}$  apresentado pela ISO 8529-1 (ISO, 2001). A Figura 13 apresenta o espectro da fonte e a Tabela 8 apresenta os valores correspondentes de frequência e energia.

**Figura 13** - Espectro de nêutrons da fonte de  $^{241}\text{AmBe}$  extraído da ISO 8529-1. No eixo das abscissas a energia dos nêutrons e nas ordenadas a taxa de emissão.



Fonte: ISO 8529-1 (2001, p. 19).

**Tabela 8** - Valores de energia e frequência para o espectro de nêutrons de referência da fonte de  $^{241}\text{AmBe}$  extraído da ISO 8529-1.

Energia (MeV)	Frequência (s <sup>-1</sup> )
4.14E-07	0.0
0.11	1.44E-02
0.33	3.34E-02
0.54	3.13E-02
0.75	2.81E-02
0.97	2.50E-02
1.18	2.14E-02
1.40	1.98E-02
1.61	1.75E-02
1.82	1.92E-02
2.04	2.23E-02
2.25	2.15E-02
2.47	2.25E-02
2.68	2.28E-02
2.90	2.95E-02
3.11	3.56E-02
3.32	3.69E-02
3.54	3.46E-02
3.75	3.07E-02
3.97	3.00E-02
4.18	2.69E-02
4.39	2.86E-02
4.61	3.18E-02
4.82	3.07E-02
5.04	3.33E-02
5.25	3.04E-02
5.47	2.74E-02
5.68	2.33E-02
5.89	2.06E-02
6.11	1.82E-02
6.32	1.77E-02
6.54	2.04E-02
6.75	1.83E-02
6.96	1.63E-02
7.18	1.68E-02
7.39	1.68E-02
7.61	1.88E-02
7.82	1.84E-02
8.03	1.69E-02
8.25	1.44E-02
8.46	9.68E-03
8.68	6.52E-03
8.89	4.26E-03
9.11	3.67E-03
9.32	3.81E-03
9.53	5.06E-03
9.75	6.25E-03
9.96	5.52E-03
10.2	4.68E-03
10.4	3.70E-03
10.6	2.78E-03
10.8	1.51E-03
11.0	3.63E-04

Fonte: ISO 8529-1 (2001, p. 17).

Nas simulações a fonte foi considerada em duas posições: a de calibração, a 3,5 metros de altura do solo e a de armazenamento, a 3,5 metros abaixo do solo.

Para avaliar o LCDNM em quesitos de calibração de detectores de nêutrons a fonte foi simulada apenas na posição exposta. Em tal caso foram avaliadas a taxa de

fluência de nêutrons, a taxa de equivalente de dose ambiente e o fator de espalhamento. Na avaliação de proteção radiológica foram realizadas as simulações envolvendo a fonte exposta e a fonte recolhida ao seu invólucro.

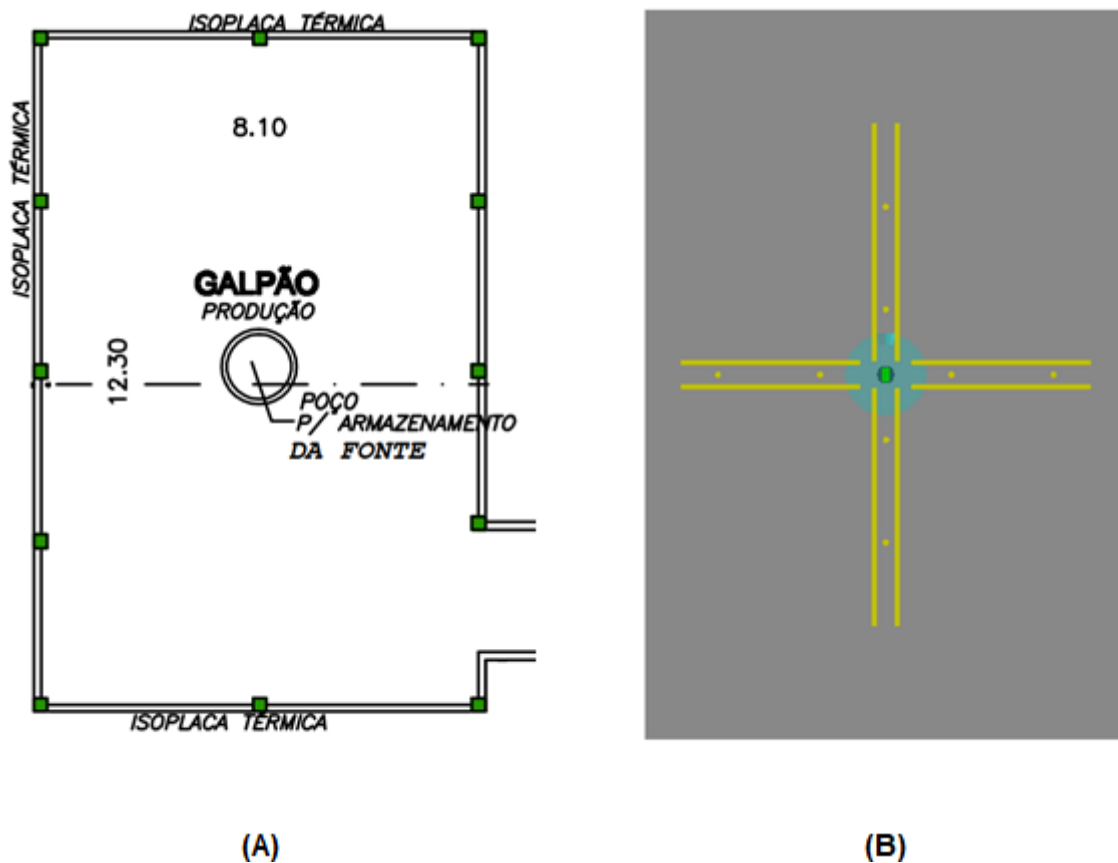
### **4.3 Caracterização da sala do LCDNM**

O LCDNM foi construído seguindo documentações da ISO e sugestões do LN/IRD/CNEN, evitando-se o uso de concreto para construção das paredes e teto. Também se evitou a utilização de materiais hidrogenados e todas as estruturas foram dispostas para estarem o mais distante possível da fonte. O posicionamento e os materiais das estruturas foram escolhidos para produzirem o mínimo de espalhamento, sem desconsiderar a segurança da instalação, tanto no aspecto de proteção física como no de proteção radiológica.

#### **4.3.1 Dimensões do laboratório**

O LCDNM consiste em um galpão de dimensões 8,10 x 12,30 x 6,00 m<sup>3</sup>, como representado na Figura 14 para a planta baixa da instalação (A) e no modelo construído no MCNP5 (B).

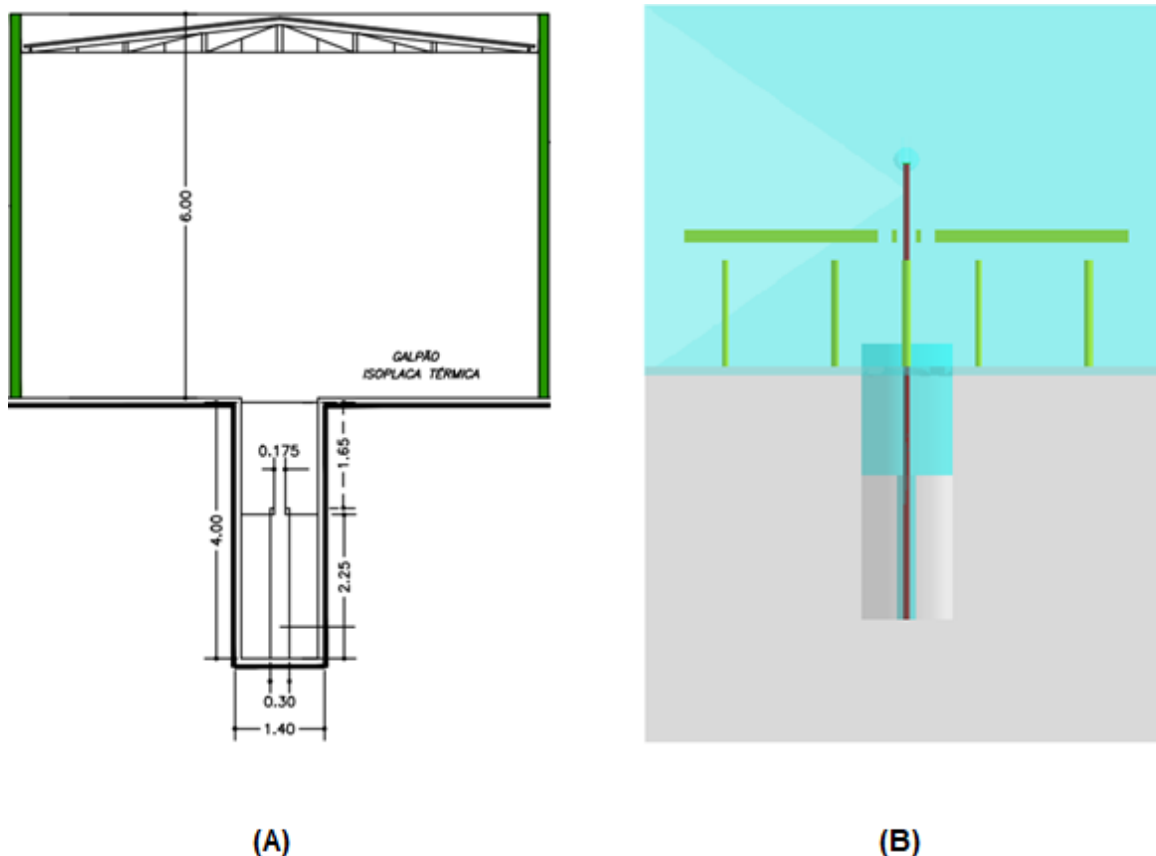
**Figura 14** – Dimensões do LCDNM: (A) planta baixa e (B) modelo construído no MCNP5 e representado no VISED. O concreto é representado em cinza; os trilhos em amarelo e o poço de armazenamento das fontes em azul claro.



Fonte: (A) Adaptação da planta baixa do LCDNM e (B) Morero, Lucas Dadalt (2021).

O poço para armazenamento das fontes, com 4 metros de profundidade, pode ser visto na Figura 15.

**Figura 15** – Detalhes do poço de armazenamento das fontes: (A) Vista lateral da planta e (B) modelo construído no MCNP5 e representado no VISED. O concreto é representado em cinza; os trilhos em amarelo e o poço de armazenamento da fonte em azul claro.



Fonte: (A) Adaptação da planta baixa do LCDNM e (B) Morero, Lucas Dadalt (2021).

### 4.3.2 Materiais utilizados na construção do LCDNM

As paredes do laboratório são formadas por placas do tipo sanduíche, com duas camadas de ferro de 0,1 cm de espessura cada, recheadas com espuma de poliuretano com 3,0 cm de espessura. O telhado foi construído com espuma de poliestireno. As estruturas metálicas que compõem tanto o arranjo experimental de calibração quanto as paredes e o telhado são de aço carbono. O piso tem uma camada de, aproximadamente, 12 cm de concreto.

Foram instalados dois trilhos paralelos com 3 m de comprimento e dois trilhos paralelos com 4 m de comprimento, em configuração em cruz, que permitem realizar calibrações simultâneas.

Dados de referência de todos os materiais utilizados, com exceção do *Poly Lactic Acid* (PLA), utilizado na mesa da fonte, e da espuma de poliestireno, podem ser encontrados no *Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling* do *Pacific Northwest National Laboratory* (McConn et al., 2011). A Tabela 9 apresenta informações básicas sobre todos os materiais utilizados. Para o PLA, a densidade foi obtida através das frações de massa do material e a espuma de poliestireno foi considerada igual à espuma de poliuretano.

**Tabela 9** - Materiais utilizados para a construção do laboratório. O PLA, material comumente utilizado em impressoras 3D, não consta no compêndio e, por tal, foi criado manualmente. A espuma de poliestireno foi considerada com densidade igual à do PLA.

Material	Código	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Estruturas em que o material foi utilizado
Ar seco	4	0.001205	Toda região não preenchida
Espuma de Poliuretano	253	0.021000	Paredes e Teto
Poliétileno Borado (10%)	247	1.000000	Cone de Sombra
PLA ( <i>Poly Lactic Acid</i> )	-	1.300000	Mesa da fonte
Terra	104	1.520000	Solo
Concreto Comum	97	2.300000	Piso
Alumínio	6	2.698900	Tubo principal de exposição
Aço Carbono	294	7.820000	Trilhos e suportes
Aço Inoxidável 202	296	7.860000	Tubos auxiliares de exposição
Ferro	158	7.874000	Hastes da mesa e telhas sanduíche

Fonte: McConn et al (2011).

### 4.3.3 Modelagens do LCDNM no MCNP5

Para estudar o espalhamento de nêutrons em cada estrutura foram criadas diferentes modelagens do LCDNM. As estruturas simuladas em cada uma das modelagens podem ser conferidas na Tabela 10.

**Tabela 10** – Modelagens que foram utilizadas para avaliar o espalhamento em cada estrutura do laboratório.

Modelagem	Descrição
1	Vácuo
2	Ar
3	Paredes + Ar
4	Piso + Ar
5	Trilhos + Ar
6	Suporte da fonte + Ar
7	Laboratório completo

Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

Na modelagem 1 o laboratório é inteiramente composto por vácuo, ou seja, nenhum material foi representado. Em tal simulação deve existir apenas a redução da taxa de fluência de nêutrons com o inverso do quadrado da distância. Na modelagem 2, todas as estruturas do laboratório foram preenchidas com ar. Para a modelagem 3 foram utilizados os materiais presentes na construção das paredes que foram a espuma de poliuretano junto com as chapas de ferro e o restante das estruturas foi preenchido com ar. A modelagem 4 utilizou-se de dois materiais: concreto e terra, sendo que o concreto compõe o piso da sala, que tem aproximadamente 12 cm, e a terra é a composição do solo, abaixo do piso. A modelagem 5 utilizou-se apenas do material denominado aço carbono, que foi utilizado para a construção dos trilhos de posicionamento dos detectores para calibração. O suporte da fonte abrange a mesa, feita de PLA em uma impressora 3D, as hastes de sustentação da mesa, feitas de ferro, e os tubos para exposição da fonte, cujo principal foi feito de alumínio e os auxiliares de aço inoxidável. O tubo principal contém o sistema de movimentação da fonte e os auxiliares os cabos de energia do sistema. Todas essas estruturas correspondem ao



que é denominado como suporte da fonte e corresponde à modelagem 6. A modelagem 7 corresponde a todas as estruturas anteriormente descritas para as modelagens de 2 a 6, ou seja, representa a modelagem do laboratório completo.

#### 4.4 Cálculo da taxa de fluência de nêutrons

A taxa de fluência de nêutrons é uma das grandezas fundamentais para a caracterização de um laboratório de calibração de detectores de nêutrons. Através da análise do espectro de taxa de fluência de nêutrons em função da energia é possível avaliar-se o espalhamento de nêutrons em diferentes pontos do laboratório. A análise da taxa de fluência dos nêutrons em função da distância para o LCDNM permite a comparação com outros laboratórios de calibração de detectores de nêutrons.

O *tally F4* do MCNP5 foi usado para registrar a fluência média em uma célula em nêutrons/cm<sup>2</sup>. Assim, foi possível escrever:

$$\dot{\phi}_E = Q \cdot \phi_E \quad (9)$$

onde  $\dot{\phi}_E$  é a taxa de fluência de nêutrons,  $Q$  é a taxa de emissão da fonte e  $\phi_E$  é a fluência obtida através do MCNP5.

#### 4.5 Cálculo da Taxa de Equivalente de Dose Ambiente ( $H^*$ )

A taxa equivalente de dose ambiente,  $\dot{H}^*$ , é a grandeza mais utilizada para a calibração de detectores de nêutrons e, por isso, foi utilizada para a maioria das análises presentes neste trabalho. Além disso, a taxa de equivalente de dose ambiente é uma grandeza conservativa para estimar o equivalente de dose individual,  $\dot{H}_p$ . Sendo

assim, se o laboratório cumpre os requisitos de radioproteção a partir das estimativas com o equivalente de dose ambiente, deverá cumprir os requisitos para o equivalente de dose individual.

Para cálculo da taxa de equivalente de dose ambiente foi utilizada a taxa de emissão da fonte (Q), a fluência de nêutrons obtida utilizando *tally* 4 ( $\Phi_E$ ) e o fator de conversão de fluência para equivalente de dose ambiente ( $h^*$ ), tendo-se:

$$\dot{H}^*(10) = Q \int \Phi_E(\mathbf{E}) h^*(10) d\mathbf{E} \quad (10)$$

Os valores de  $h^*$  utilizados foram obtidos da literatura (ICRP, 1996).

#### 4.6 Fator de espalhamento de nêutrons

O fator de espalhamento de nêutrons, para diferentes posições do LCDNM, pode ser calculado tanto através da taxa de fluência quanto através da taxa de equivalente de dose ambiente.

O cálculo do fator de espalhamento foi realizado através da taxa de fluência de nêutrons ( $S_\Phi$ ) considerando-se a modelagem em análise,  $\dot{\phi}_M$ , dividida pelo valor da mesma grandeza na modelagem de ar,  $\dot{\phi}_A$ , conforme Equação 11:

$$S_\Phi = \frac{\dot{\phi}_M}{\dot{\phi}_A} \quad (11)$$

O cálculo do fator de espalhamento utilizando a grandeza de taxa de equivalente de dose ambiente ( $S_H$ ) foi calculado conforme Equação 12:

$$S_H = \frac{\dot{H}_M}{\dot{H}_A} \quad (12)$$

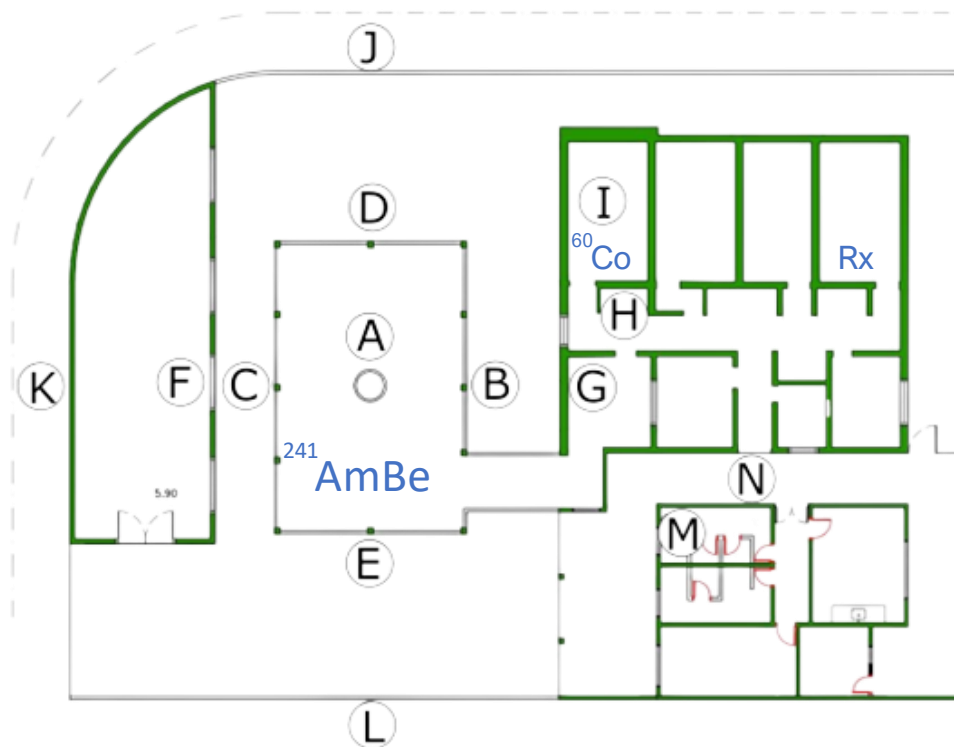
onde  $\dot{H}_M$  é a taxa de equivalente de dose ambiente para a modelagem em estudo e  $\dot{H}_A$  é a taxa de equivalente de dose ambiente para a modelagem com o laboratório preenchido apenas com ar.

#### **4.7 Posicionamentos dos detectores de nêutrons para calibração**

As taxas de equivalente de dose ambiente simuladas em diferentes posições do LCDNM foram utilizadas para um estudo das posições de calibração dos detectores de nêutrons em função da escala do equipamento sendo calibrado.

Os detectores de nêutrons são aproximados, geralmente, por esferas de ar nas modelagens teóricas, dado que apresentam estruturas complexas. Neste trabalho, os detectores foram simulados como esferas de ar com 5 cm de diâmetro. Foram simuladas  $3 \times 10^8$  partículas primárias, que é o número máximo permitido no MCNP5, dado o período do gerador de números pseudoaleatórios. Os detectores foram posicionados de acordo com a finalidade de cada estudo: nas posições dos trilhos, a 3,5 m de altura para avaliação da fluência, e a 1 m de altura do solo para estudos de radioproteção. Para a calibração, os detectores foram posicionados ao longo do maior trilho, de 4 metros, nas distâncias fonte-detector de 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350 e 400 cm. Para as simulações com intuito de avaliar a proteção radiológica da instalação, os detectores foram dispostos em posições de interesse, conforme mostrado na Figura 16 e na Tabela 11. As posições escolhidas condizem com localizações importantes, como os locais de trabalho do calibrador e áreas adjacentes, de livre acesso.

**Figura 16** – Adaptação da planta baixa com as indicações das posições dos detectores para avaliação de radioproteção. Destaca-se que existem outras fontes de radiação como além da de  $^{241}\text{AmBe}$  como a de  $^{60}\text{Co}$  na sala simbolizada pela letra I e outra de raios-x.



Fonte: Adaptação da planta baixa da Metrobras.

**Tabela 11** – Posicionamento dos detectores nas simulações. Foram utilizados 14 detectores para avaliar a instalação sob perspectiva de radioproteção. As distâncias X e Y que estão em cm são relativas à fonte.

Detector	Posicionamento	
	X (cm)	Y (cm)
A	0	200
B	500	0
C	500	0
D	0	715
E	0	715
F	800	0
G	920	0
H	1100	300
I	1020	800
J	0	1400
K	1400	0
L	0	1400
M	1300	600
N	1660	400

Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

A função *FMESH* do MCNP5 foi utilizada para obter valores de taxa de equivalente de dose ambiente em toda a área do LCDNM. Assim, foi possível construir um mapa 2D com os valores de taxa de equivalente de dose ambiente.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

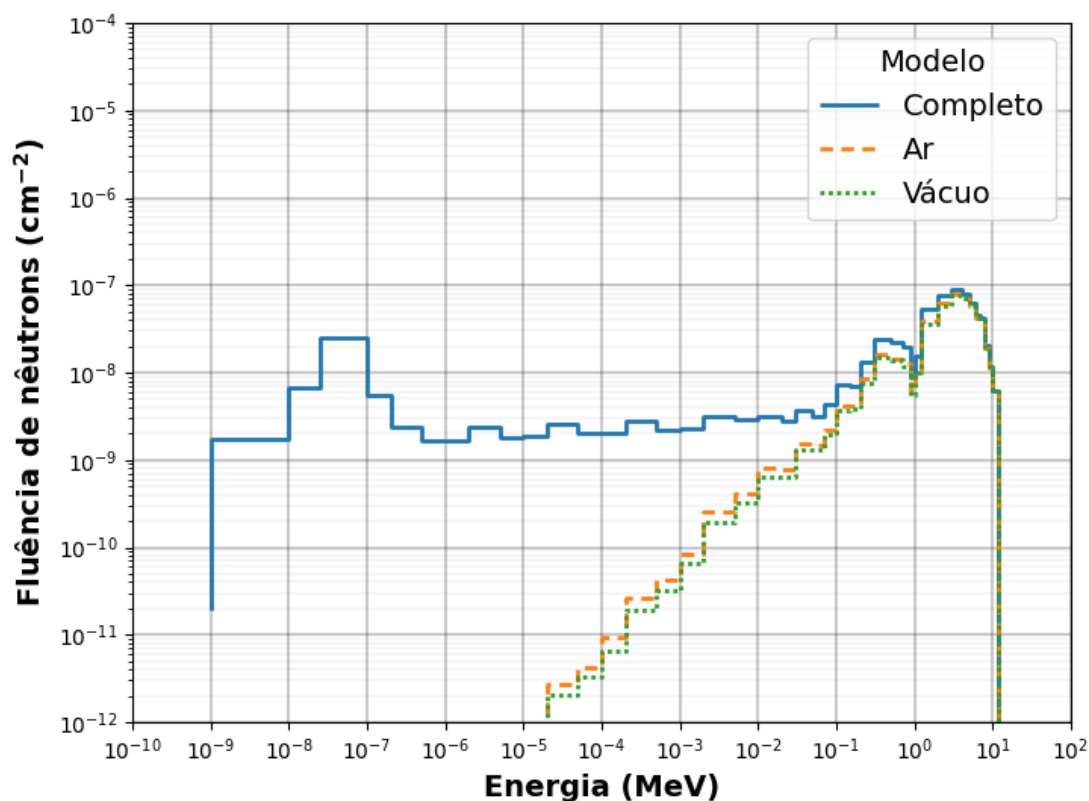
Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas simulações realizadas. A caracterização do laboratório de calibração de nêutrons em termos da fluência dos nêutrons e do equivalente de dose ambiente de nêutrons é recomendado de acordo com a ISO 8529-2 (ISO, 2000). A simulação do espectro de fluência de nêutrons permitiu analisar a contribuição da estrutura do laboratório para nêutrons de diferentes energias em relação à fluência primária emitida pela fonte. Já o equivalente de dose ambiente de nêutrons permitiu uma avaliação do laboratório em relação à radioproteção e em relação à aspectos práticos de uso de escalas de calibração a serem implementadas.

### **5.1 Fluência de nêutrons**

#### **5.1.1 Fluência de nêutrons para diferentes modelos de laboratório**

De modo a obter-se a fluência de nêutrons em diferentes pontos da sala de calibração, foram simulados detectores ao longo do trilho do eixo de calibração que deve ser utilizado na rotina do laboratório. Na Figura 17 está representada as fluências de nêutrons obtidas através do MCNP5 para os três modelos de laboratório implementados: vácuo, ar e completo. Os espectros mostrados foram obtidos a 400 cm da cápsula da fonte, a 350 cm do piso.

**Figura 17** - Fluência de nêutrons em função da energia para os modelos de laboratório: completo, ar e vácuo.



Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

Como é possível observar na Figura 17, o laboratório no modelo de ar, quando comparado com o laboratório no modelo de vácuo, apresenta poucas diferenças na fluência de nêutrons, com o espectro permanecendo praticamente inalterado para energias maiores que 1 MeV. Tal fato é justificável pela baixa densidade do ar e pela sua composição. No geral, quanto maior a energia do nêutron, menor a probabilidade de sua interação com a matéria. Ao comparar-se o laboratório completo com os dois outros modelos, nota-se que existe um incremento considerável de nêutrons com energias menores que 0,1 MeV em relação ao espectro emitido pela fonte, representado pelo modelo no vácuo. Tais nêutrons são resultantes da interação com as estruturas como piso, trilhos, paredes, entre outras. Embora haja um aumento considerável na fluência de nêutrons de baixas energias é importante destacar que os nêutrons de energia menores que 0,02 MeV apresentam coeficientes de conversão de fluência para equivalente de dose ambiente que podem ser até 10 vezes menores que

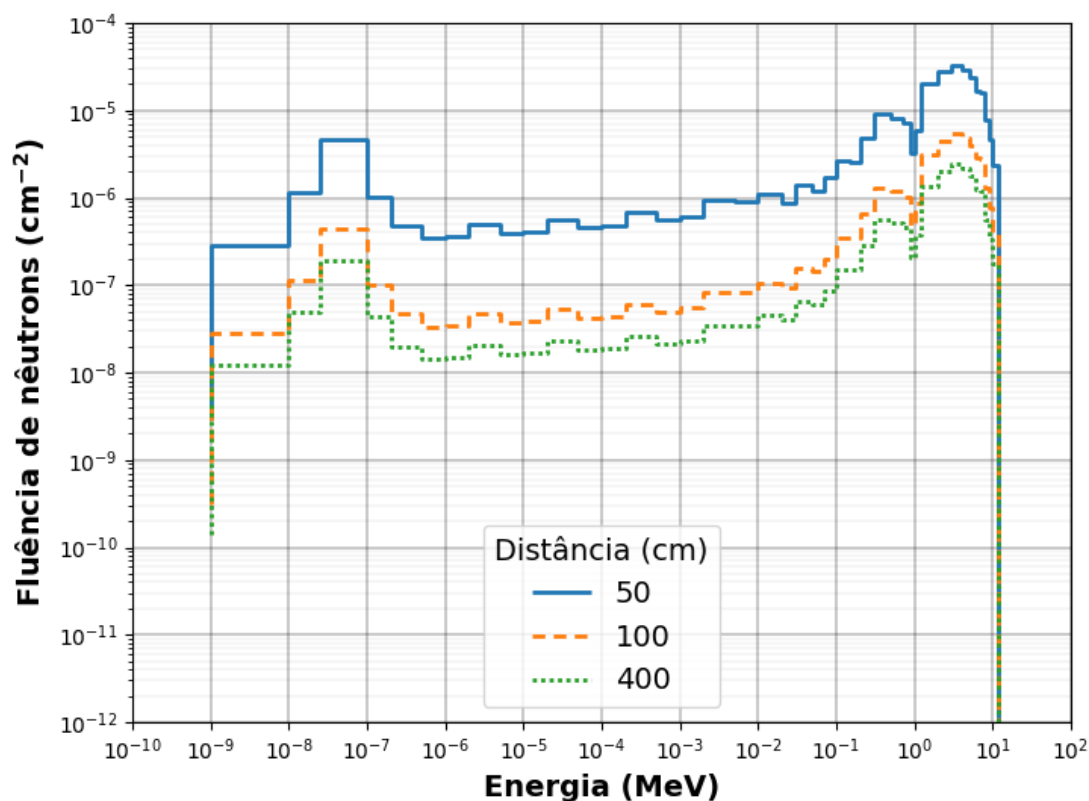
aqueles para nêutrons com energias maiores que 0,1 MeV. Portanto, apesar da diferença para a fluência ser considerável no modelo completo, essa mesma diferença pode não acarretar mudanças significativas no equivalente de dose ambiente.

### **5.1.2 Caracterização da fluência de nêutrons do LCDNM para diferentes distâncias fonte-detector**

A Figura 18 mostra a fluência de nêutrons obtida para diferentes distâncias fonte-detector, ao longo da distância longitudinal no centro da sala de calibração, para o modelo completo do laboratório. As distâncias foram escolhidas com base na menor distância recomendada para calibração de acordo com a norma ISO-8529 (50 cm), na distância típica de calibração (100 cm) e na maior distância possível para calibração no LCDNM (400 cm).



**Figura 18** - Fluência espectral de nêutrons em diferentes distâncias da fonte para o laboratório completo.

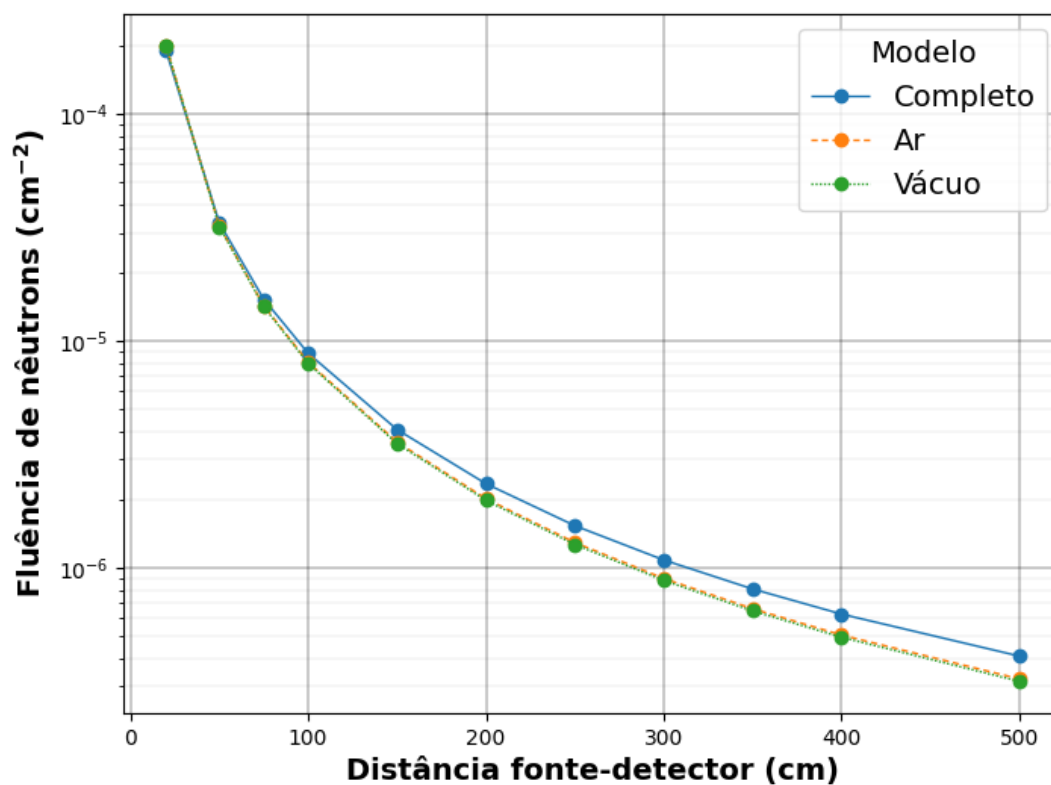


Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

A Figura 18 permite apontar que a forma do espectro da fluência de nêutrons tende a permanecer praticamente inalterada com o aumento da distância. A diminuição na fluência de nêutrons com a distância tem uma componente relacionada com a lei do inverso do quadrado das distâncias, assim como com o espalhamento das estruturas do laboratório, como visto através da comparação dos modelos na Figura 17.

Para avaliação da contribuição de cada componente na fluência em função da distância, a Figura 19 mostra as fluências totais obtidas em função da distância fonte-detector em cada modelo de laboratório.

**Figura 19** - Fluência de nêutrons em diferentes distâncias fonte-detector para os diferentes modelos de laboratório.



Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

Assumindo-se que o modelo com vácuo represente a variação de fluência decorrente da lei do inverso do quadrado das distâncias, nota-se que, para distâncias superiores a, aproximadamente, 1 m, a fluência total é aumentada devido ao espalhamento pelos componentes do laboratório. Esse aumento na fluência para o laboratório completo, em relação ao modelo no vácuo, é de até 29,2% para a distância de 4 m da fonte.

### 5.1.3 Comparação dos valores de taxa de fluência de nêutrons do LCDNM com outros laboratórios

Os valores de taxa de fluência de nêutrons obtidos para o LCDNM através das simulações foram comparados com os dados dos laboratórios do IPEN e do (*Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas*) CIEMAT (Alvarenga, 2018; Guzman-Garcia et al., 2015), conforme mostrado na Tabela 12. As atividades das fontes de cada estudo foram 592 GBq, 185 GBq e 37 GBq para o LCDNM, CIEMAT E IPEN, respectivamente. Para construção da tabela todos os valores foram normalizados para uma fonte de 37 GBq.

**Tabela 12** - Valores de taxa de fluência de nêutrons em função da distância fonte-detector para diferentes laboratórios de calibração de detectores de nêutrons. Unidades em  $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  **incertezas**

Distância fonte-detector (cm)	LCDNM	IPEN	CIEMAT
20	582,4	501,7	369,5
50	97,8	81,2	88,4
75	44,4	36,2	46,9
100	25,4	20,5	30,0
150	11,5	9,1	15,9
200	6,6	5,2	10,2
250	4,3	3,3	7,2
300	3,0	2,3	5,4
350	2,2	1,7	4,2
400	1,7	1,3	3,4
500	1,1	0,8	2,4

Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

A partir dos valores da Tabela 12 nota-se que os valores de taxa de fluência de nêutrons para o IPEN são sempre menores que os valores obtidos para o LCDNM. O CIEMAT apresenta valores menores de taxa de fluência de nêutrons que o LNDNM para distâncias pequenas, 20 e 50 cm, e valores maiores para o restante das distâncias.

Os dados de cada laboratório foram ajustados com funções de potência ( $y = A \cdot x^{-B}$ ) de modo a permitir interpolação e extrapolação dos valores encontrados na literatura. Todos os ajustes apresentaram  $R^2 > 0,998$ . Os valores dos coeficientes das funções de ajuste constam na Tabela 13.

**Tabela 13** - Valores dos coeficientes do ajuste de funções de potência para dados da taxa de fluência de nêutrons em função da distância fonte-detector em diferentes laboratórios.

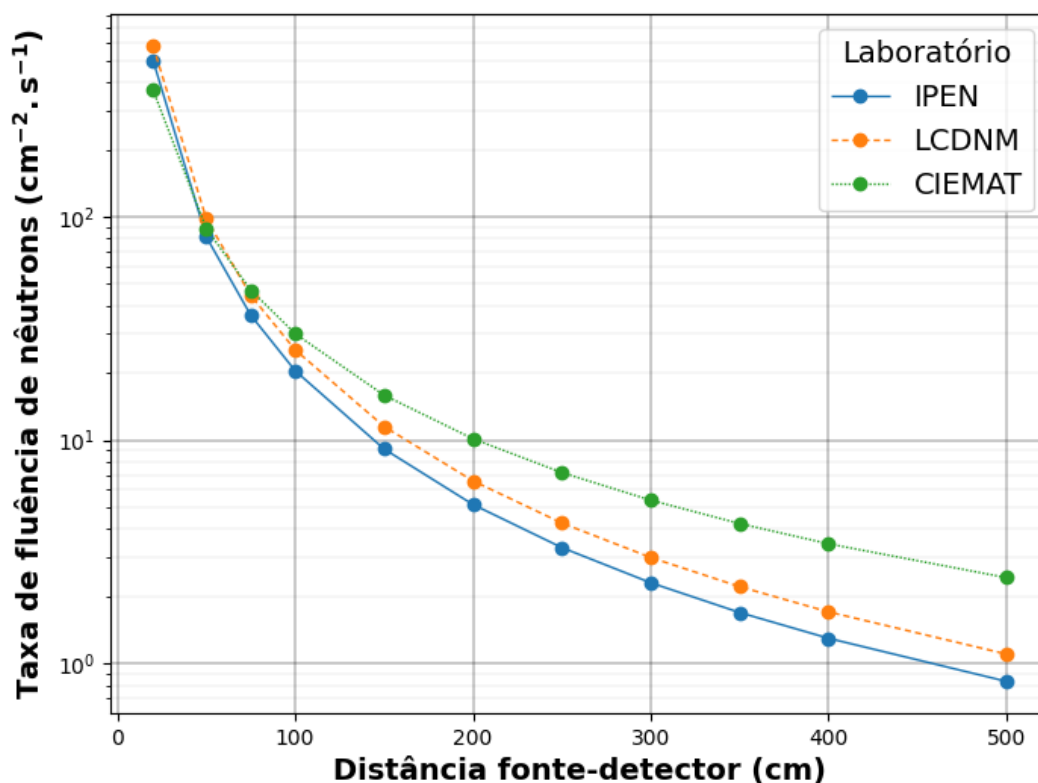
Coeficiente	IPEN	LCDNM	CIEMAT
A	193591	198733	39675
B	1,988	1,947	1,561

Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

Através da Tabela 13 é possível observar que a diminuição da fluência em função da lei do inverso do quadrado da distância predomina sobre a influência do espalhamento para a taxa de fluência de nêutrons em função da distância fonte-detector para o LCDNM.

A Figura 20 mostra as taxas de fluência de nêutrons em função da distância para diferentes laboratórios de nêutrons com fontes de  $^{241}\text{AmBe}$ .

**Figura 20** - Taxa de fluência de nêutrons em função da distância fonte-detector para diferentes laboratórios com fontes de  $^{241}\text{AmBe}$ .



Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

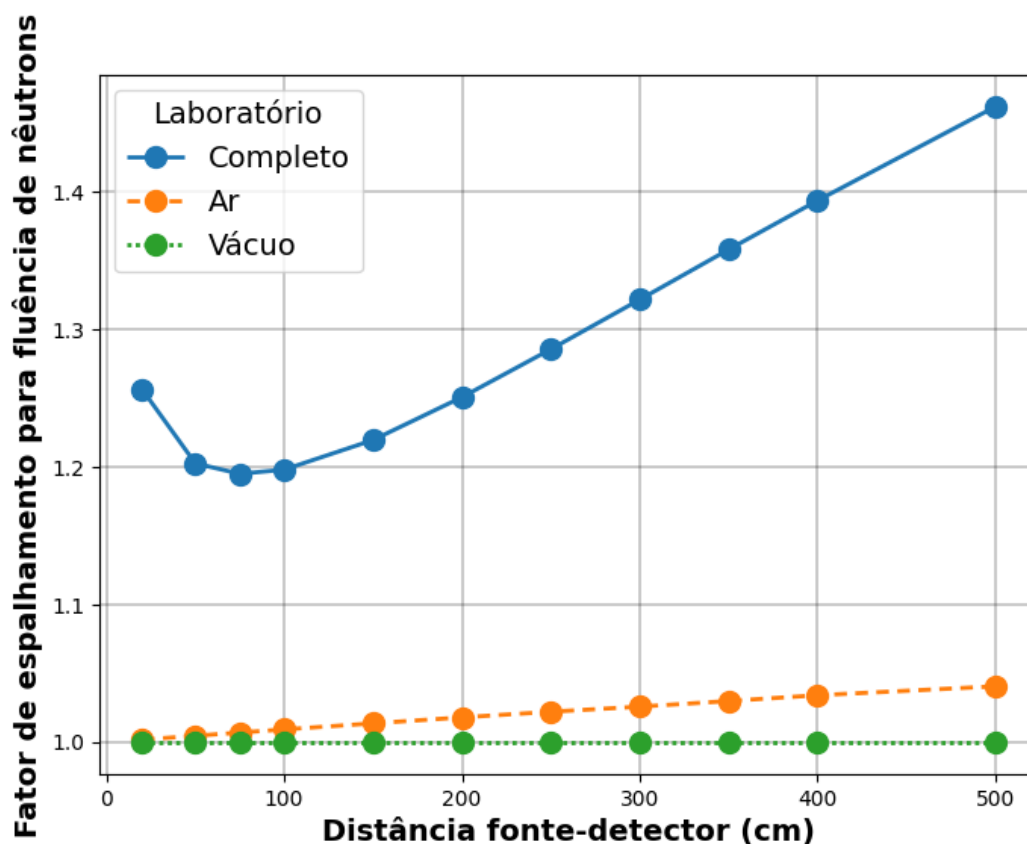
Através da Figura 20 é possível observar que os dados obtidos na simulação do LCDNM estão na mesma ordem de grandeza e entre os dados de outros dois laboratórios. Apesar do ajuste dos dados do IPEN apresentar potência mais próxima de 2, não é possível afirmar apenas com base nos dados apresentados que esse laboratório tem o menor espalhamento. O IPEN é o laboratório com menores dimensões físicas e tem paredes de concreto, de modo que, teoricamente, deveria ser o laboratório com maior espalhamento. O expoente próximo de 2 da função de ajuste dos dados do IPEN pode ser devido ao maior espalhamento de nêutrons de forma uniforme em todo laboratório, contribuindo relevantemente para todas as distâncias. Outra possível explicação para os resultados é quanto à distância máxima obtida teoricamente para cada laboratório. No IPEN, a maior distância foi de 256 cm, 300 cm

para o CIEMAT e 500 CM para o LCDNM. Sabe-se que quanto maior a distância, maior o espalhamento e o IPEN, por ter medidas com distância limitadas, pode ter sido beneficiado com um ajuste para poucos dados. Os laboratórios do LCDNM e do CIEMAT, por sua vez, têm dimensões similares, mas o CIEMAT apresenta paredes de dimensões consideráveis de concreto, 150 cm, que aumentam o espalhamento.

#### **5.1.4 Fator de espalhamento através da fluência de nêutrons**

Para o fator de espalhamento da fluência de nêutrons foram analisadas as modelagens do laboratório com vácuo, ar e completo, como representado na Figura 21, que mostra o fator de espalhamento de nêutrons baseado na fluência de nêutrons em função da distância fonte-detector.

**Figura 21** - Fator de espalhamento para fluência de nêutrons para os modelos de laboratório completo, com vácuo e com ar em função da distância fonte-detector.



Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

Como esperado, o fator de espalhamento com base na fluência de nêutrons cresce com a distância devido a contribuição das estruturas da sala para o espalhamento nas diferentes distâncias como é possível observar nos resultados seguintes.

Na Figura 21, o ar, como sugerido na Figura 17, tem pouco impacto para o espalhamento de nêutrons, chegando no máximo a 3,4% para a maior distância de calibração (400 cm). Já o laboratório completo, para a mesma distância, tem uma contribuição de 39,3% devido ao espalhamento. Para distâncias entre fonte-detector entre 25 cm e 75 cm, o fator de espalhamento diminui e depois cresce com a distância. Esse comportamento pode ser explicado pela mesa e o suporte dela, que é a estrutura mais próxima da fonte. O fator de espalhamento da fluência de nêutrons pode ser um

indicativo de que o LCDNM cumpre as sugestões da ISO-8529 que recomenda um máximo de 40% de espalhamento das estruturas do laboratório.

## **5.2 Equivalente de dose ambiente**

### **5.2.1 Comparação dos valores de taxa de equivalente de dose ambiente do LCDNM com outros laboratórios**

Além da fluência de nêutrons, outra forma de avaliar o laboratório é através da taxa de equivalente de dose ambiente. Procedimento similar ao da taxa de fluência de nêutrons foi realizado, simulando-se o laboratório e comparando-se os dados com outros laboratórios. Porém, foram utilizados os dados da (*Universidad Politécnica de Madrid*) UPM ao invés do CIEMAT, dado que não foi encontrada literatura que apresentasse a taxa de equivalente de dose ambiente para o CIEMAT. A Tabela 14 apresenta os dados de equivalente de dose ambiente para os três laboratórios, sendo os dados do IPEN e UPM obtidos da literatura (Alvarenga, 2018; Gallego et al., 2004).



**Tabela 14** - Valores de taxa de equivalente de dose ambiente em função da distância fonte-detector para diferentes laboratórios de calibração de detectores de nêutrons.

Distância fonte-detector (cm)	LCDNM	IPEN	UPM
20	786,8	708,8	637,7
50	129,6	114,3	109,5
75	58,4	51,0	50,2
100	33,1	28,8	28,9
150	14,9	12,8	13,2
200	8,5	7,2	7,6
250	5,5	4,6	5,0
300	3,8	3,2	3,5
350	2,8	2,4	2,6
400	2,2	1,8	2,0
500	1,4	1,2	1,3

Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

Para distâncias de calibração recomendadas pela ISO-8529, a partir de 50 cm, as diferenças percentuais dos outros laboratórios em relação ao LCDNM são iguais ou menores que 16%. Tal resultado aponta que as simulações do LCDNM estão congruentes com outros laboratórios. Além disso, deve-se considerar que a incerteza da atividade da fonte é próxima de 10%.

Para interpolação dos valores da literatura foram usadas funções de potência, com todos os ajustes apresentando  $R^2 > 0,998$ . Os coeficientes dos ajustes são apresentados na Tabela 15.

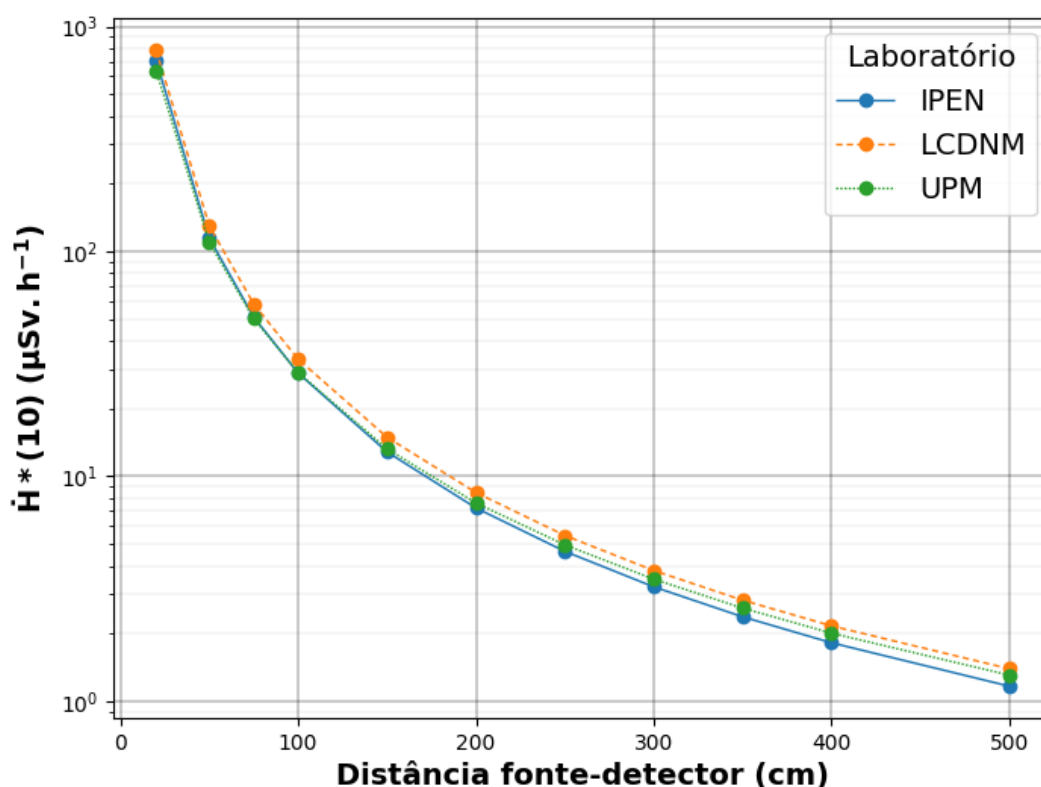
**Tabela 15** - Valores dos coeficientes do ajuste de potência para diferentes laboratórios da taxa de equivalente de dose ambiente em função da distância fonte-detector.

Coeficiente	IPEN	LCDNM	UPM
A	275.965	285.943	202.547
B	1,991	1,968	1,923

Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

A partir dos coeficientes dos ajustes foram construídas curvas entre as distâncias de 20 a 500 cm para a taxa de equivalente de dose ambiente para os três laboratórios, como mostrado na Figura 22.

**Figura 22** - Taxa de equivalente de dose ambiente em função da distância para diferentes laboratórios com fontes de  $^{241}\text{AmBe}$ .



Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

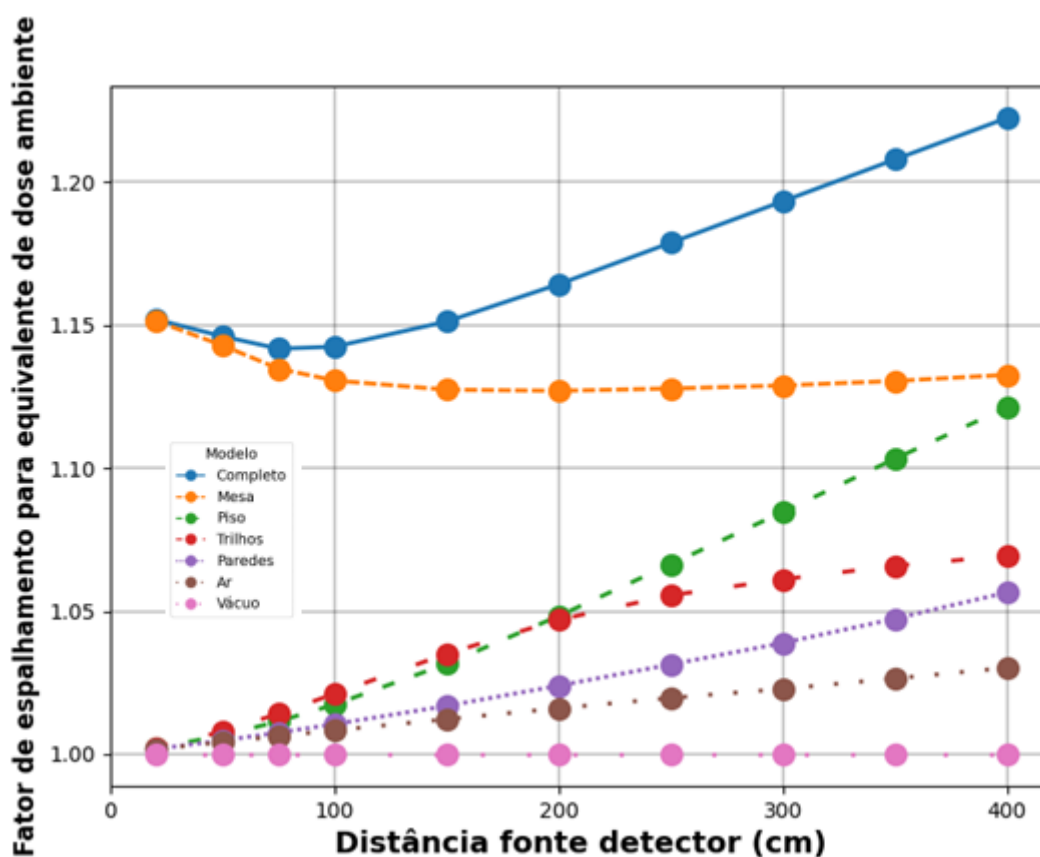
É possível observar na Figura 22 que os valores das taxas de equivalente de dose ambiente dos diferentes laboratórios estão mais próximos entre si do que os de taxa de fluência em função da distância. Uma possível explicação para tal motivo é que o coeficiente de conversão de fluência para equivalente de dose ambiente é, em geral, menor para baixas energias e, assim, torna nêutrons com energias menores, geralmente resultantes de espalhamento, menos relevantes. Apesar dos valores do LCDNM não estarem entre os dois laboratórios como anteriormente observado na Figura 20 para taxa de fluência de nêutrons, os valores ainda são relativamente

próximos aos dos outros dois laboratórios, com diferença máxima de 19% para a distância de 20 cm com o laboratório UPM.

### 5.2.2 Fator de espalhamento através do equivalente de dose ambiente para as diferentes estruturas do laboratório

Com o intuito de analisar com maior detalhamento o comportamento da contribuição de cada estrutura para o espalhamento de nêutrons foram realizadas simulações com cada estrutura separadamente. A Figura 23 apresenta o fator de espalhamento calculado com o equivalente de dose ambiente para todas as estruturas presentes no laboratório em função da distância.

**Figura 23** - Fator de espalhamento com base no equivalente de dose ambiente para cada estrutura do laboratório em função da distância.



Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

As diferenças obtidas comparando-se os fatores de espalhamento obtidos através da fluência, Figura 21, e obtidas através do equivalente de dose ambiente, Figura 23, podem ser explicadas pelo coeficiente de conversão de fluência equivalente de dose ambiente da Figura 12. Para as maiores distâncias de calibração (400 cm) foram observadas variações de 22,2% e 3,0% para as modelagens do laboratório completo e de ar, respectivamente, sendo esses valores de 39,3% e 3,4% para o fator de espalhamento calculado a partir da fluência. Tal diferença é devida ao coeficiente de conversão de fluência para equivalente de dose ambiente, que diminui a contribuição de nêutrons de baixas energias que são resultantes do espalhamento para o cálculo do equivalente de dose ambiente.

Ainda na Figura 23 é possível concluir que a diminuição do fator de espalhamento entre as distâncias de 25 a 75 cm são devido à estrutura da mesa que é a estrutura mais próxima da fonte. Além disso, a mesa é feita de PLA, material que tem uma concentração considerável de hidrogênio em sua composição, contribuindo ainda mais para o espalhamento. Dessa forma, a mesa é o material que mais espalha os nêutrons em todo laboratório, chegando a 13,2% para a maior distância de calibração.

Já o piso é a segunda estrutura que mais contribui com o espalhamento, contribuindo com 12,1%, por causa da sua composição, 12 cm de concreto, e é um material que tem uma alta porcentagem de hidrogênio em sua composição. Embora haja grande quantidade de concreto no piso, este está relativamente longe da fonte, o que contribui para que espalhe uma menor quantidade de nêutrons que a estrutura da mesa.

Os trilhos são a terceira estrutura que mais espalha nêutrons. Compostos por um material que não é tão relevante para o espalhamento de nêutrons, que é o aço carbono, e estando mais longe da fonte quando comparados à mesa, por exemplo. Tais fatos fazem com que os trilhos contribuam com menor espalhamento.

As paredes do laboratório foram otimizadas e construídas de forma a contribuírem pouco para o espalhamento, contribuindo com até 6% para a maior distância de calibração. O ar, como esperado, é o que menos contribui para o

espalhamento pois apresenta, entre outras características, a menor densidade entre todas as estruturas.

Os detectores de nêutrons comumente são calibrados em equivalente de dose ambiente e, portanto, trata-se da grandeza mais apropriada para estimar o fator de espalhamento. Assim, como o laboratório apresenta, na maior distância de calibração, uma contribuição de espalhamento de 22,2%, pode-se afirmar que o laboratório está dentro do limite de 40% de espalhamento máximo sugerido pela ISO-8529 e, desse modo, pode operar, do ponto de vista de espalhamento, como laboratório de calibração de detectores de nêutrons.

### **5.2.3 Taxa de equivalente de dose ambiente em posições de interesse para radioproteção**

As posições de interesse para radioproteção foram definidas para analisar o equivalente de dose ambiente em uma posição dentro do laboratório (A), perto das paredes do laboratório (B, C, D, E), no local de trabalho do técnico que calibra os detectores (G), em salas que exercem outras atividades e que são próximas ao laboratório (F, H, I, N, M) e áreas fora da instalação (J, K, L) conforme foi apresentado na Figura 16.

Os valores de taxa de equivalente de dose ambiente apresentados na Tabela 16 foram obtidos para a fonte exposta, 350 cm acima do piso, e para os detectores posicionados à altura de 100 cm acima do solo.

**Tabela 16** - Valores da taxa de equivalente de dose ambiente em diferentes posições do LCDNM.

Referência (cm)	Posição		$\dot{H}$ ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ )
	X (cm)	Y (cm)	
A	0	200	19,27
B	500	0	14,76
C	-500	0	14,69
D	0	715	7,42
E	0	-715	7,73
F	-800	0	6,51
G	920	0	5,11
H	1100	300	3,47
I	1020	800	2,74
J	0	1400	2,33
K	-1400	0	2,53
L	0	-1400	2,24
M	1300	-600	2,44
N	1660	-400	2,48

Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

Como esperado o valor da taxa de equivalente de dose ambiente na posição A é o maior encontrado, seguido das posições imediatamente fora do laboratório (B, C, D) na direção de sua menor dimensão. Nessas 3 posições nota-se que o valor do equivalente de dose ambiente fica acima do recomendado de  $10 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  para indivíduos ocupacionalmente expostos (IOEs). Portanto, recomenda-se que os IOEs não permaneçam a totalidade de suas jornadas em tais posições quando a fonte estiver exposta. Essa recomendação pode ser cumprida com facilidade visto que não é previsto que os IOEs fiquem nas posições A, B ou C por longos períodos. As demais áreas, como têm taxas de equivalente de dose ambiente inferiores a  $10 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  podem ser ocupadas em tempo integral pelos IOEs.

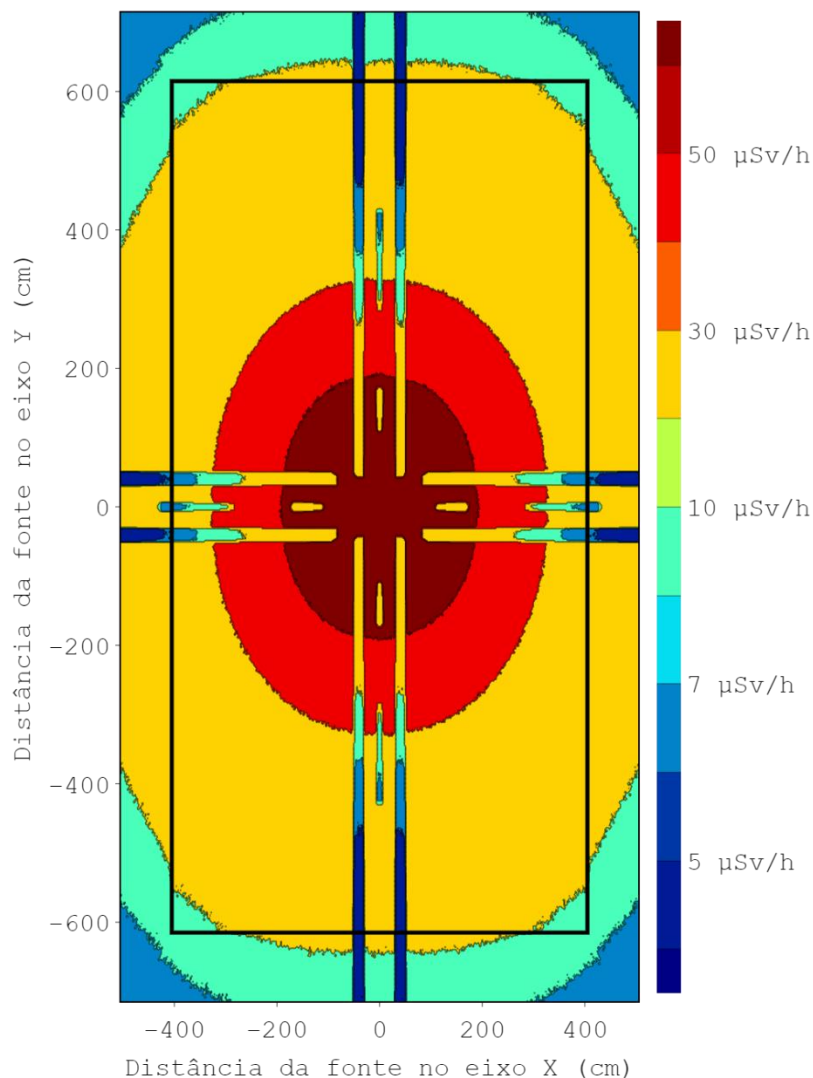
Para indivíduos do público, recomenda-se que permaneçam, no máximo, 125 horas por ano nas posições de C a N. Para as posições A a C, não há previsão ou recomendação de presença de indivíduos do público quando a fonte estiver exposta.

Não foram aqui apresentados dados da fonte recolhida, pois todos foram abaixo de  $0,01 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  e, assim, são irrelevantes se comparados com os dados obtidos para a fonte exposta. Portanto, os resultados permitem concluir que o poço para armazenamento da fonte cumpre o seu objetivo de proteção com eficiência.

#### **5.2.4 Mapa da taxa de equivalente de dose ambiente do LCDNM**

Com o intuito de fornecer um mapa de taxa de equivalente de dose ambiente no LCDNM foi utilizada a função FMESH do MCNP5. Os resultados para a fonte exposta e com detectores à altura de 100 cm estão mostrados na Figura 24.

**Figura 24** - Mapa da taxa de equivalente de dose ambiente para o LCDNM com a fonte exposta. O retângulo em preto representa os limites do laboratório.



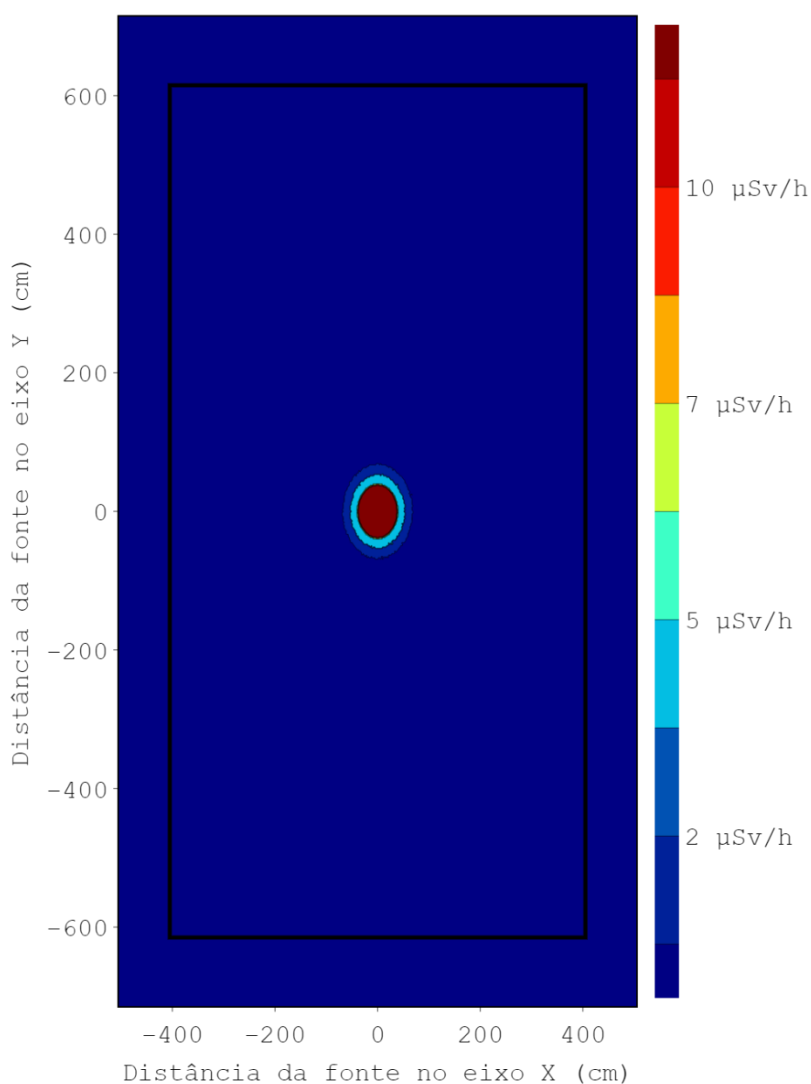
Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

Na Figura 24 a taxa de equivalente de dose ambiente nas adjacências do laboratório podem chegar até a escala de calibração de  $30 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ , resultado aderente com o apresentado na Tabela 16 para os pontos B e C. Além disso, a Figura 24 permite observar que os trilhos afetam a taxa de equivalente de dose ambiente em algumas posições. O motivo para isso é que a fonte está exposta em 3,5 metros de altura e os trilhos e seus suportes estão a 2,35 e 1,85 m, respectivamente. Como estão abaixo da fonte essas estruturas criam "sombras" que são observáveis no mapa do ambiente de dose equivalente.



Apesar das taxas de dose ambiente com a fonte recolhida estarem abaixo do limite anual para indivíduos do público, como citado anteriormente, foi construído um mapa de equivalente de dose ambiente para a fonte recolhida, representado na Figura 25.

**Figura 25** - Mapa da taxa de equivalente de dose ambiente para o LCDNM com a fonte recolhida. O retângulo em preto representa os limites do LCDNM.



Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

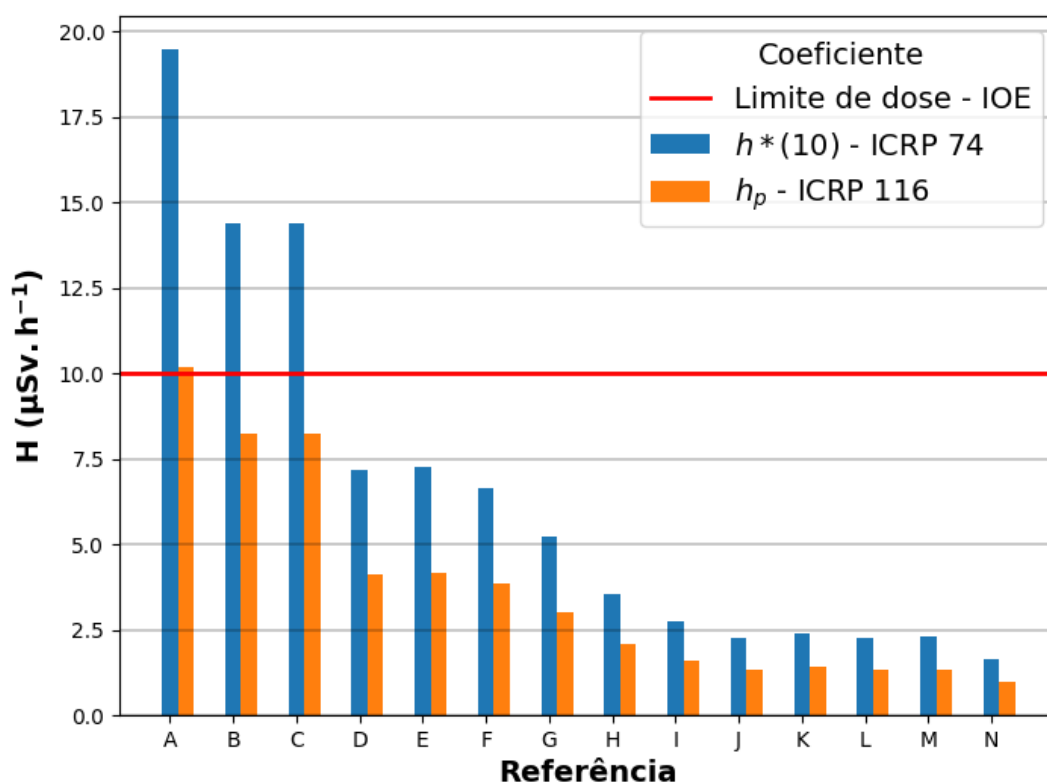
Como pode ser observado na Figura 25, os valores de taxa de equivalente de dose ambiente no interior do laboratório estão abaixo dos limites indicados em radioproteção quando a fonte está recolhida. Ademais, considera-se que as atividades

de calibração de detectores de nêutrons no LCDNM são viáveis do ponto de vista de radioproteção.

### **5.3 Comparação entre o equivalente de dose ambiente e o equivalente de dose individual em posições de interesse**

A norma CNEN NN 3.01 regulamenta que o limite de dose anual seja 20 mSv e 1 mSv para IOEs e indivíduos do público, respectivamente. O equivalente de dose ambiente é uma estimativa conservativa do equivalente de dose individual. Por tratar-se de um laboratório de calibração de detectores de nêutrons, a maioria das medidas foram realizadas em equivalente de dose ambiente, grandeza comum para calibração dos detectores. A partir disso, foi realizado um estudo com o intuito de comparar a taxa de equivalente de dose ambiente com a taxa de equivalente de dose individual nas posições de interesse para radioproteção, conforme mostrado na Figura 26. No gráfico, a linha vermelha representa o limite de taxa de dose individual para IOE,  $10 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ .

**Figura 26** - Comparação da taxa de equivalente de dose ambiente com a taxa de equivalente de dose individual para posições de interesse para proteção radiológica. Os coeficientes de conversão  $h^*(10)$  e  $h_p$  são de fluência para equivalente de dose ambiente e equivalente de dose individual conforme dispostos nos documentos do ICRU 74 e 116, respectivamente.



Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

A Figura 26 comprova que todos os valores de taxa de equivalente de dose individual são menores que os de taxa de equivalente de dose ambiente no mesmo ponto. A taxa de equivalente de dose individual apenas excede o limite anual para o ponto dentro do laboratório (ponto A). Portanto, o laboratório cumpre as recomendações do ponto de vista de equivalente de dose individual.

## 5.4 Estimativas das posições de calibração para o LCDNM

O LCDNM deve contar com duas fontes de  $^{241}\text{AmBe}$  com atividades de 37 GBq (1 Ci) e 592 GBq (16 Ci). A partir dos valores encontrados para os ajustes de taxa de equivalente de dose ambiente, foram estimadas as posições de calibração de acordo com as escalas dos detectores, conforme mostrado na Tabela 17.

**Tabela 17** - Posições estimadas para a calibração de detectores de nêutrons para as fontes de  $^{241}\text{AmBe}$

H (mSv/h)	Distância (cm) – 37 GBq	Distância (cm) - 592 GBq
0,02	115,6	450,0
0,05	72,0	285,0
0,08	57,0	225,0
0,2	35,0	140,0
0,5	22,0	87,5
0,8	17,0	68,8
2	11,0	42,9
5	6,8	26,8
50	2,1	8,0

Fonte: Morero, Lucas Dadalt (2021).

Como se vê pela Tabela 17, a fonte de menor intensidade (37 GBq) pode ser utilizada para calibrar as menores escalas, de 0,02, 0,05, e 0,08 mSv.h<sup>-1</sup> dos detectores de nêutrons às distâncias de 115,6, 72,0 e 57,0 cm, respectivamente. A fonte de maior intensidade (592 GBq) permite a calibração das escalas de 0,05 até 0,8 mSv.h<sup>-1</sup>. Assim sendo, as maiores escalas, de 2 até 50 mSv.h<sup>-1</sup> não poderiam ser calibradas de acordo com as recomendações da ISO-8 que sugere distâncias maiores que 50 cm.

## 6 CONCLUSÕES

Retomando-se uma das questões iniciais deste trabalho, se o LCDNM estaria conforme recomendado pela ISO 8529, com espalhamento inferior a 40% nos pontos de calibração, pode-se concluir que sim. Os valores máximos entre as possíveis distâncias de calibração entre 50 e 400 cm, correspondente ao maior trilho foram de 22,2% para o fator de espalhamento considerando o equivalente de dose ambiente e 39,3% considerando a fluência. Assim, conclui-se que o LCDNM está apto para calibrações de detectores de nêutrons conforme as recomendações de espalhamento da ISO-8529 entre as distâncias de 50 e 400 cm.

Foram também realizados estudos com o intuito de avaliar o aspecto de radioproteção. Em tal estudo foi comprovado que todas as áreas nas quais possa haver IOEs e indivíduos do público estão sujeitas a doses que podem ser consideradas adequadas, ou seja, os IOEs podem exercer o trabalho de calibração de equipamentos na totalidade de suas horas de trabalho dentro das especificações estabelecidas pela norma CNEN NN 3.01.

## 7 REFERÊNCIAS

Abolaban FA, Alawi MA, Taha EM, Elmoujarkach E, Banoqitah EM, Alhawsawi AM, et al. Estimation of thermal & epithermal neutron flux and gamma dose distribution in a medical cyclotron facility for radiation protection purposes using gold foils and gate 9. *Radiat. Prot. Dosim.* 2021;193(3-4):176–84. doi:10.1093/rpd/ncab034.

Agostinelli S, Allison J, Amako K, Apostolakis J, Araujo H, Arce P, et al. GEANT4 - A simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A. Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* 2003;506(3):250–303. doi:10.1016/s0168-9002(03)01368-8.

Alvarenga T, Freitas B, Fonseca E, Pereira WW, Caldas L. Determination of the Scattered Radiation at the Neutron Calibration Laboratory of IPEN using the Shadow Cone Method. *Braz. J. Radiat. Sci.* 2019;7(2B). doi:10.15392/bjrs.v7i2b.386.

Alvarenga TS. Estabelecimento e caracterização de um laboratório de calibração com campos neutrônicos de referência com rastreabilidade ao sistema metrológico internacional. Dissertação. Instituto de Pesquisas Energéticas - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2018.

Alvarenga TS, Neves LP, Perini AP, Sanches MP, Mitake MB, Caldas LVE, et al. Preliminary evaluation of a Neutron Calibration Laboratory; 24-29 nov. 2013; Brasil.

Alvarenga TS, Polo IO, Pereira WW, Caldas LVE. Use of Monte Carlo simulation and the Shadow-Cone Method to evaluate the neutron scattering correction at a calibration laboratory. *Radiat. Phys. Chem.* 2020a;170:108624. doi:10.1016/j.radphyschem.2019.108624.

Alvarenga TS, Polo IO, Pereira WW, Silva FS, Fonseca ES, Caldas LVE. Contribution of the scattered radiation on the neutron beam fluence at the calibration laboratory of IPEN. *Radiat. Phys. Chem.* 2020b;167:108219. doi:10.1016/j.radphyschem.2019.03.023.

Barth RF, Soloway AH, Fairchild RG. Boron Neutron Capture Therapy for Cancer. *Sci. Am.* 1990;263(4):100–7. doi:10.1038/scientificamerican1090-100.

Battistoni G, Cerutti F, Fassò A, Ferrari A, Muraro S, Ranft J, et al. The FLUKA

code: Description and benchmarking. AIP Conf. Proc. 2007;896(1):31–49. doi:10.1063/1.2720455.

Bedogni R, Domingo C, Roberts NJ, Thomas DJ, Chiti M, Esposito A, et al. Investigation of the neutron spectrum of americium-beryllium sources by Bonner sphere spectrometry. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. Accel. Spectrom. Detec. Assoc. Equip. 2014;763:547–52. doi:10.1016/j.nima.2014.00.040.

Blinov M V. Neutron emission at spontaneous fission. International Atomic Energy Agency; 24-27 maio 1988; Viena, Áustria.

Bourne MM, Mussi C, Miller EC, Clarke SD, Pozzi SA, Gueorguiev A. Characterization of the CLYC detector for neutron and photon detection. Nucl. Instru. Meth. Phys. Res. Sect. A. Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip. 2014;736:124–7. doi:10.1016/j.nima.2013.10.030.

Chadwick J. Possible Existence of a Neutron. Nature. 1932;129:312. doi:10.1038/129312a0.

Clarke RH, Valentin J. The History of ICRP and the Evolution of its Policies. Ann ICRP. 2009;39(1) :75-110. doi: 10.1016/j.icrp.2009.07.009.

Clem JM, Dorman LI. Neutron Monitor Response Functions, Springer, Dordrecht; 2000, p. 335–59. doi:10.1007/978-94-017-1187-6\_16.

CNEN. Posição Regulatória 3.01/002. [citado 7 de nov. de 2021]. [http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301\\_02.pdf](http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301_02.pdf)

Dzitko H, Cara P, Carin Y, Chel S, Facco A, Gex D, et al. Status and future developments of the Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc). Fusion Eng Des. 2021;168:112621. doi:10.1016/j.fusengdes.2021.112621.

Eberhardt JE, Rainey S, Stevens RJ, Sowerby BD, Tickner JR. Fast neutron radiography scanner for the detection of contraband in air cargo containers. Appl. Radiat. Isot. 2005;63(2):179–88. doi:10.1016/j.apradiso.2005.04.012.

Eisenhauer CM, Hunt JB, Schwartz RB. Calibration Techniques for Neutron Personal Dosimetry. Radiat. Prot. Dosim. 1985;10(1-4):43–57. doi:10.1093/oxfordjournals.rpd.a079410.

Fantidis JG, Dimitrios B V, Constantinos P, Nick V. Fast and thermal neutron radiographies based on a compact neutron generator. *J. Theor. Appl. Phys.* 2012;6:20. doi:10.1186/2251-7235-6-20.

Fowler JF. Neutrons in Radiotherapy: Slow Neutrons, Fast Neutrons and other Heavy Particles. International Atomic Energy Agency; 7-11 dez. 1964; Viena, Áustria.

Gallego E, Lorente A, Vega-Carrillo HR. Characteristics of the neutron field of the facility at DIN-UPM. *Radiat. Prot. Dosim.* 2004;110(1-4):73–9. doi:10.1093/rpd/nch199.

Grande M, Hila F, Garalde A, Betos CM, Dingle C, Romallosa K. Experimental, Computational, and Analytical Methods for the Characterization of a Neutron Field for Calibration of Neutron Monitoring Instruments in the Philippines. *Philipp. J. Sci.* 2020;149(SI):93–9.

Greenberg RR, Bode P, De Nadai Fernandes EA. Neutron activation analysis: A primary method of measurement. *Spectrochim. Acta - Part B At Spectrosc.* 2011;66(3-4):193–241. doi:10.1016/j.sab.2010.12.011.

Gressier V, Pelcot G, Pochat JL, Bolognese-Milstajn T. New IRSN facilities for neutron production. *Nucl Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* 2003;505(1-2):370-3. doi:10.1016/s0168-9002(03)01099-4.

Guzman-Garcia KA, Mendez-Villafañe R, Vega-Carrillo HR. Neutron field characteristics of Ciemat's Neutron Standards Laboratory. *Appl. Radiat. Isot.* 2015;100:84–90. doi:10.1016/j.apradiso.2014.10.028.

Hertel NE, Veinot KG, Hiller MM, Eckerman KF. Neutron dose coefficients for the lens of the eye. *J. Radiol. Prot.* 2021;41(4):628. doi:10.1088/1361-6498/abfff5.

Hoedlmoser H, Schuler C, Butterweck G, Mayer S. Characteristics of the neutron irradiation facilities of the PSI calibration laboratory. *AIP Conf. Proc.* 2011;1412:385-392. doi:10.1063/1.3665339.

International Commission on Radiological Protection . Operational quantities and new approach by ICRU. *Ann.* 2016;45(1):178–87. doi:10.1177/0146645315624341.

International Commission on Radiological Protection. ICRP 116 -Conversion



Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. Ann. 2010.

International Commission on Radiological Protection. ICRP 74 – Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. Ann. 1996.

International Energy Agency . Installed power generation capacity by source in the Stated Policies Scenario, 2000-2040. [citado 7 de nov. de 2021]. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/installed-power-generation-capacity-by-source-in-the-stated-policies-scenario-2000-2040>.

International Organization for Standardization . ISO 8529-1:2001 Reference neutron radiations — Part 1: Characteristics and methods of production. Switzerland: 2001.

International Organization for Standardization . ISO 8529-2:2000 Reference neutron radiations — Part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field. Switzerland: 2000.

Jun SM, Kim BH, Kim JL, Lee JK. Calibration of spherical neutron measuring devices with a  $^{252}\text{Cf}$  source in the neutron calibration room of the KAERI. J. Nucl. Sci. Technol. 2008;45(Suppl 5):286-9. doi:10.1080/00223131.2008.10875844.

Khabaz R. Analysis of neutron scattering components inside a room with concrete walls. Appl. Radiat. Isot. 2015;95:1–7. doi:10.1016/j.apradiso.2014.09.009.

Kim SI, Kim BH, Kim JL, Lee J II. A review of neutron scattering correction for the calibration of neutron survey meters using the shadow cone method. Nucl. Eng. Technol. 2015;47(7):939–44. doi:10.1016/j.net.2015.07.005.

Kirk BL. Overview of Monte Carlo radiation transport codes. Radiat. Meas. 2010;45(10):1318-22. doi:10.1016/j.radmeas.2010.05.037.

Knoll GF. Radiation detection and measurement; 4th ed. New York: Wiley; 2010.

Kondo K, Kwon S, Kumagai K, Akagi T, Bellan L, Cara P, et al. Neutron production measurement in the 125 mA 5 MeV deuteron beam commissioning of Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) RFQ. Nucl. Fusion. 2021;61:116002. doi:10.1088/1741-4326/ac233c.

Lacoste V. Review of radiation sources, calibration facilities and simulated workplace fields. *Radiat. Meas.* 2010;45(10):1083-9. doi:10.1016/j.radmeas.2010.05.036.

Le TN, Tran HN, Nguyen KT, Trinh G Van. Neutron Calibration Field of a Bare <sup>252</sup>Cf Source in Vietnam. *Nucl. Eng. Technol.* 2017;49(1):277–84. doi:10.1016/j.net.2016.07.011.

Le TN, Tran HN, Nguyen QN, Trinh G Van, Nguyen KT. Characterization of a neutron calibration field with <sup>241</sup>Am–Be source using Bonner sphere spectrometer. *Appl. Radiat. Isot.* 2018;133:68–74. doi:10.1016/j.apradiso.2017.12.012.

Lebreton L, Zimbal A, Thomas D. Experimental comparison of <sup>241</sup>Am–Be Neutron fluence energy distributions. *Radiat. Prot. Dosim.* 2007;126(1-4):3–7. doi:10.1093/rpd/ncm003.

Lehar F, Palečková J, Skřivánek J, Veselá M. Excitation of levels by inelastic neutron scattering. *Czechoslov. J. Phys.* 1961;11:229–43. doi:10.1007/bf01687236.

MacConnachie EL, Novog DR. Measurement, simulation and uncertainty quantification of the neutron flux at the McMaster Nuclear Reactor. *Ann. Nucl. Energy.* 2021;151:107879. doi:10.1016/j.anucene.2020.107879.

Maglieri R, Lincea A, Evans M, Seuntjens J, Kildea J. Measuring neutron spectra in radiotherapy using the nested neutron spectrometer. *Med. Phys.* 2015;42(11):6162–9. doi:10.1118/1.4931963.

McConn RJ, Gesh CJ, Pagh RT, Rucker RA, Williams III R. Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling. 2011. doi:10.2172/1023125.

Meilleur F, Munshi P, Robertson L, Stoica AD, Crow L, Kovalevsky A, et al. The IMAGINE instrument: first neutron protein structure and new capabilities for neutron macromolecular crystallography. *Acta Crystallogr. Sect. D.* 2013;69(10):2157–60. doi:10.1107/s0907444913019604.

Méndez-Villafañe R, Los Arcos Merino JM, Díaz EG, Lorente Fillol A. Determination of the emission rate of an Am-Be neutron source with a Bonner sphere spectrometer. *Radiat. Meas.* 2010;45(10):1271–5.

doi:10.1016/j.radmeas.2010.09.004.

Meriaty H. Characterisation of the neutron field at the ANSTO instrument calibration facility. Australia: 2009.

Mohr PJ, Taylor BN, Newell DB. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014. *Rev. Mod. Phys.* 2016;88(3):035009. doi:10.1103/RevModPhys.88.035009

Murata I, Tsuda I, Nakamura R, Nakayama S, Matsumoto M, Miyamaru H. Neutron and gamma-ray source-term characterization of AmBe sources in Osaka University. *Prog. Nucl. Sci. Technol.* 2014;4:345–8. doi:10.15669/pnst.4.345.

Naismith F, Thomas DJ. MCNP Calculation of Neutron Scatter in the Main Bay of the Chadwick Building, NPL. NPL. 1996.

Nico JS. Neutron beta decay. *J. Phys. G. Nucl. Part. Phys.* 2009;36(10):36. doi:10.1088/0954-3899/36/10/104001.

Nishino S, Tanimura Y, Ebata Y, Yoshizawa M. Development of the Graphite-Moderated Neutron Calibration Fields Using <sup>241</sup>Am-Be Sources in JAEA-FRS. *Orig. Res.* 2016;41(3):211-5. doi:10.14407/jrpr.2016.41.3.211.

O'Rourke BE, Fujiwara T, Furukawa K, Furusaka M, Hayashizaki N, Kato H, et al. Design and construction of an electron accelerator for a pulsed neutron facility at AIST. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. Atoms.* 2020;464:41–4. doi:10.1016/j.nimb.2019.11.041.

Okumura S, Kawano T, Lovell AE, Yoshida T. Energy dependent calculations of fission product, prompt, and delayed neutron yields for neutron induced fission on <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U, and <sup>239</sup>Pu. *Nucl. Sci. Technol.* 2021:1-14. doi:10.1080/00223131.2021.1954103.

Olsher RH, Mclean TD, Mallett MW, Seagraves DT, Gadd MS, Markham RL, et al. Characterization of neutron reference fields at US department of energy calibration fields. *Radiat. Prot. Dosim.* 2007;126(1-4):52–7. doi:10.1093/rpd/ncm012.

Pereira M, Salgado AP, Filho AS, Pereira WW, Patrão KCS, Fonseca ES. Neutron metrology laboratory facility simulation. *Radiat. Prot. Dosim.* 2014;161(1-4):153–6. doi:10.1093/rpd/ncu164.

Pereira WW, Estrada JJS, Patrão KCS, Alves CFE, Magalhães LAG, Leite SP.  $^{241}\text{Am}-\text{Be}(\alpha, n)$  characterization for a new laboratory facility in Brazil. *Radiat. Prot. Dosim.* 2018;180(1-4):29–32. doi:10.1093/rpd/ncx238.

Prokofiev A V., Blomgren J, Byström O, Ekström C, Pomp S, Tippawan U, et al. The TSL neutron beam facility. *Radiat. Prot Dosimetry.* 2007;126(1-4):18–22. doi:10.1093/rpd/ncm006.

Poston J. Dosimetry. *Encyclopedia of Physical Science and Technology.* [citado 7 de nov. de 2021]. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00185-X>

Radev R. Characterization of the Neutron Fields in the Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) Radiation Calibration Laboratory Low Scatter Calibration Facility. 2009. doi:10.2172/969067.

Rene Vega-Carrillo H, Gallego E, Lorente A, Rubio IP, Méndez R. Neutron features at the UPM neutronics hall. *Appl. Radiat. Isot.* 2012;70(8):1603–7. doi:10.1016/j.apradiso.2012.05.003.

Rinaldi R, Liang L, Schober H. *Neutron Applications in Earth, Energy, and Environmental Sciences.* Boston: Springer; 2009. doi:10.1007/978-0-387-09416-8\_11.

Rinard P. *Neutron Interactions with Matter.* 1997.

Rutherford E. Bakerian Lecture: Nuclear constitution of atoms. *Proc. R. Soc. London. Ser. A, Contain. Pap. Math. Phys. Charac.* 1920;97(686):374–400. doi:10.1098/rspa.1920.0040.

Schuhmacher H. Neutron calibration facilities. *Radiat. Prot. Dosim.* 2004;110(1-4):33–42. doi:10.1093/rpd/nch215.

Sjöberg BL, Mommsen H. Interaction and the end of the Late Bronze Age as displayed through neutron activation analysis of Late Helladic sherds: a case study on Asine in the Argolid, Greece. *Archaeol. Anthropol. Sci.* 2021;13:127. doi:10.1007/s12520-021-01356-7.

Souza LR, Fonseca ES da, Patrao KC de S, Pereira WW, Dantas ML. Ambient dose equivalent for neutron survey meters calibration: implementation in neutron Lab from LNMRI/IRD. *International Nuclear Atlantic Conference*; 30 sep. -5 out. 2007; Santos, SP; Brasil. Associação Brasileira de Energia Nuclear; 2007.

Sun J, Zhang Y, Peng X, Chen Z, Zhang X, Gorini G, et al. Simulations of scattered neutrons for the time-of-flight enhanced diagnostics (TOFED) neutron spectrometer on EAST. *Plas. Sci. Technol.* 2020;22(8). doi:10.1088/2058-6272/ab9529.

Van Der Ende BM, Atanackovic J, Erlandson A, Bentoumi G. Use of GEANT4 vs. MCNPX for the characterization of a boron-lined neutron detector. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A. Accel. Spectrom., Detect. Assoc. Equip.* 2016;820:40–7. doi:10.1016/j.nima.2016.02.082.

Waters LS, McKinney GW, Durkee JW, Fensin ML, Hendricks JS, James MR, et al. The MCNPX Monte Carlo radiation transport code. *AIP Conf. Proc.* 2007;896(1):81–90. doi:10.1063/1.2720459.

Wattenberg A. Photo-Neutron Sources and the Energy of the Photo-Neutrons. *Phys. Rev.* 1947;71(8):497–507. doi:10.1103/physrev.71.497.

X-5 Monte Carlo Team. MCNP—A General N-Particle Transport Code, Version 5. Volume I: Overview and Theory. Los Alamos National Laboratory. 2008.

Yoriyaz H. Método de Monte Carlo: princípios e aplicações em Física Médica. *Rev. Bras. Física Médica.* 2015;3(1):141–9. doi:10.29384/rbfm.2009.v3.n1.p141-149.

Yücel H, Budak MG, Karadag M, Yüksel AÖ. Characterization of neutron flux spectra in the irradiation sites of a 37 GBq <sup>241</sup>Am-Be isotopic source. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater Atoms.* 2014;338:139–44. doi:10.1016/j.nimb.2014.08.010.