AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESTABELECIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO COM
CAMPOS NEUTRÔNICOS DE REFERÊNCIA COM RASTREABILIDADE AO SISTEMA
METROLÓGICO INTERNACIONAL**

TALLYSON SARMENTO ALVARENGA

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientadora:
Profa. Dra. Linda V. E. Caldas**

**São Paulo
2018**

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

**ESTABELECIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO COM
CAMPOS NEUTRÔNICOS DE REFERÊNCIA COM RASTREABILIDADE AO SISTEMA
METROLÓGICO INTERNACIONAL**

TALLYSON SARMENTO ALVARENGA

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientadora:
Profa. Dra. Linda V. E. Caldas**

Versão Corrigida

**São Paulo
2018**

DEDICATÓRIA

A Deus, aos meus pais, Ruyterbran e Custódia,
ao meu irmão, Francisco, à minha esposa,
Jeniffer e à minha filha Helena, com carinho e
amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus por sua infinita bondade e misericórdia por ter me concedido saúde e a força necessária para finalizar esse trabalho, tornando esse sonho realidade.

À minha esposa Jeniffer, que me incentivou na realização do meu sonho e por compreender a minha ausência durante a realização desse trabalho, pois sem o amor dela nada teria sido possível.

Aos meus pais, Ruyterbran e Custódia, pelo amor incondicional, pelo incentivo e por sempre me apoiarem na realização dos meus sonhos. Muito obrigado por nunca terem desistido de mim.

Ao meu irmão Francisco (Kiko), que por mais difícil que fossem as circunstâncias, teve paciência, sempre me apoiando na realização desse trabalho. Obrigado pela amizade.

À minha sobrinha, Maria Eduarda. Obrigado pelo carinho.

Aos meus sogros, Maria José e Gerailton José, que sempre me ajudaram e me acolheram como um filho. Obrigado pelo carinho.

Agradeço a minha querida orientadora Dra. Linda V. E. Caldas, pela dedicação, pela confiança e principalmente pela paciência, que resultaram na realização desse trabalho. Sou grato pelo carinho, por toda preocupação, pelo cuidado de Mãe, e por sempre ter um bom conselho em todas as áreas da vida. É um privilégio tê-la tido como orientadora, pois com ela aprendi a cultivar a generosidade, a humildade e o amor por História e Português.

Ao Dr. Walsan Wagner, ao Dr. Evaldo Simões e a Dra. Karla Patrão, que sempre tiveram boa vontade em me ajudar a sanar as dúvidas relacionadas ao meu trabalho, e por serem sempre tão atenciosos e hospitaleiros.

À Dra. Maria da Penha Potiens, a Dra. Katia Aparecida Fonseca Normanton e ao Dr. Tufic Madi Filho pela ajuda e pelas sugestões de extrema importância na realização desse trabalho.

Ao MSc. Fellipe Sousa da Silva e ao Dr. Bruno Mendes Freitas, pelas opiniões e pela ajuda na realização desse trabalho.

Ao Dr. Claudio Federico, pela ajuda e pelos conhecimentos compartilhados que foram fundamentais na concretização desse trabalho.

Ao Sr. Marcos Xavier e ao Sr. Claudinei Cescon, pelas importantes sugestões oferecidas e por estarem sempre dispostos a me ajudar.

Aos amigos e colegas do IPEN, Dr. Gustavo Barreto Vila, MSc. Natália Fiorini da Silva, MSc. Maysa Costa de Castro, Dr. Danilo Junot, Dra. Patrícia de Lara Antonio, Bel. Daniel Litvac e MSc. Ivon Oramas Polo.

À Sra. Deise A. D. Santos, pela convivência tão prazerosa, pelos lanches maravilhosos e porque sempre esteve disposta a me ajudar, principalmente nas questões burocráticas que surgiram no decorrer desse trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Comissão Nacional de Energia Nuclear, pela infraestrutura oferecida e pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa durante todo o período de realização deste projeto de Doutorado.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), no Projeto INCT em Metrologia das Radiações na Medicina, pelos auxílios a viagens para participação de congressos científicos.

Ao Instituto de Física, Universidade de São Paulo, pelo empréstimo de uma parte do material necessário para o projeto.

A todos os irmãos da Assembleia de Deus Pinheiros (Setor 34), pelo amor, preocupação e cuidado, principalmente à Sra. Maria Bezerra “*in memorian*”, que me acolheu em sua casa com todo o carinho e me ajudou na realização do meu casamento.

EPÍGRAFE

“Lembre-se de Deus em tudo o que
fizer, e Ele lhe mostrará o caminho
certo”.

Provérbios 3.6

RESUMO

ALVARENGA, T. S. **Estabelecimento e caracterização de um laboratório de calibração com campos neutrônicos de referência com rastreabilidade ao sistema metrológico internacional.** 2018. 168 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo

No Brasil, atualmente só há um laboratório de calibração de monitores de radiação de nêutrons, sendo responsável pela guarda e manutenção do padrão brasileiro da fluência de nêutrons, localizado no Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), Rio de Janeiro, no Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, com uma demanda grande de serviços com esse tipo de radiação. Com o intuito de descentralizar a oferta de serviços de calibração, surgiu a necessidade da montagem de um segundo Laboratório de Calibração com Nêutrons (LCN), no IPEN. Nas situações práticas envolvendo a calibração de monitores de radiação de nêutrons, um dos problemas principais está relacionado à radiação espalhada, que pode variar dependendo das dimensões do laboratório usado nos procedimentos de calibração. No processo de caracterização do campo de radiação de nêutrons da fonte de $^{241}\text{AmBe}$, onde foi realizada a avaliação dos espectros, das energias, das taxas de fluência, das taxas de equivalente de dose ambiente $[\dot{H}^*(10)]$ e do coeficiente de conversão de fluência em dose $[h_{\phi}^*(10)]$ em diferentes posições do LCN, utilizando o feixe completo. A influência da radiação espalhada foi determinada por meio de três técnicas: Métodos de Monte Carlo, de Ajuste Reduzido e do Cone de Sombra. Dos resultados obtidos por meio de simulação e experimentalmente foi possível obter a fração de espalhamento em diferentes distâncias fonte-detector.

Palavras-chave: calibração de monitores; radiação de nêutrons; radiação espalhada.

ABSTRACT

ALVARENGA, T. S. **Establishment and characterization of a calibration laboratory with reference neutron beams and traceability to the international metrology system.** 2018. 168 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP. São Paulo

In Brazil, there is currently only one calibration laboratory for neutron radiation monitors. It is responsible for the custody and maintenance of the Brazilian neutron fluence standard, located at the Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes-LNMRI, Rio de Janeiro, at the Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear, with a great demand of services with this type of radiation. In order to decentralize the calibration service offer, it was necessary to set up a second Neutron Calibration Laboratory (LCN), at IPEN. In practical situations involving the calibration of neutron radiation monitors, one of the main problems is related to scattered radiation, which may vary depending on the size of the laboratory used for the calibration procedures. In the process of characterization of the neutron radiation field of the $^{241}\text{AmBe}$ source, the spectra, the energies, the fluence rate, the ambient dose equivalent rate and the conversion coefficient of fluence in dose at different positions of the LCN, were evaluated using the complete beam. The influence of the scattered radiation was determined by three techniques: Monte Carlo Method, the Reduced Adjustment Method and the Shade Cone Method. From the results obtained through simulation and experimentally, it was possible to obtain the scattering fraction at different source-detector distances.

Keywords: calibration of monitors; neutron radiation; scattered radiation.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	II
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIX
LISTA DE SIGLAS	XXIII
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
3. REVISÃO DA LITERATURA	6
4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	11
4.1. Os nêutrons	11
4.2. Fontes de nêutrons	12
4.2.1. Aceleradores de partículas carregadas	12
4.2.2. Fontes isotópicas	12
4.2.3. Reatores nucleares	14
4.3. Interação dos nêutrons com a matéria	14
4.4. Conversores de nêutrons	15
4.4.1. Conversor de ${}^6\text{Li}$ (n, α)	15
4.4.2. Conversor de ${}^{10}\text{B}$ (n, α)	15
4.4.3. Conversor de ${}^3\text{He}$ (n, p)	16
4.4.4. Conversor de ${}^{235}\text{U}$	16
4.5. Sistemas de detecção de nêutrons	16
4.5.1. Detectores proporcionais a gás	17
4.5.2. Detectores cintiladores	17
4.6. Grandezas	18
4.6.1. Grandezas físicas	19
4.6.1.1. Fluência	19
4.6.1.2. Dose absorvida	19
4.6.2. Grandezas operacionais	19
4.6.2.1. Equivalente de dose pessoal	19

4.6.2.2. Equivalente de dose ambiente.....	20
4.6.3. Grandezas de proteção	22
4.6.3.1. Dose equivalente	22
4.6.3.2. Dose efetiva	22
4.7. Calibração	23
4.8. Métodos para quantificar o espalhamento	25
4.8.1. Método do Cone de Sombra	26
4.8.2. Método de Ajuste Generalizado.....	27
4.8.3. Método de Ajuste Reduzido	28
4.9. Espectrômetro de Multiesferas de Bonner.....	28
4.9.1. Função-resposta.....	30
4.9.2. Códigos de desdobramento.....	31
4.10. Código de Monte Carlo (MCNP)	32
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
5.1. Sistemas de radiação	33
5.1.1. Fonte de ²⁴¹ AmBe.....	33
5.2. Monitor de radiação de nêutrons e gama	34
5.2.1. Monitor de radiação de nêutrons, marca Canberra, modelo Dineutron, série 133.....	34
5.2.2. Monitores de radiação de nêutrons, marca Thermo, modelo ASP-2, séries 02514 e 02517	35
5.2.3. Monitor de radiação gama, marca Automess, modelo 6150 AD, séries 163110	35
5.3. Sistemas auxiliares	36
5.4. Arranjo experimental	36
5.5. Espectrômetro de Multiesferas de Bonner.....	38
5.6. Cones de sombra	41
5.7. Programa NeuraLN	42
5.8. Estimativa de incertezas.....	43
5.9. Código de Monte Carlo (MCNP).....	44

6. RESULTADOS	46
6.1. Estabilidade em médio prazo da resposta do Espectrômetro de Multiesferas de Bonner	46
6.2. Cálculo de taxa de fluência e da taxa de equivalente de dose de nêutrons	50
6.3. Medição da radiação de fundo	56
6.4. Medição da taxa de contagem em diferentes distâncias fonte-detector	56
6.5. Fatores de atenuação do ar	72
6.6. Determinação do espectro de nêutrons em várias distâncias no LCN	74
6.7. Determinação da radiação espalhada	88
6.7.1. Método de Ajuste Reduzido	88
6.7.2. Método do Cone de Sombra	118
6.8. Determinação da fração de espalhamento	122
6.9. Mapeamento da radiação no campo de radiação da fonte de $^{241}\text{AmBe}$	124
6.10. Avaliação da radiação espalhada pelos componentes estruturais do LCN nos pontos de Calibração	127
6.11. Calibração de um monitor portátil	130
7. CONCLUSÕES	132
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
Apêndice A – Procedimento para calibração de monitores portáteis com radiação de nêutrons IT-LCI	142

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - Grandezas utilizadas neste trabalho.....	18
Figura 4.2 - Esquema do método de calibração para campos conhecidos (IAEA, 2000).....	24
Figura 4.3 - Esquema do Método do Cone de Sombra. Adaptação de (KHABAZ e HAKIMABAD, 2011).....	26
Figura 4.4 - Esquema do detector de $^6\text{Li}(\text{Eu})$ inserido em uma esfera moderadora adaptação de (LEMOS, 2009).....	29
Figura 4.5 - Principais interações dos nêutrons com as esferas moderadoras de polietileno que compõem o sistema EMB, adaptado de (MIRZAJANI, 2013).....	30
Figura 5.1 - Dimensões da fonte de nêutrons de $^{241}\text{AmBe}$ do LCN (AMERSHAM, 1986).....	34
Figura 5.2 - Monitor de área Canberra, modelo Dineutron.....	35
Figura 5.3 - Monitor de área Thermo, modelo ASP-2.....	35
Figura 5.4 - Monitor de radiação gama, 6150 AD.....	36
Figura 5.5 - Planta baixa do Laboratório de Calibração com Nêutrons.....	37
Figura 5.6 - Configuração do arranjo de irradiação do LCN.....	37
Figura 5.7 - Estrutura do LCN, com o arranjo de irradiação e a localização da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ (ALVARENGA, 2014).....	38
Figura 5.8 - Esferas de polietileno de alta densidade que compõem o Espectrômetro de Multiesferas de Bonner (EMB).....	39
Figura 5.9 - Diagrama esquemático do detector cintilador $^6\text{Li}(\text{Eu})$ (LUDLUM, 2003).....	39
Figura 5.10 - Pré-amplificador ORTEC 142 (ORTEC, 2002).....	40
Figura 5.11 - Analisador multicanal Lynx, Canberra (CANBERRA, 2008).....	40
Figura 5.12 - Esquema do sistema eletrônico responsável pela aquisição de espectro de contagem.....	40

Figura 5.13 - Espectro de contagem do detector cintilador de $^6\text{Li}(\text{Eu})$, gerado pelo programa Genie 2000 Spectroscopy System.....	41
Figura 5.14 - Cones de sombra 1, 2 e 3.....	42
Figura 5.15 - Tela principal do programa NeuraLN.....	43
Figura 5.16 - Geometria da instalação do LCN, utilizada nas simulações de Monte Carlo com o código MCNP5.....	45
Figura 6.1 - Reprodutibilidade da resposta do sistema EMB utilizando o detector sem a esfera de moderação.....	46
Figura 6.2 - Reprodutibilidade da resposta do sistema EMB utilizando a esfera de 5,08 cm (2").....	47
Figura 6.3 - Reprodutibilidade da resposta do sistema EMB utilizando a esfera de 7,62 cm (3").....	47
Figura 6.4 - Reprodutibilidade da resposta do sistema EMB utilizando a esfera de 12,70 cm (5").....	48
Figura 6.5 - Reprodutibilidade da resposta do sistema EMB utilizando a esfera de 20,32 cm (8").....	48
Figura 6.6 - Reprodutibilidade da resposta do sistema EMB utilizando a esfera de 25,40 cm (10").....	49
Figura 6.7 - Reprodutibilidade da resposta do sistema EMB utilizando a esfera de 30,48 cm (12").	49
Figura 6.8 - Taxas de fluência obtidas por cálculo, às distâncias fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.....	52
Figura 6.9 - Taxas de fluência obtidas por cálculo, às distâncias fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.....	52
Figura 6.10 - Taxas de equivalente de dose obtidas por cálculo, às distâncias fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.....	55
Figura 6.11 - Taxas de equivalente de dose obtidas por cálculo, às distâncias fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.....	55
Figura 6.12 - Taxas de contagem líquida obtidas utilizando o detector sem moderação, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.....	63

Figura 6.13 - Taxas de contagem líquida obtidas utilizando a esfera de 5,08 cm (2"), variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.....	64
Figura 6.14 - Taxas de contagem líquida obtidas utilizando a esfera de 7,62 cm (3"), variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.....	64
Figura 6.15 - Taxas de contagem líquida obtidas utilizando a esfera de 12,70 cm (5"), variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.....	65
Figura 6.16 - Taxas de contagem líquida obtidas utilizando a esfera de 20,32 cm (8"), variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.....	65
Figura 6.17 - Taxas de contagem líquida obtidas utilizando a esfera de 25,40 cm (10"), variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.....	66
Figura 6.18 - Taxas de contagem líquida obtidas utilizando a esfera de 30,48 cm (12"), variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.....	66
Figura 6.19 - Taxas de contagem líquida obtidas utilizando detector sem moderação, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.....	67
Figura 6.20 - Taxas de contagem líquida obtidas utilizando uma esfera de 5,08 cm (2"), variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.....	68
Figura 6.21 - Taxas de contagem líquida obtidas utilizando uma esfera de 7,62 cm (3"), variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.....	68
Figura 6.22 - Taxas de contagem líquida obtidas utilizando uma esfera de 12,70 cm (5"), variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.....	69
Figura 6.23 - Taxas de contagem líquida obtidas utilizando uma esfera de 20,30 cm (8"), variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.....	69
Figura 6.24 - Taxas de contagem líquida obtidas utilizando uma esfera de 25,40 cm (10"), variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.....	70

Figura 6.25 - Taxas de contagem líquida obtidas utilizando uma esfera de 30,48 cm (12”), variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.....	70
Figura 6.26 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 30 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	75
Figura 6.27 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 50 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	75
Figura 6.28 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 70 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	76
Figura 6.29 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 90 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	76
Figura 6.30 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 100 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	77
Figura 6.31 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 110 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	77
Figura 6.32 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 130 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	78
Figura 6.33 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 150 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	78
Figura 6.34 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 170 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	79

Figura 6.35 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 190 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	79
Figura 6.36 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 220 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	80
Figura 6.37 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 240 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	80
Figura 6.38 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 258 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	81
Figura 6.39 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 60 cm na direção B, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	82
Figura 6.40 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 80 cm na direção B, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	83
Figura 6.41 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 120 cm na direção B, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	83
Figura 6.42 - Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 140 cm na direção B, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).....	84
Figura 6.43 - Taxas de contagem direta [MD(d)] obtidas utilizando o detector sem moderação, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.....	96
Figura 6.44 - Taxas de contagem direta [MD(d)] obtidas utilizando a esfera de 5,08 cm (2") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.....	97

Figura 6.45 - Taxas de contagem direta [MD(d)] obtidas utilizando a esfera de 7,62 cm (3") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.....	97
Figura 6.46 - Taxas de contagem direta [MD(d)] obtidas utilizando a esfera de 12,70 cm (5") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.....	98
Figura 6.47 - Taxas de contagem direta [MD(d)] obtidas utilizando a esfera de 20,32 cm (8") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.....	98
Figura 6.48 - Taxas de contagem direta [MD(d)] obtidas utilizando a esfera de 25,40 cm (10") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.....	99
Figura 6.49 - Taxas de contagem direta [MD(d)] obtidas utilizando a esfera de 30,48 cm (12") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.....	99
Figura 6.50 - Taxas de contagem direta [MD(d)] obtidas utilizando o detector sem moderação, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.....	100
Figura 6.51 - Taxas de contagem direta [MD(d)] obtidas utilizando a esfera de 5,08 cm (2") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.....	101
Figura 6.52 - Taxas de contagem direta [MD(d)] obtidas utilizando a esfera de 7,62 cm (3") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.....	101
Figura 6.53 - Taxas de contagem direta [MD(d)] obtidas utilizando a esfera de 12,70 cm (5") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.....	102

Figura 6.54 - Taxas de contagem direta [MD(d)] obtidas utilizando a esfera de 20,32 cm (8") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.....	102
Figura 6.55 - Taxas de contagem direta [MD(d)] obtidas utilizando a esfera de 25,40 cm (10") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.....	103
Figura 6.56 - Taxas de contagem direta [MD(d)] obtidas utilizando a esfera de 30,48 cm (12") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.....	103
Figura 6.57 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 30 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5)	105
Figura 6.58 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 50 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).....	106
Figura 6.59 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 70 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5)	106
Figura 6.60 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 90 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).....	107
Figura 6.61 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 100 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).....	107
Figura 6.62 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 110 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).....	108

Figura 6.63 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 130 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).....	108
Figura 6.64 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 150 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).....	109
Figura 6.65 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 170 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).....	109
Figura 6.66 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 190 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).....	110
Figura 6.67 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 220 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).....	110
Figura 6.68 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 240 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).....	111
Figura 6.69 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 258 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).....	111
Figura 6.70 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 60 cm, na direção B, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).....	112
Figura 6.71 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 80 cm, na direção B, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).....	113

Figura 6.72 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 120 cm, na direção B, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).....	113
Figura 6.73 - Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 140 cm, na direção B, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).....	114
Figura 6.74 - Espectro direto (sem cone – com cone), e o espectro espalhado (com cone) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 100 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e o espectro direto obtido por meio do Método do Cone de Sombra no LNMRI/IRD.....	120
Figura 6.75 - Taxa de equivalente de dose ambiente [$\dot{H}^*(10)$], obtida por meio do monitor gama Automess, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.....	120
Figura 6.76 - Taxa de equivalente de dose ambiente [$\dot{H}^*(10)$], obtida por meio do monitor gama Automess, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Laboratórios que utilizam EMB para medições de espectro de nêutrons (MIRZAJANI, 2013).....	7
Tabela 4.1 - Principais reações utilizadas para produção de nêutrons Q é a energia liberada pela reação (TURNER, 2007).....	12
Tabela 4.2 - Características das principais fontes de nêutrons (α , n) (KNOLL, 2010).....	13
Tabela 4.3 - Características das principais fontes de nêutrons (γ , n) (KNOLL, 2010).....	13
Tabela 4.4 - Fator de qualidade (Q) em função da transferência linear de energia não restrita na água (L) (CNEN, 2011).....	20
Tabela 4.5 - Valores do coeficiente de conversão da fluência de nêutrons para equivalente de dose ambiente $H^*(10)$ (ICRP, 1996).....	21
Tabela 4.6 - Fatores de peso da radiação (w_R) (CNEN, 2011).....	22
Tabela 4.7 - Fatores de peso dos tecidos (w_T) (CNEN, 2011).....	23
Tabela 5.1 - Principais características da fonte de $^{241}\text{AmBe}^*$	33
Tabela 5.2 - Características da fonte: Energia média e o coeficiente de conversão de fluência $h_\phi^*(10)$ para a grandeza $H^*(10)$ (ISO, 2001).....	34
Tabela 5.3 - Dimensões dos cones de sombra 1, 2 e 3.....	42
Tabela 6.1 - Teste de reprodutibilidade da resposta do sistema EMB, utilizando as diferentes esferas.....	50
Tabela 6.2 - Taxas de fluência de nêutrons nos diferentes pontos de medição obtidas por meio de cálculo.....	51
Tabela 6.3 - Taxas de equivalente de dose obtidas por cálculo nos diferentes pontos de medição.....	54
Tabela 6.4 - Taxas de contagem da radiação de fundo obtidas utilizando o sistema EMB.....	56
Tabela 6.5 - Taxas de contagem líquida obtidas a 30 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.....	57
Tabela 6.6 - Taxas de contagem líquida obtidas a 50 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.....	57
Tabela 6.7 - Taxas de contagem líquida obtidas a 70 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.....	58

Tabela 6.8 - Taxas de contagem líquida obtidas a 90 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.....	58
Tabela 6.9 - Taxas de contagem líquida obtidas a 100 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.....	58
Tabela 6.10 -Taxas de contagem líquida obtidas a 110 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.....	59
Tabela 6.11 -Taxas de contagem líquida obtidas a 130 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.....	59
Tabela 6.12 -Taxas de contagem líquida obtidas a 150 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.....	59
Tabela 6.13 -Taxas de contagem líquida obtidas a 170 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.....	60
Tabela 6.14 -Taxas de contagem líquida obtidas a 190 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.....	60
Tabela 6.15 -Taxas de contagem líquida obtidas a 220 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.....	60
Tabela 6.16 -Taxas de contagem líquida obtidas a 240 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.....	61
Tabela 6.17 -Taxas de contagem líquida obtidas a 258 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.....	61
Tabela 6.18 -Taxas de contagem líquida obtidas a 60 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção B.....	62
Tabela 6.19 -Taxas de contagem líquida obtidas a 80 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção B.....	62
Tabela 6.20 -Taxas de contagem líquida obtidas a 120 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção B	62
Tabela 6.21 -Taxas de contagem líquida obtidas a 140 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção B	63
Tabela 6.22 -Os coeficientes de correlação obtidos por meio da taxa de contagem líquida às diferentes distâncias, nas direções A e B.....	71
Tabela 6.23 -Fatores de atenuação pelo ar nas diferentes distâncias.....	73
Tabela 6.24 -Valores obtidos por meio do desdobramento realizado pelo programa NeuraLN às diferentes distâncias nas direções A e B no LCN, utilizando as taxas de contagem relativas ao feixe total (direto + espalhado).....	85

Tabela 6.25 -Resultados de $\dot{H}^*(10)$ obtidos por meio das medições utilizando monitores de nêutrons calibrados às diferentes distâncias fonte-detector nas direções A e B no LCN.....	87
Tabela 6.26 -Valores da constante característica da fonte (k).....	89
Tabela 6.27 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 30 cm, na direção A.....	90
Tabela 6.28 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 50 cm, na direção A.....	90
Tabela 6.29 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 70 cm, na direção A.....	90
Tabela 6.30 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 90 cm, na direção A.....	91
Tabela 6.31 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 100 cm, na direção A.....	91
Tabela 6.32 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 110 cm, na direção A.....	91
Tabela 6.33 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 130 cm, na direção A.....	92
Tabela 6.34 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 150 cm, na direção A.....	92
Tabela 6.35 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 170 cm, na direção A.....	92
Tabela 6.36 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 190 cm, na direção A.....	93
Tabela 6.37 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 220 cm, na direção A.....	93
Tabela 6.38 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 240 cm, na direção A.....	93
Tabela 6.39 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 258 cm, na direção A.....	94
Tabela 6.40 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 60 cm, na direção B.....	94
Tabela 6.41 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 80 cm, na direção B.....	95
Tabela 6.42 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 120 cm, na direção B.....	95

Tabela 6.43 -Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 140 cm, na direção B.....	95
Tabela 6.44 -Coeficientes de correlação (R^2), obtidos por meio do Método de Ajuste Reduzido às diferentes distâncias, nas direções A e B.....	104
Tabela 6.45 -Resultados obtidos pelo programa NeuraLN para energia, taxa de fluência, $\dot{H}^*(10)$ e $h_\phi^*(10)$ em diferentes distâncias do LCN, utilizando a taxa de contagem do feixe direto.....	115
Tabela 6.46 -Resultados obtidos pelo programa NeuraLN para energia, taxa de fluência, $\dot{H}^*(10)$ e $h_\phi^*(10)$ em diferentes distâncias do LCN, utilizando as taxas de contagem do feixe espalhado.....	117
Tabela 6.47 -Taxas de contagem obtidas por meio do feixe completo, feixe espalhado e do feixe direto à distância fonte-detector de 100 cm, na direção A.....	119
Tabela 6.48 -Valores obtidos para energia média, taxa de fluência e $\dot{H}^*(10)$, $h_\phi^*(10)$ às distâncias fonte-detector 100 cm, na direção A, obtidos utilizando o Método do Cone de Sombra.....	121
Tabela 6.49 -Fração de espalhamento para taxa de fluência e $\dot{H}^*(10)$, obtidas por meio do método de ajuste reduzido nas distâncias fonte-detector que variam de 30 cm a 258 cm na direção A e de 60 cm a 140 cm na direção B.....	122
Tabela 6.50 -Resultados de $\dot{H}^*(10)$ e radiação de fundo obtidos por meio das medições utilizando monitor gama calibrado às diferentes distâncias fonte-detector nas direções A e B no LCN.....	125
Tabela 6.51 -Influência da radiação espalhada nas distâncias fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.....	129
Tabela 6.52 -Valores obtidos do monitor Ludlum 12-4 (227914) para a grandeza $\dot{H}^*(10)$ às distâncias fonte-detector de 30 cm e 50 cm, sem ajuste e com ajuste.....	131

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BNCT	Terapia de captura de nêutrons por boro
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CIEMAT	<i>Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas</i>
EMB	Espectrômetro de Multiesferas de Bonner
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ICRU	<i>International Commission on Radiation Units and Measurements</i>
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
INFN	<i>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Itália</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LNMRI	Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes
LCI	Laboratório de Calibração de Instrumentos
LCT	Laboratório de Testes com Nêutrons
LCN	Laboratório de Calibração com Nêutrons
MMC	Método de Monte Carlo
MCNP	Código de Monte Carlo N-Particle
NCC	<i>Neutron Calibration Center, Argentina</i>
NIPN	<i>National Institute for Physics and Nuclear Engineering, Romênia</i>
PTB	<i>Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Alemanha</i>
REZ	<i>Nuclear Research Institute, República Theca</i>
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

1. INTRODUÇÃO

Os nêutrons são partículas indiretamente ionizantes que podem ser produzidos naturalmente na atmosfera e são encontrados nos raios cósmicos, e também podem ser produzidos por fissão espontânea, em aceleradores de partículas, ciclotrons e reatores nucleares (TURNER, 2007). Os nêutrons podem ser classificados de acordo com seu intervalo de energia, que podem ser térmicos intermediários e rápidos.

A radiação de nêutrons tende a ser utilizada em três áreas: industrial, de pesquisa e médica (LUSZIK-BHADRA *et al.*, 1993). Na indústria, o uso da radiação de nêutrons destaca-se pela geração de energia nuclear e prospecção de petróleo. Na área médica, os nêutrons são usados em terapia de captura de nêutrons por boro (BNCT). No campo científico, os nêutrons estão presentes, por exemplo, nos estudos de fissão e fusão nucleares.

A utilização adequada de um sistema de medição da radiação de nêutrons é de suma importância, pois permite monitorar uma área e avaliar a segurança das instalações e dos operadores. A obtenção de uma medição confiável da radiação de nêutrons é uma tarefa muito difícil, devido à sua grande variação de energia, aos seus mecanismos complexos de interação com a matéria e a diferentes geometrias de irradiação. Consequentemente, a resposta obtida pelo instrumento é limitada, podendo ocorrer uma subestimativa ou uma superestimativa da dose; essa é uma característica da maioria dos instrumentos disponíveis comercialmente (SCHUHMACHER, 2004).

No passado, a monitoração de indivíduos expostos a radiações de nêutrons era muito limitada; somente os trabalhadores de reatores e aceleradores precisavam ser monitorados. Essa demanda é crescente devido ao aumento do uso de técnicas na indústria, pesquisa e na área médica, que utilizam radiações de nêutrons, assim aumentando o número de trabalhadores potencialmente expostos a essa radiação, e ocasionando a necessidade maior de monitoração individual.

A calibração dos instrumentos de medição de radiação, tais como os monitores de radiação e os dosímetros, é realizada com o objetivo de assegurar

medições precisas, com uma incerteza associada, atendendo às exigências estabelecidas pelas autoridades regulamentadoras (ISO, 2000).

Segundo a norma NE 3.02 da CNEN (CNEN, 2011), é obrigatória a calibração dos instrumentos de medição por uma instituição autorizada, que esteja em conformidade com as normas específicas, garantindo assim que o detector esteja trabalhando devidamente.

O Laboratório de Calibração de Instrumentos do IPEN (LCI) possui vários arranjos experimentais com fontes radioativas e equipamentos emissores de radiação ionizante para a calibração de uma variedade de equipamentos utilizados em medições das radiações, segundo as recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2001). O laboratório já possui estabelecidos os serviços de calibração de detectores com radiações X, gama, beta e alfa, utilizando fontes ou monitores rastreados por sistemas padrões primários ou secundários.

No Brasil, atualmente só há um laboratório de calibração de monitores de radiação de nêutrons, sendo responsável pela guarda e manutenção do padrão brasileiro da fluência de nêutrons, localizado no Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), Rio de Janeiro, no Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear, com uma demanda muito grande de serviços com esse tipo de radiação.

O IPEN possui mais de 30 monitores de radiação de nêutrons, utilizados pelos trabalhadores dos dois reatores nucleares (IEA-R1 e IPEN MB/01) e dos dois cíclotrons e dos laboratórios com várias fontes radioativas, que necessitam ser calibrados periodicamente. Com o intuito de descentralizar a oferta de calibração, surgiu a necessidade da montagem de um segundo Laboratório de Calibração com Nêutrons (LCN), no IPEN. No Laboratório de Calibração de Instrumentos (LCI), recentemente foi estabelecido um laboratório para testes de monitores portáteis, o Laboratório de Testes com Nêutrons (LTN) (ALVARENGA, 2014).

Nas situações práticas envolvendo a calibração de monitores de radiação de nêutrons, um dos problemas principais está relacionado à radiação espalhada, que pode variar dependendo das dimensões do laboratório usado nos

procedimentos de calibração. Por causa dos nêutrons espalhados, o espectro de nêutrons (e a taxa de dose de referência), medido num certo ponto do laboratório de calibração, não é o mesmo espectro que é emitido pela fonte de nêutrons, conseqüentemente influenciando a leitura do instrumento a ser calibrado e ocasionando um erro sistemático na calibração dos dispositivos para medição de nêutrons (ISO, 2000).

Para evitar tais situações, o laboratório de calibração de monitores de nêutrons deveria estar livre de qualquer superfície que possa ocasionar o espalhamento dos nêutrons; no entanto, na prática, é impossível obter tais condições, pois sempre haverá nêutrons espalhados em virtude da interação da radiação com o arranjo experimental, paredes, piso, teto e o ar.

A norma ISO 8529-2 apresenta vários métodos para avaliar e corrigir a radiação espalhada de nêutrons. Eles são denominados: Método Semi-Empírico, Ajuste Reduzido e Ajuste Polinomial, que são baseados em medições consecutivas variando a distância fonte-detector, e o Método do Cone de Sombra, que é baseado na medição direta do espalhamento no ponto escolhido para a medição (ISO, 2000; POZZI, 2016).

O estudo do campo de nêutrons pode ser realizado por meio do Espectrômetro de Multiesferas de Bonner (EMB), que tem sido largamente empregado na espectrometria neutrônica. Este sistema consiste em um detector de nêutrons térmico localizado no centro das esferas moderadoras, com diâmetros diferentes (CHU et al., 2016), que permitem o registro de diferentes contagens de nêutrons e diferentes curvas de respostas em função da energia. Os detectores mais utilizados no centro das esferas moderadoras são os detectores: ^3He , BF_3 e de $^6\text{Li}(\text{Eu})$ (THOMAS e ALEVRA, 2002).

A obtenção do espectro de nêutrons a partir da resposta dos detectores constitui um processo muito complexo, porque cada esfera possui um espectro característico em virtude da variação do diâmetro de cada uma delas. Para obter as informações do espectro de nêutrons por meio da espectrometria de Bonner, deve-se conhecer a resposta de cada esfera em função da energia dos nêutrons (função resposta) (MIRZAJANI et al., 2013).

O desdobramento do espectro tem por objetivo obter a distribuição da fluência dos nêutrons em função da energia. Com o intuito de obter melhores resultados, foram desenvolvidos vários códigos computacionais que ainda são alvo de pesquisa (MIRZAJANI *et al.*, 2013). Existem vários métodos de desdobramento (algoritmos), que são baseados em diversos princípios matemáticos para obtenção do espectro de nêutrons a partir das contagens medidas com o sistema EMB (THOMAS, 2004).

Dentre os vários códigos computacionais desenvolvidos, os principais são: o programa Bunki, que utiliza um método iterativo recursivo baseado em métodos de mínimos quadrados não lineares para se obter o espectro (LOWRY e JOHNSON, 1984), o programa Maxed, que aplica o princípio da entropia máxima para se obter o espectro (REGINATTO *et al.*, 2002); o programa Nsduaz, que emprega técnicas de inteligência artificial, usando um algorítmico de retro-propagação (VEGA-CARRILLO *et al.*, 2012), e o programa NeuraLN que utiliza redes neurais artificiais, com um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes que adquirem conhecimento através da experiência (LEMOS, 2009).

2. OBJETIVOS

O Laboratório de Calibração de Monitores de Nêutrons (LCN) do IPEN tem por objetivo proporcionar um sistema de calibração de monitores de uma grande variedade de instrumentos utilizados na proteção radiológica. Será estabelecido um novo procedimento, e os métodos já conhecidos serão aperfeiçoados, para fornecer rastreabilidade das medições no campo da radiação de nêutrons aos quais os trabalhadores e os indivíduos do público possam estar expostos.

O objetivo principal desse trabalho é o estabelecimento e a caracterização de um laboratório de calibração de instrumentos com radiação de nêutrons.

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar os campos de radiação de nêutrons do LCN;
- Avaliar o espalhamento de nêutrons por meio dos métodos recomendados pela norma ISO 8529-2 (ISO, 2000);
- Comparar os métodos de determinação do espalhamento e verificar sua aplicação no LCN;
- Obter experimentalmente os espectros de nêutrons utilizando a fonte de $^{241}\text{AmBe}$ em diferentes distâncias fonte-detector;
- Validar os espectros obtidos experimentalmente, comparando-os com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001);
- Estabelecer o procedimento de calibração de monitores de nêutrons no LCN, dentro do Sistema da Qualidade do LCI;
- Calibrar um monitor portátil de nêutrons do IPEN.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Uma das maiores dificuldades no estudo da Metrologia da Radiação de Nêutrons é a obtenção de informações referentes ao seu espectro de energia; isso ocorre devido à grande variação da sua energia que vai da região térmica até dezenas de GeV.

Devido a essa grande variação de energia e a fluência encontrada em diversas aplicações da radiação, nenhum instrumento de medição de nêutrons disponível atualmente no mercado pode dar informações precisas. Como forma de resolver essa questão, é imprescindível a utilização de campos padrões rigorosamente definidos para a calibração de detectores (GHODKE *et al.*, 2011).

Monitores e dosímetros pessoais são rotineiramente utilizados na medição de doses de nêutrons recebidas por indivíduos em seu ambiente de trabalho; a calibração deles deve ser realizada com programas e métodos bem estabelecidos, a fim de se obter respostas precisas.

É por esse motivo que a espectrometria tende a ser um elemento importante nas medições e na caracterização de campos de radiação de nêutrons (MAZROU e ALLAB, 2012). Dos vários tipos de espectrômetros desenvolvidos, o mais utilizado é o Espectrômetro de Multiesferas de Bonner (EMB), que foi descrito pela primeira vez por Bramblett e colaboradores (1960), composto de um detector de nêutrons térmicos localizado no centro de um conjunto de esferas moderadoras de diferentes diâmetros (ALEVRA, 1999).

Muitos laboratórios em todo o mundo têm realizado a medição do espectro de nêutrons em seus campos de trabalho utilizando o EMB. Thomas e Alevra (2003) apresentaram características básicas do sistema de Espectrometria de Bonner, comparando os diversos tipos de sistemas que já foram construídos, e enfatizando as vantagens e desvantagens desse espectrômetro. Na Tabela 3.1 são apresentados alguns laboratórios que utilizam EMB para medição de espectro de nêutrons.

Tabela 3.1: Laboratórios que utilizam EMB para medições de espectro de nêutrons (MIRZAJANI, 2013).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt-PTB (Alemanha)	Detector: Proporcional - ^3He ; Esferas: 3", 3.5", 4", 4.5", 5", 6", 7", 8", 10", 12", 15" e 18".
Nuclear Research Institute, Rez (República Tcheca)	Detector: Cintilador- $^6\text{Li(Eu)}$; Esferas: 2", 3", 4", 5", 8", 10" e 12."
National Institute for Physics and Nuclear Engineering-NIPN (Romênia)	Detector: Proporcional - ^3He ; Esferas: 2", 3", 4", 5", 8", 10" e 12".
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare-INFN (Itália)	Detector: Cintilador- $^6\text{Li(Eu)}$; Esferas: 2", 3", 4", 5", 8", 10" e 12."
Argentina Neutron Calibration Center-NCC (Argentina)	Detector: Cintilador- $^6\text{Li(Eu)}$; Esferas: 2", 3", 4", 5", 8", 10" e 12."
Instituto de Radioproteção e Dosimetria-IRD (Brasil)	Detector: Cintilador- $^6\text{Li(Eu)}$; Esferas: 2", 3", 4", 5", 8", 10" e 12."

Blanco e colaboradores (2014) caracterizaram o Neutron Standards Laboratory of Energetic, Environmental and Technologic Research Center (LPN/CIEMAT), localizado em Madri, utilizando o sistema EMB para medições experimentais, e o código MCNPX-2.7 para realizar as simulações.

Mazrou e Allab (2012) realizaram medições utilizando o sistema EMB e simulações com o objetivo de caracterizar os campos de nêutrons do irradiador OB26 do Research Center of Algiers; os resultados foram utilizados para desdobrar o espectro por meio do programa MAXED e outros códigos desenvolvidos pelo Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).

Gallego e colaboradores (2004) caracterizaram o espectro da fonte de $^{241}\text{Am(Be)}$ e determinaram características dosimétricas do campo às distâncias fonte-detector que variaram de 50 cm a 150 cm, de uma nova instalação de pesquisa em dosimetria de nêutrons, localizada no Nuclear Engineering Department of the Polytechnic University of Madrid (DIN-UPM). Primeiramente, foram realizadas simulações utilizando o código de Monte-Carlo MCNP-4C e em seguida realizaram as medições experimentais utilizando o sistema EMB. Com os resultados obtidos pelos dois métodos, foi possível observar que a interação dos

nêutrons com as paredes, o teto e o piso influenciam consideravelmente a fluência total do feixe.

Conforme definido pela norma ISO 8529-2 (ISO, 2000), a calibração ideal de um dispositivo sensível à radiação de nêutrons deve ocorrer em um espaço sem a presença de ar e que não haja qualquer interação da radiação com as paredes, o teto e o piso.

A norma ISO 8529-2 (ISO, 2000) apresenta alguns métodos utilizados para determinar os nêutrons espalhados: o Método do Cone de Sombra, o Ajuste Generalizado, o Método Semi-Empírico e o Ajuste Reduzido. Esses diferentes métodos concordam razoavelmente bem e permitem a comparação e a validação da correção dos nêutrons espalhados entre eles (GRESSIER e TAYLOR, 2011).

Vanhavere e colaboradores (2001) realizaram um estudo com o intuito de caracterizar o espalhamento no Laboratory for Nuclear Calibrations (SCK) do Belgian Nuclear Research Centre. Foram realizadas medições e simulações computacionais variando a distância entre a fonte e o detector. Utilizaram quatro métodos recomendados pela norma ISO 8529-2 (ISO, 2000); esses resultados foram comparados e foi possível concluir que o Método do Cone de Sombra obteve melhores resultados quando comparado com os demais métodos.

Takada e colaboradores (2004) investigaram a radiação de nêutrons espalhados em três laboratórios de diferentes tamanhos e determinaram um fator de correção. Foram realizadas medições com um monitor portátil de nêutrons e simulações utilizando o código de Monte Carlo MCNP-4. Para avaliação da radiação espalhada, foi utilizado o Método do Cone de Sombra em várias distâncias fonte-detector. Foi possível observar que as respostas dos detectores nos três laboratórios apresentaram concordância quando foram realizadas as correções para radiação espalhada.

No trabalho de Park e colaboradores (2011), foram realizadas medições experimentais e simulações computacionais com o intuito de obter o fator de correção do espalhamento do laboratório do Korean Research Institute of Standards and Science (KRISS). As medições foram realizadas utilizando o sistema EMB com as esferas de 5,08 cm a 30,48 cm (2" a 12") de diâmetro. Na avaliação do espalhamento foram utilizados três métodos: Cone de Sombra, o

Semi-Empírico e o Ajuste Generalizado. O fator de correção do espalhamento obtido por meio experimental e por simulação apresentaram concordância, mostrando que a calibração do KRISS foi bem estabelecida.

Olsher e colaboradores (2007) realizaram um estudo dos campos de nêutrons de referência dos laboratórios de calibração com nêutrons do US Department of Energy (DOE) de Los Alamos; utilizaram simulações computacionais com o código de Monte Carlo MCNPX para calcular os fatores de correção do espalhamento para os diferentes arranjos experimentais de vários laboratórios, com o objetivo de obter resultados mais consistentes e melhorar a precisão dos campos de referência utilizados na calibração.

Jun e colaboradores (2008) realizaram um estudo comparando os três métodos de determinação da radiação espalhada: Cone de Sombra, Ajuste Polinomial e Semi-Empírico, no Laboratório de Calibração de Detectores do Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI). As medições foram realizadas utilizando o sistema EMB para determinar os fatores de correção do espalhamento. Para este laboratório foi possível concluir que o Método Semi-Empírico apresentou a melhor resposta.

No trabalho de Khabaz (2015), foi simulada a influência da radiação de nêutrons espalhada em vários laboratórios de formas geométricas diferentes; utilizou-se o código de Monte Carlo MCNP- 4. Com os resultados obtidos por meio das simulações, foi possível observar que a contribuição do espalhamento era dependente do tamanho da sala e dos materiais que compõem a área interna do laboratório, e é quase independente da forma geométrica dele.

Atanackovic e colaboradores (2015) estudaram o espalhamento da radiação em diferentes alturas de 103 cm e 200 cm em relação ao piso, e distâncias fonte-espectômetro de 80 cm a 200 cm, e utilizaram o sistema EMB em conjunto com o Método do Cone de Sombra. Foi possível concluir que houve maior espalhamento no ponto que está mais próximo do piso (103 cm). No entanto, os valores obtidos não foram suficientes para ocasionar uma mudança nos procedimentos de calibração do laboratório.

Na tese de doutorado de Pozzi (2016), foi projetado e desenvolvido um novo laboratório de calibração com nêutrons no CERN, onde foi implantado e

caracterizado um campo que simula o espectro de nêutrons encontrado nas proximidades de aceleradores de alta energia, e em altitudes de voos comerciais. Foram realizadas medições experimentais e simulações computacionais com o objetivo de caracterizar o espalhamento, de forma a obter resultados promissores para realizar um futuro credenciamento ISO da instalação.

Ngoc Le e colaboradores (2018) realizaram a caracterização de um campo de radiação de nêutrons produzido por uma fonte de $^{241}\text{AmBe}$ no Institute for Nuclear Science and Technology (INST) localizado em Hanoi, Vietnam. As medições experimentais foram realizadas utilizando o sistema EMB com as esferas de 5,08 cm a 30,48 cm (2" a 12") de diâmetro. Utilizou-se o código MAXED para realizar o desdobramento dos espectros e obter os valores de taxa de fluência e taxa de equivalente de dose em cada ponto de medição. Na avaliação do espalhamento foram utilizados dois métodos: Semi-Empírico e Ajuste Generalizado. Assim, foi possível obter o fator de correção para o espalhamento em cada ponto de medição, e pode-se observar que a distância fonte-detector máxima para realizar a calibração deverá ser de até 2 metros, devido ao espalhamento superior de 40%.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 Os nêutrons

Os nêutrons foram descobertos em 1932 pelo físico James Chadwick, que realizou um experimento no qual incidiu um feixe de partículas alfa em uma amostra de berílio (Be). Por meio desse experimento, foi possível perceber que o núcleo de berílio radioativo emitiu partículas que não possuíam cargas e de massa praticamente igual à do próton. O valor de sua massa inercial é de 1,008665 u.m.a, possui spin igual a 1/2 e meia-vida de 10,0235 min, decaindo pela emissão de um próton, um elétron e um antineutrino (BYRNER, 2011).

Por ser eletronicamente neutro e ter um momento magnético nulo, os nêutrons são partículas indiretamente ionizantes, que cruzam as camadas eletrônicas sem sofrer qualquer tipo de interferência da barreira coulombiana, e interagem diretamente com o núcleo atômico por meio de forças nucleares.

Os nêutrons podem penetrar profundamente no material alvo sem sofrerem interações; quando interagem diretamente com os núcleos da substância que está sendo irradiada, os nêutrons podem desaparecer completamente e dar origem às radiações secundárias ou apenas modificar a sua direção e sua energia. A probabilidade de ocorrência desses processos de interação é caracterizada por meio de uma grandeza chamada de secção de choque microscópica (σ), expressa na unidade barn ($1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$) (KAPLAN, 1962).

Em consequência disso, a probabilidade de interação dos nêutrons com a matéria muda completamente, dependendo da energia do nêutron e do núcleo alvo. A classificação dos nêutrons é feita de acordo com os intervalos de energia (IAEA, 1985). Pode-se classificá-los como:

- Térmicos: $< 0,4 \text{ eV}$;
- Intermediários: $0,4 \text{ eV} - 200 \text{ keV}$;
- Rápidos: $200 \text{ keV} - 10 \text{ MeV}$;
- Relativísticos: $> 10 \text{ MeV}$.

4.2 Fontes de nêutrons

No estudo da espectrometria e da dosimetria dos campos de radiação de nêutrons é de suma importância o conhecimento da sua origem e produção desta radiação, pois isso possibilitará a escolha do instrumento de medição e facilitará a análise dos resultados das medições.

Os campos de radiação de nêutrons de referência podem ser produzidos por meio de processos de reações nucleares com partículas carregadas em aceleradores, por fontes isotópicas, e nos reatores (IAEA, 1985).

4.2.1 Aceleradores de partículas carregadas

Os aceleradores podem ser utilizados para produção de nêutrons monoenergéticos ou quase monoenergéticos, por meio de reações nucleares entre partículas aceleradas e um núcleo-alvo leve. As variações de um determinado tipo de material alvo e das energias dos íons acelerados permitem a obtenção de energias específicas de nêutrons (TURNER, 2007). Na Tabela 4.1 são mostradas as principais reações utilizadas para produção de nêutrons.

Tabela 4.1: Principais reações utilizadas para produção de nêutrons. Q é a energia liberada pela reação (TURNER, 2007).

Reações	Valor de Q (MeV)
$^3\text{H}(\text{d},\text{n})\ ^4\text{He}$	17,6
$^2\text{H}(\text{d},\text{n})\ ^3\text{He}$	3,27
$^{12}\text{C}(\text{d},\text{n})\ ^{13}\text{N}$	-0,281
$^3\text{H}(\text{p},\text{n})\ ^3\text{He}$	-0,764
$^7\text{Li}(\text{p},\text{n})\ ^7\text{Be}$	-1,65

4.2.2 Fontes isotópicas

As fontes isotópicas de nêutrons possuem uma grande vantagem devido à sua praticidade em relação à portabilidade e à facilidade de operação; estas fontes garantem uma fluência constante e apresentam uma meia-vida longa. Os nêutrons podem ser produzidos por meio de fissão espontânea e por reações (α,n) e (γ,n) (KNOLL, 2010).

As fontes do tipo (α, n) são produzidas por meio da combinação de um emissor alfa com um elemento de baixo número atômico, assim resultando na emissão de nêutrons. Na Tabela 4.2 são apresentadas algumas das principais fontes (α, n).

Tabela 4.2: Características das principais fontes de nêutrons (α, n) (BYRNE, 1995).

Fonte	E_{α} (MeV)	Meia-vida	Produção (n, α) (cm^2g^{-1})
$^{210}\text{Po}+\text{Be}$	5,30	135 dias	$0,7 \times 10^{-4}$
$^{22}\text{Ra}+\text{Be}$	Múltiplas	$1,622 \times 10^3$ anos	$1,8 \times 10^{-4}$
$^{239}\text{Pu}+\text{Be}$	5,15	$2,44 \times 10^4$ anos	$0,6 \times 10^{-4}$
$^{241}\text{Am}+\text{Be}$	5,48	$4,60 \times 10^2$ anos	$0,7 \times 10^{-4}$
$^{242}\text{Cm}+\text{Be}$	6,11	163 dias	$1,1 \times 10^{-4}$
$^{241}\text{Am}+\text{B}$	5,48	$2,44 \times 10^4$ anos	$1,0 \times 10^{-5}$
$^{241}\text{Am}+\text{F}$	5,48	$2,44 \times 10^4$ anos	$4,0 \times 10^{-6}$

As fontes do tipo (γ, n) são obtidas pelo mesmo princípio, alterando-se apenas o nuclídeo e utilizando-se um emissor gama de alta energia. Esses tipos de fontes são utilizados para uma série de aplicações, tais como: aferição da umidade em poços, prospecção de petróleo e calibração de instrumentos. A Tabela 4.3 mostra as características das principais fontes (γ, n).

Tabela 4.3: Características das principais fontes de nêutrons (γ, n) (BYRNE, 1995).

Fonte	E_{γ} (MeV)	Meia-vida	Produção (n, β) (cm^2g^{-1})
$^{24}\text{Na}+\text{Be}$	2,76	15,1 h	$0,7 \times 10^{-4}$
$^{24}\text{Na}+\text{D}_2\text{O}$	2,76	15,1 h	$1,8 \times 10^{-4}$
$^{72}\text{Ga}+\text{D}_2\text{O}$	2,51	14,3 h	$0,6 \times 10^{-4}$
$^{124}\text{Sb}+\text{Be}$	1,69	60,9 dias	$0,7 \times 10^{-4}$
$^{140}\text{La}+\text{Be}$	2,51	40,2 h	$1,1 \times 10^{-4}$

4.2.3 Reatores nucleares

Os reatores nucleares são dispositivos que utilizam a reação nuclear de fissão de forma controlada para geração de energia elétrica, para pesquisa e para produção de radioisótopos utilizados na medicina nuclear.

Os nêutrons obtidos por esta fonte apresentam uma fluência bastante ampla, comparando com as fontes isotópicas, os reatores podem gerar feixes com intensidade 100 vezes maiores. As suas principais desvantagens são em relação à mobilidade, ao elevado custo de produção e aos feixes contaminados por radiação gama. Os reatores podem ser classificados de acordo com a finalidade para a qual serão utilizados (TURNER, 2007).

Os reatores de pesquisa são utilizados na pesquisa científica e na produção de radioisótopos, e os reatores de potência são utilizados na geração de energia elétrica.

4.3 Interação dos nêutrons com a matéria

A interação dos nêutrons com a matéria consiste num processo bastante diferente quando comparado com as partículas carregadas e as radiações eletromagnéticas. Os nêutrons são partículas que não apresentam carga e por isso não interagem com a matéria por meio da força coulombiana. Assim, os nêutrons interagem diretamente com o núcleo dos átomos, característica que os torna bastante penetrantes (KNOLL, 2010).

Os nêutrons podem interagir com a matéria das seguintes formas: espalhamento elástico, espalhamento inelástico, captura radioativa e reação de fissão. No espalhamento elástico, a energia cinética total da interação dos nêutrons com o núcleo alvo é preservada. O núcleo permanece em seu estado fundamental e não altera a sua estrutura nuclear.

No espalhamento inelástico, o nêutron incidente é absorvido pelo núcleo alvo, deixando-o em um estado instável; em seguida, esse núcleo instável emite um nêutron com energia diferente do nêutron incidente. Após esta emissão, se o núcleo não alcançar a estabilidade, ele irá liberar o excesso de energia emitindo radiação gama (KNOLL, 2010).

Na captura radioativa, o nêutron incidente é capturado pelo núcleo alvo, deixando-o em um estado excitado. Depois ele tende a se desexcitar, emitindo

partículas β^- e radiação gama, transformando-se em um novo nuclídeo. Este processo ocorre para qualquer energia do nêutron, porém pode ocorrer com maior frequência para nêutrons térmicos.

As reações de fissão ocorrem quando o núcleo é fragmentado em duas ou mais partes após absorver o nêutron.

4.4 Conversores de nêutrons

Devido à ausência de cargas, os nêutrons não são diretamente ionizantes; eles são detectados de maneira indireta por meio da produção de um fóton ou uma partícula carregada, que são resultantes da interação do nêutron com o núcleo. Se o mecanismo de interação é conhecido, as informações sobre os nêutrons podem ser extraídas por intermédio dos estudos dos produtos da reação. A ocorrência da reação de conversão vai depender diretamente da seção de choque do nuclídeo conversor e da energia do nêutron incidente. São utilizados vários tipos de interações, que são divididas em espalhamento e absorção (TSOULFANIDIS, 1995).

4.4.1 Conversor de ${}^6\text{Li}$ (n, α)

O ${}^6\text{Li}$ é um elemento muito utilizado como conversor para detecção de nêutrons térmicos. Possui uma seção de choque de 940 b para nêutrons térmicos (TURNER, 2007). A reação pode ser escrita da seguinte forma:

onde n é nêutron e α é partícula alfa.

4.4.2 Conversor de ${}^{10}\text{B}$ (n, α)

O conversor de ${}^{10}\text{B}$ é utilizado em vários tipos de detectores de nêutrons, principalmente em detectores a gás BF_3 . Possui uma seção de choque de 3840 b para nêutrons térmicos. Quando o nêutron incidente é absorvido pelo ${}^{10}\text{B}$, ocorre a transmutação para ${}^7_3\text{Li}$ e a emissão de uma partícula α (TURNER, 2007). A reação de conversão pode ser descrita assim:

(*) Probabilidade de ocorrência de 6%

(**) Probabilidade de ocorrência de 94% para a emissão da partícula alfa com energia de 1,74 MeV; o núcleo Li desexcita-se emitindo radiação gama com energia de 480 keV.

4.4.3 Conversor de ${}^3\text{He}$ (n, p)

O conversor de ${}^3\text{He}$ é bastante utilizado em detectores gasosos, e possui uma secção de choque de 5330 b para nêutrons térmicos. A reação de conversão pode ser descrita da seguinte forma:

onde p é próton.

4.4.4 Conversor de ${}^{235}\text{U}$

O conversor de ${}^{235}\text{U}$ é utilizado em contadores de fissão. Quando os nêutrons térmicos atingem o detector, irão produzir fissão do material ${}^{235}\text{U}$ cujos produtos de fissão por sua vez produzirão uma ionização detectável. Os materiais físséis, tais como ${}^{235}\text{U}$ e o ${}^{239}\text{U}$, possuem alta secção de choque para nêutrons (TURNER, 2007).

4.5 Sistemas de detecção de nêutrons

Os monitores são utilizados com o propósito de monitorar e determinar a taxa de equivalente de dose em áreas onde pessoas são ocupacionalmente expostas à radiação de nêutrons. Os métodos de detecção podem ser classificados de duas formas: ativos e passivos.

Os principais tipos de detectores sensíveis a nêutrons são: gasosos, cintiladores e semicondutores (MADI FILHO, 1999).

4.5.1 Detectores proporcionais a gás

O detector proporcional é um detector do tipo câmara de ionização de gás, cujo funcionamento se baseia na aceleração dos elétrons, que basicamente são constituídos por uma câmara preenchida com gás, com um filamento na parte central que funciona como anodo; e as paredes exercem função de catodo, onde é aplicada a tensão elétrica; a movimentação destas cargas produz no coletor uma corrente elétrica ou um pulso detectável (TSOULFANIDIS, 1995).

O principal detector proporcional utilizado na detecção da radiação de nêutrons é o ^3He , que consiste em um tubo cilíndrico de alumínio, preenchido com hélio com pressão geralmente entre 405,30 kPa e 1013,25 kPa (entre 4 atm e 10 atm), e com tensão de funcionamento de 800 V. A principal vantagem em sua utilização é a sua excelente capacidade de discernir a radiação gama; com uma simples discriminação de amplitude pode-se eliminar a radiação gama sem comprometer a eficiência na detecção de nêutrons. A eficiência do contador melhora devido ao aumento da pressão do gás ^3He (TSOULFANIDIS, 1995).

4.5.2 Detectores cintiladores

A detecção da radiação de nêutrons por meio da utilização de detectores cintiladores é um dos métodos mais antigos, mas ainda é amplamente utilizado na medição e na espectrometria dos feixes. Os materiais cintiladores são responsáveis por transformar a energia cedida pelas radiações em luz. Os materiais conversores são o brometo de lantânio, sulfeto de zinco e os cintiladores plásticos (KNOLL, 2010).

Quando a radiação incide no detector cintilador, ela produz excitações, que ao retornarem ao estado estável irão produzir radiação no intervalo de frequência de luz visível, ou seja, radiação fluorescente. Esta radiação é absorvida por meio do efeito fotoelétrico na parede fotocatódica, e assim resultando a produção de elétrons livres, que são multiplicados na fotomultiplicadora até obterem a intensidade suficiente para produzirem um pulso, que é proporcional à energia da radiação (TURNER, 2007). Um dos principais detectores cintiladores utilizados na medição de nêutrons térmicos é o $^6\text{Li(Eu)}$, que possui um cristal higroscópico (enriquecido a 96%); deve-se evitar que seja exposto à umidade. Possui alta

secção de choque para nêutrons térmicos de 941 b. A sua principal vantagem é a boa discriminação para a radiação gama.

4.6 Grandezas

Depois de 30 anos da descoberta dos raios X, observou-se a necessidade da criação de uma comissão, que seria responsável pela organização, padronização das grandezas e quantificação dos efeitos da interação da radiação com a matéria. Em 1925, no Primeiro Congresso Internacional de Radiologia, foi criada a *International Commission on Radiation and Measurements* (ICRU). Três anos depois, no Segundo Congresso Internacional de Radiologia, em 1928, foi criada a *International Commission on Radiological Protection* (ICRP), citada por Okuno e Yoshimura (2010).

Nos relatórios da ICRU são definidos os tipos de grandezas físicas básicas e operacionais e a ICRP é responsável pelas grandezas limitantes de radioproteção. A Figura 4.1 mostra as grandezas relacionadas à radiação de nêutrons utilizadas neste trabalho.

Figura 4.1: Grandezas utilizadas neste trabalho.

4.6.1 Grandezas físicas

As grandezas físicas são definidas pela ICRU, que são utilizadas principalmente na metrologia e dosimetria das radiações, assim possibilitando caracterizar o campo de radiação em qualquer ponto.

4.6.1.1 Fluência Φ

A fluência é baseada na contagem de partículas incidentes (dN) que transpassam uma esfera de secção de área (da), medida em m². O número de partículas N pode corresponder às partículas transferidas, recebidas ou emitidas (ISO, 2000).

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (4.4)$$

4.6.1.2 Dose absorvida D

A dose absorvida é a grandeza utilizada para expressar a quantidade de energia cedida à matéria pelas partículas ionizantes incidentes, por unidade de massa de material irradiado, em um determinado ponto (ISO, 2000); é dada pela expressão:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (4.5)$$

onde D é a dose absorvida e (dE) é a energia total absorvida pela matéria em um elemento de massa (dm). No Sistema Internacional de Unidades (SI), a sua unidade é Joule/kilograma (J/kg), denominada gray (Gy).

4.6.2 Grandezas operacionais

As grandezas operacionais têm por objetivo fornecer uma estimativa das grandezas de radioproteção na maioria das situações de trabalho.

4.6.2.1 Equivalente de dose pessoal $H_p(d)$

O equivalente de dose pessoal é uma grandeza operacional utilizada na monitoração individual externa, sendo o produto da dose absorvida em um ponto, à profundidade (d) do corpo humano, pelo fator de qualidade da radiação neste ponto (CNEN, 2011). Esta grandeza utiliza o fator de qualidade da radiação (Q) como fator de peso (W_R); os valores de (Q) são apresentados na Tabela 4.4.

A sua unidade é joule/kilograma (J/kg) no Sistema Internacional de Unidades (SI), denominado sievert (Sv).

Tabela 4.4: Fator de qualidade (Q) em função da transferência linear de energia não restrita na água (L) (CNEN, 2011).

L na água (keV/μm)	Q
<10	1
10-100	0,32L- 2,2
>100	300/√L

4.6.2.2 Equivalente de dose ambiente $H^*(10)$

O equivalente de dose ambiente é uma grandeza utilizada na monitoração de ambientes de trabalho; é definida como a dose produzida em um ponto situado a uma profundidade (d) no interior da esfera de referência ICRU, que possui 30 cm de diâmetro, com densidade de 1 g/cm³ e a sua composição é de um material equivalente ao tecido humano (CNEN, 2011).

Para a radiação de nêutrons é adotada a profundidade de 10 mm e o valor obtido pode ser usado como estimativa da dose efetiva (E). A relação entre o equivalente de dose ambiente e a fluência é obtida por meio do coeficiente de conversão. A sua unidade no Sistema Internacional (SI) é joule/kilograma (J/kg), denominada sievert (Sv).

A ICRP 74 (ICRP, 1996) mostra os coeficientes de conversão para nêutrons monoenergéticos utilizados para se calcular o equivalente de dose ambiente $H^*(10)$. Na Tabela 4.5 são apresentados alguns estes valores em função da energia da radiação.

Tabela 4.5: Alguns valores do coeficiente de conversão da fluência de nêutrons para equivalente de dose ambiente $H^*(10)$ (ICRP, 1996).

Energia (MeV)	$h^*(10)$ (pSv.cm ²)
$1,00 \times 10^{-9}$	6,60
$1,00 \times 10^{-8}$	9,00
$2,53 \times 10^{-8}$	10,6
$1,00 \times 10^{-7}$	12,9
$5,00 \times 10^{-7}$	13,6
$1,00 \times 10^{-6}$	13,3
$2,00 \times 10^{-6}$	12,9
$1,00 \times 10^{-5}$	11,3
$2,00 \times 10^{-5}$	10,6
$5,00 \times 10^{-5}$	9,90
$1,00 \times 10^{-4}$	9,40
$5,00 \times 10^{-4}$	8,30
$1,00 \times 10^{-3}$	7,90
$2,00 \times 10^{-3}$	7,70
$1,00 \times 10^{-2}$	10,5
$3,00 \times 10^{-2}$	23,7
$7,00 \times 10^{-1}$	375
$9,00 \times 10^{-1}$	400
$1,00 \times 10^0$	416
$1,20 \times 10^0$	425
$2,01 \times 10^2$	260

4.6.3 Grandezas de proteção

As grandezas de proteção são utilizadas para se avaliar os riscos biológicos ocasionados após uma exposição à radiação ionizante.

4.6.3.1 Dose equivalente H_T

Os efeitos da radiação podem variar dependendo do seu tipo e da sua energia, para uma mesma dose absorvida em um meio, que pode tanto ser órgãos como tecidos. Portanto, foi necessário criar a grandeza dose equivalente (H_T), definida como o somatório das doses absorvidas médias em um órgão ou tecido (D_T), ponderadas pelo fator de peso da radiação (w_R), que é estimada a partir do valor médio da fator de qualidade da radiação (Q), a uma profundidade de 10 mm na esfera ICRU, e pertencente ao tipo e à energia da radiação incidente (R) (CNEN, 2011), que é dada por:

$$H_T = \sum_R D_T \cdot w_R \quad (4.6)$$

A unidade é Joule/kilograma (J/kg) no Sistema Internacional de Unidades, denominada sievert (Sv). Na Tabela 4.6 são apresentados os fatores de peso da radiação w_R (CNEN, 2011).

Tabela 4.6: Fatores de peso da radiação (w_R) (CNEN, 2011).

Tipo e faixa de energia	Fator de peso da radiação w_R
Fótons, todas as energias	1
Elétrons e múons, todas energias	1
Nêutrons, energia <10 keV	5
10 keV a 100 keV	10
>100 keV a 2 MeV	20
>2 MeV a 20 MeV	10
>20 MeV	5
Prótons, exceto os de recuo, energia >2 MeV	5
Partículas α , fragmentos de fissão, núcleos pesados	20

4.6.3.2 Dose efetiva E

A dose efetiva tem por objetivo estabelecer os limites de exposição do corpo todo à radiação, a fim de limitar a ocorrência de efeitos cancerígenos.

A dose efetiva (E) é a soma das doses equivalentes nos tecidos ou órgãos (H_T), multiplicada pelo respectivo fator de peso do tecido (w_T); então toma-se o somatório destes produtos para se obter a dose efetiva (E) (CNEN, 2011), que é expressa por:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (4.7)$$

A unidade é Joule/kilograma (J/kg) no Sistema Internacional de Unidades, denominada sievert (Sv). Na Tabela 4.7 são apresentados os fatores de peso dos tecidos (w_T).

Tabela 4.7: Fatores de peso dos tecidos (w_T) (CNEN, 2011).

Tecido ou Órgão	w_T
Gônadas	0,20
Medula óssea (vermelha)	0,12
Cólon	0,12
Pulmão	0,12
Estômago	0,12

4.7 Calibração

O Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) define calibração como: “um conjunto de operações que têm o objetivo de estabelecer, sob condições específicas, uma relação entre os valores indicados de um sistema de medição e os valores representados por uma medição materializada ou pelos materiais correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões” (INMETRO, 2012).

A calibração é uma operação imprescindível para garantia da rastreabilidade e da qualidade das medições, que tem por objetivo assegurar que o monitor ou o sistema de medição esteja funcionando conforme as normas ou os regulamentos.

Os programas de controle de qualidade recomendam que os monitores portáteis sejam calibrados periodicamente ou após serem submetidos a algum tipo de manutenção. O período no qual o monitor deverá ser calibrado é definido levando-se em consideração alguns fatores (VIVOLO e POTIENS, 2010):

1. O plano de radioproteção estabelecido pela instituição, devidamente aprovado pelo órgão regulamentador;
2. Histórico de uso e manutenções;
3. Tipo de instrumento e frequência estabelecida pelo fabricante.

Os procedimentos de calibração dos monitores de nêutrons devem ser realizados por laboratórios credenciados ou autorizados pelas autoridades competentes, seguindo as recomendações da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001), utilizando fontes de nêutrons cujos espectros estejam referenciados na mesma norma. Os espectros de energia das fontes de $^{241}\text{AmBe}$ e ^{252}Cf possuem energias elevadas que variam de 20 keV a 12 MeV.

Um dos métodos mais utilizados na calibração de monitores de radiação de nêutrons é o método de uso de campos de radiação conhecidos (IAEA, 2000). Este método é determinado pelo conhecimento das características de uma fonte padrão ou pelo mapeamento prévio do campo com um sistema padrão secundário. O monitor a ser calibrado é posicionado no campo de radiação onde são tomadas as medições, que serão comparadas com os valores previamente conhecidos da intensidade da fonte de radiação em termos da grandeza em questão (IAEA, 2000). Este método é apresentado na Figura 4.2.

Figura 4.2: Esquema do método de calibração para campos conhecidos (IAEA, 2000).

O procedimento de calibração é normalmente realizado utilizando uma fonte, cuja energia e taxa de emissão estão bem caracterizadas para irradiar o monitor. A fim de obter uma calibração adequada, faz-se necessário que as

respostas obtidas pelo instrumento de medição de nêutrons sejam corrigidas para todos os efeitos que possam influenciar a sua leitura.

No processo de calibração de monitores de nêutrons serão aplicados coeficientes de conversão, no ponto de referência, ao valor da fluência, para se obter o valor da grandeza equivalente de dose ambiente e com isso os monitores serão calibrados a partir de um campo de nêutrons conhecido (IAEA, 2000).

4.8 Métodos para quantificar o espalhamento

Segundo a norma ISO 8529-2 (ISO, 2000), o principal problema nas situações práticas de calibração dos monitores de nêutrons está relacionado à radiação espalhada pelo ar, paredes, chão, teto e no próprio arranjo experimental.

Devido à interação da radiação de nêutrons com oxigênio e nitrogênio, é necessário ainda realizar a correção de atenuação da radiação no ar. Esse fator de atenuação da radiação pelo ar $F_A(d)$ é obtido por meio da Equação 4.8:

$$F_A(d) = \exp(\bar{\Sigma} \cdot d) \quad (4.8)$$

onde d é a distância do centro da fonte ao centro do dispositivo, expressa em cm, e $\bar{\Sigma}$ é o coeficiente de atenuação linear médio dos nêutrons pelo ar, obtido por meio das somas das secções de choque do oxigênio e do nitrogênio, ponderadas pela distribuição espectral dos nêutrons emitidos pela fonte. O valor recomendado do $\bar{\Sigma}$ pela norma ISO 8529-2 (ISO, 2000), para a fonte de $^{241}\text{AmBe}$, é $890 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$.

Os principais efeitos ocasionados pelos nêutrons espalhados são as alterações no espectro e na fluência, medidas em certas posições de interesse no laboratório de calibração, consequentemente influenciando a leitura do instrumento a ser calibrado e ocasionando um erro sistemático na calibração dos dispositivos para medição de nêutrons (ISO, 2000).

No processo de escolha de um método de avaliação da radiação espalhada que seja confiável, devem ser analisados diversos fatores, tais como: tipo de fonte utilizada, formato do monitor, distância de calibração, tamanho e forma geométrica do laboratório.

Atualmente, existem quatro métodos recomendados pela norma ISO 8529-2 (ISO, 2000) para a determinação da radiação espalhada. Esses métodos são baseados na medição direta do espalhamento no ponto escolhido, Método do Cone de Sombra, e nas medições consecutivas, onde ocorre a variação da distância fonte-detector, denominados: Método de Ajuste Generalizado, Método Semi-Empírico e Método de Ajuste Reduzido (ISO, 2000).

A seguir serão apresentados os métodos utilizados no presente trabalho.

4.8.1 Método do Cone de Sombra

O Método do Cone de Sombra é a técnica mais simples utilizada para se corrigir o espalhamento da radiação de nêutrons. Um cone de sombra posicionado entre a fonte e o detector elimina os nêutrons diretos, possibilitando apenas a detecção dos nêutrons espalhados.

Este método tem sido largamente utilizado na avaliação do espalhamento, por ser considerado simples em relação aos demais métodos, possibilitando a medição direta. Para a aplicação deste método, no anexo E da norma ISO 8529-2 (ISO, 2000), há uma recomendação para a utilização de um cone composto de material absorvedor de nêutrons (polietileno borado) e ferro maciço, sendo que a parte traseira, que fica próxima da fonte, deve ser composta de 20 cm de ferro maciço e a parte dianteira de 30 cm de polietileno borado. Na Figura 4.3 é apresentado um diagrama do Método do Cone de Sombra.

Figura 4.3: Esquema do Método do Cone de Sombra. Adaptação de (KHABAZ e HAKIMABAD, 2011).

Este método é dependente do tamanho do cone de sombra e da configuração experimental (distância de calibração, ângulo de abertura dos cones e espalhamento da sala) e do campo de calibração (distribuição da energia dos nêutrons e a fluência). O cone de sombra deve ser projetado de forma que o seu ângulo não seja maior do que duas vezes o ângulo de abertura do detector, para ele absorver todos os nêutrons diretos e possibilitar que todos os nêutrons espalhados cheguem ao detector, evitando assim a ocorrência de uma sombra (ATANACKOVIC *et al.*, 2015).

A principal desvantagem deste método é a necessidade da construção de vários cones com dimensões diferentes para realização de medições em várias distâncias (JUN *et al.*, 2008). O cone de sombra deve ser colocado entre a fonte e o detector, com o propósito de evitar a passagem do feixe primário emitido pela fonte de nêutrons. Desta forma, a resposta obtida pelo detector (M_D) será a leitura do detector no ponto (d) do campo de nêutrons, corrigida para todos os efeitos externos (ATANACKOVIC *et al.*, 2015). A leitura corrigida é obtida por meio da diferença entre as medições realizadas sem o cone (M_T) e com o cone (M_S) (ISO, 2000).

$$M_{(D)}(d) = [M_T(d) - M_S(d)] \times F_A(d) \quad 4.9$$

onde $F_A(d)$ é o fator de atenuação pelo ar no ponto (d).

4.8.2 Método de Ajuste Generalizado

O Método de Ajuste Generalizado consiste na obtenção da leitura do dispositivo $M_T(d)$ em função da distância fonte-detector (d) (ISO, 2000), como mostra a Equação 4.10:

$$M_T(d) = \frac{k}{d^2} \times F_3(d) \quad 4.10$$

onde k é a característica fonte-detector, que é obtido por meio do ajuste da Equação 4.10, d é a distância fonte-detector e $F_3(d)$ é a função que corrige o desvio da taxa de contagem a partir da lei do inverso do quadrado da distância, onde esse valor decresce com a diminuição da distância.

As principais desvantagens desse método é que ele só pode ser utilizado para detectores com moderadores esféricos e com detector esférico central; e necessita ainda de um conjunto completo de medições para cada tipo de instrumento a ser calibrado.

4.8.3 Método de Ajuste Reduzido

O Método de Ajuste Reduzido é uma forma simplificada do Método de Ajuste Generalizado, na qual a ideia inicial é que a distância mínima utilizada neste método fornece um fator de correção geométrico próximo de 1, e que o espalhamento no ar pode ser ignorado, se for comparado com o espalhamento causado pelo arranjo experimental (ISO, 2000).

$$M_T(d) = \frac{k}{(d+a)^2} + S \quad 4.11$$

onde os parâmetros k , a e S são obtidos por meio do ajuste da Equação 4.11, assim como suas incertezas, e d é a distância fonte-detector.

A principal vantagem deste método é que não possui nenhuma limitação em relação ao tamanho, ao formato, e às dimensões da sala, e apresenta uma alta precisão estatística.

4.9 Espectrômetro de Multiesferas de Bonner

Dos vários espectrômetros que foram desenvolvidos para medição da radiação de nêutrons, o Espectrômetro de Multiesferas de Bonner (EMB) tem sido largamente utilizado devido ao fato de medir nêutrons em várias faixas de energia, variando dos térmicos aos rápidos; possui uma resposta quase isotrópica, é fácil de operar e discrimina fótons e ruído eletrônico (ALEVRA, 1999).

Esse sistema foi desenvolvido por Bramblett e colaboradores (1960) e é composto por um detector de nêutrons térmicos, localizado no centro de uma esfera moderadora composta de polietileno de alta densidade de diferentes diâmetros.

A combinação de um detector de nêutrons térmico com as esferas moderadoras possibilita uma alta sensibilidade para detecção de nêutrons em um amplo intervalo de energia. No entanto, essa sensibilidade vai depender do

diâmetro das esferas, que variam de 5,08 cm a 30,48 cm (2 pol a 12 pol). Quanto menor a esfera, menor será seu grau de moderação, e consequentemente os nêutrons de baixas energias terão maior probabilidade de serem detectados e os de alta energia tendem a escapar (ALEVRA e THOMAS, 2003).

Os principais detectores utilizados com as esferas de Bonner disponíveis no mercado são: o contador proporcional do tipo ^3He e o detector de cintilação $^6\text{Li}(\text{Eu})$, que é composto de um cristal de iodeto de lítio dopado com európio de 4 mm de diâmetro e 4 mm de altura, com uma alta seção de choque para nêutrons térmicos de 941 b (FISHER *et al.*, 2011). Na Figura 4.4 pode-se observar um esquema do sistema EMB.

Figura 4.4: Esquema do detector de $^6\text{Li}(\text{Eu})$ inserido em uma esfera moderadora. Adaptação de (LEMOS, 2009).

Pode-se observar na Figura 4.5 as principais interações dos nêutrons com uma esfera de polietileno, onde:

- O nêutron 1 interage com a esfera por meio da colisão elástica e escapa;
- O nêutron 2 interage com a esfera, ocasionando sua termalização e depois escapa;
- O nêutron 3 interage diversas vezes com a esfera até ser termalizado e depois é capturado por um núcleo de hidrogênio; na maioria das vezes ocorre a emissão de uma raio gama com energia de 2,2 MeV;

- O nêutron 4 interage diversas vezes com a esfera até ser termalizado e depois interage com o detector de nêutrons térmicos, localizado no centro da esfera.

Figura 4.5: Principais interações dos nêutrons com as esferas moderadoras de polietileno que compõem o sistema EMB, adaptado de (MIRZAJANI, 2013).

4.9.1 Função-resposta

Para se obter informações de um espectro de nêutrons utilizando o sistema EMB, é imprescindível conhecer a resposta de cada esfera em função da energia do nêutron (função-resposta), que também é chamada de matriz resposta. Cada esfera caracteriza-se como um detector diferente, por ter a capacidade de detectar nêutrons em intervalos de energia diferentes.

As funções-resposta são de difícil determinação experimental, pois necessitam de feixes de nêutrons monoenergéticos e locais adequados para a calibração. A forma mais indicada para esta determinação é a utilização de métodos computacionais, como o código de Monte Carlo MCNP, porque ele possibilita a criação de feixes monoenergéticos e a verificação das respostas que variam de alguns MeV até GeV (GRESSIER e TAYLOR, 2011). A partir das contagens obtidas por meio das esferas de Bonner e utilizando a matrix resposta adequada, é possível obter-se a distribuição da fluência de nêutrons em função da energia (CHU *et al.*, 2016).

4.9.2 Códigos de desdobramento

O desdobramento do espectro de nêutrons é muito complexo de ser realizado. Com o objetivo de realizar tais deconvoluções, foram desenvolvidos vários códigos computacionais baseados em diferentes princípios matemáticos.

Na literatura existem vários programas computacionais utilizados para o desdobramento de espectros, que usam diferentes algoritmos. Dentre eles pode-se citar:

1. O código MAXED, desenvolvido por Reginatto e colaboradores no ano de 2002, no qual se aplica o princípio de entropia máxima para a obtenção do espectro (REGINATTO *et al.*, 2002);.
2. O código BUNKI foi desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa Naval em Washington no ano de 1981 por Johnson e Gorbics: esse código foi escrito em FORTRAN IV e codificado para ser aplicado em um computador DEC-10, mas pode ser adaptado para se utilizar em computadores pessoais, garantindo a qualidade do espectro; ele distribui os nêutrons detectados em pequenos intervalos de energia em uma das linhas de matriz-resposta das esferas de Bonner; em seguida, o algoritmo faz um ajuste linear utilizando o método dos mínimos quadrados não lineares de interação recursiva (LOWRY e JOHNSON 1984);
3. O código BUMS, desenvolvido por Sweezy, é baseado na plataforma do BUNKI e possui uma ampla variedade de algoritmos de desdobramento (SPUNIT, BOM, MAXED e SAND-II) e matrizes-resposta (UTA4, UTA13 e SAN4) das esferas de Bonner; este código foi escrito em linguagem HTML e projetado para aplicação em um servidor web (SWEEZY, 2001);
4. O código NSDUAZ foi desenvolvido por Vega-Carriilo e colaboradores (2012), utilizando o *software* LabView, que tem por objetivo fornecer uma interface gráfica amigável e evitar a escolha do espectro inicial pelo usuário.
5. O programa NeuralN é baseado em um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento por meio da experiência, que é composto por unidades interconectadas com aprendizado supervisionado, que utiliza algoritmo de retropropagação

de erro com o critério de parada de correlação cruzada, que é baseado no melhor resultado para o conjunto de teste, e na determinação e na classificação observando as características dos espectros referenciais de nêutrons (LEMOS, 2009).

4.10 Código de Monte Carlo (MCNP)

O Código de Monte Carlo, desenvolvido no Los Alamos National Laboratory (LANL/EUA), é um método estatístico no qual se utiliza uma sequência de números aleatórios com a finalidade de solucionar problemas matemáticos e físicos, os quais são muito difíceis de serem obtidos de maneira direta. Este código, quando utilizado para o cálculo de transporte de radiação, consiste basicamente na escolha aleatória da trajetória de cada partícula, de forma que o comportamento dessas partículas seja descrito em termos das grandezas macroscópicas, como densidade e fluência. Com base nessas grandezas obtidas, é possível obter outras grandezas tais como a dose absorvida (BRIESMEISTER, 1993).

5. Materiais e Métodos

A seguir serão descritos os materiais que foram utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Toda a infraestrutura necessária encontrou-se disponível no IPEN.

5.1 Sistemas de radiação

5.1.1 Fonte de $^{241}\text{AmBe}$

Foi utilizada uma fonte de $^{241}\text{AmBe}$, que foi calibrada no Sistema Absoluto de Padronização Primária do Instituto de Radioproteção e Dosimetria, IRD/CNEN. A Tabela 5.1 apresenta suas principais características.

Tabela 5.1: Principais características da fonte de $^{241}\text{AmBe}^*$.

Fonte	Atividade (Bq)	Meia-vida (anos)	Taxa de emissão (n/s)	**Taxa de emissão corrigida (n/s)	Data de calibração
$^{241}\text{AmBe}$	$3,7 \times 10^{10}$	432,2	$2,46 \times 10^6$	$2,44 \times 10^6$	17/06/2011

* Certificado de Calibração LNMRI 1491/2011.

** Taxa de emissão corrigida para o ano de 2017.

Esta fonte é composta por uma mistura homogênea de amerício e berílio, onde os nêutrons são produzidos por meio da interação da radiação alfa liberada pelo ^{241}Am bombardeando o ^9Be (BEDOGNI *et al.*, 2014). Optou-se por utilizar essa fonte devido à sua meia-vida longa, o que evita a necessidade de sua calibração periódica, e por ser recomendada pela ISO 8529-1 (ISO, 2001). A Figura 5.1 apresenta as dimensões da fonte de $^{241}\text{AmBe}$.

Figura 5.1: Dimensões da fonte de nêutrons de $^{241}\text{AmBe}$ do LCN (AMERSHAM, 1986).

A Tabela 5.2 apresenta os valores de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) para energia média e para o fator de conversão de fluência de nêutrons para a grandeza de $H^*(10)$ para os espectros da fonte de $^{241}\text{AmBe}$.

Tabela 5.2: Características da fonte: Energia média e o fator de conversão de fluência $h_\phi^*(10)$ para a grandeza $H^*(10)$ (ISO, 2001).

Fonte	Energia (MeV)	$h_\phi^*(10)$ (pSv.cm ²)
$^{241}\text{AmBe}$	4,16	391

5.2. Monitores de radiação de nêutrons e gama

Os seguintes detectores de radiação de nêutrons portáteis foram utilizados neste trabalho.

5.2.1. Monitor de radiação de nêutrons, marca Canberra, modelo Dineutron, série 133

O detector Dineutron possui dois detectores de ^3He com esferas moderadoras de tamanhos variados (Figura 5.2). As características principais deste detector são:

- Resposta energética: 0,025 eV a 15 MeV;
- Intervalo de taxa de equivalente de dose ambiente: 0,01 mSv/h a 99 mSv/h.

Figura 5.2: Monitor de área Canberra, modelo Dineutron.

5.2.2. Monitores de radiação de nêutrons, marca Thermo, modelo ASP-2, séries 02514 e 02517

Cada um destes equipamentos possui um detector proporcional a gás com BF_3 e um moderador de polietileno esférico com 22,9 cm de diâmetro (Figura 5.3). Suas características principais são:

- Resposta energética: de 0,025 eV a 10 MeV;
- Intervalo de taxa de equivalente de dose ambiente: 0 mSv/h a 100 mSv/h.

Figura 5.3: Monitor de área Thermo, modelo ASP-2.

5.2.3. Monitor de radiação gama, marca Automess, modelo 6150 AD, séries 163110

O monitor Automess 6150 possui um detector Geiger-Müller localizado na parte interna (Figura 5.4).

Suas principais características são :

- Resposta energética: 45 keV a 3 MeV;
- Intervalo de taxa de equivalente de dose ambiente: 0,0001 mSv/h a 0,99 mSv/h. Indicação do instrumento em unidade antiga : 0,01 mR/h e 99 mR/h.

Figura 5.4: Monitor de radiação gama, Automess 6150 AD.

5.3. Sistemas auxiliares

Os sistemas auxiliares utilizados no desenvolvimento e na caracterização do LCN foram:

- ✓ Barômetro Setra, modelo 270, e termômetro digital Mitutoyo, modelo OPUS20, utilizados para o monitoramento das condições ambientais do laboratório das medições;
- ✓ Sistema de ar condicionado Electrolux, modelo VE12F, e desumidificador de ambiente Desidrat Plus, modelo 1500.

5.4. Arranjo experimental

Para a realização deste trabalho foi utilizada a estrutura do LCN, localizado no Bunker, que é uma instalação integrante do Laboratório de Calibração de Instrumentos, do Centro de Metrologia das Radiações (CMR). O LCN possui dimensões de 6,88 m x 5,46 m e paredes de concreto com espessura de 15 cm. O laboratório possui 2,8 m de altura, sendo que o teto de concreto possui 15 cm de espessura, e o piso de granito 5 cm de espessura. A planta baixa do LCN pode ser visualizada na Figura 5.5.

Figura 5.5: Planta baixa do Laboratório de Calibração com Nêutrons.

No centro da sala está localizado o arranjo de irradiação, que possui duas bases deslizantes perpendiculares, nas direções A (2,60 cm) e B (1,60 cm), fixadas sobre uma estrutura de aço carbono com regulagem manual de altura em relação à fonte. A estrutura desse arranjo está representada na Figura 5.6.

Figura 5.6: Configuração do arranjo de irradiação do LCN.

Esse arranjo foi utilizado para variação da distância entre o detector e a fonte de $^{241}\text{AmBe}$. Desta forma, pode-se calibrar os monitores portáteis e dosímetros pessoais (ALVARENGA, 2014). As fotos destas estruturas podem ser vistas na Figura 5.7.

Figura 5.7: Estrutura do LCN, com o arranjo de irradiação e a localização da fonte de ²⁴¹AmBe (ALVARENGA, 2014).

5.5. Espectrômetro de Multiesferas de Bonner

O espectrômetro de Multiesferas de Bonner, modelo 42-5, utilizado para a realização do trabalho, foi fabricado pela Ludlum Measurements. Esse sistema é composto por um conjunto de esferas de polietileno de alta densidade com diâmetros que variam de 5,08 cm (2"), 7,62 cm (3"), 12,70 cm (5"), 20,32 cm (8"), 25,40 cm (10"), a 30,48 cm (12") (Figura 5.8), e por um detector cintilador de ⁶Li(Eu), que é constituído por um cristal com 4 mm x 4 mm, que é fixado ao guia de luz, acoplado a uma fotomultiplicadora envolta em uma estrutura de alumínio. A Figura 5.9 apresenta um diagrama esquemático do detector cintilador de ⁶Li(Eu).

Figura 5.8: Esferas de polietileno de alta densidade que compõem o Espectrômetro de Multiesferas de Bonner (EMB).

Figura 5.9: Diagrama esquemático do detector cintilador ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$ (LUDLUM, 2003).

A eletrônica conectada a esse detector é composta de um pré-amplificador Ortec 142 (Figura 5.10), e de um analisador multicanal Lynx (Figura 5.11), fabricado pela Canberra, que é operado por meio do programa Genie 2000 Spectroscopy System. Por meio deste programa é obtido o espectro de contagem do cintilador de ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$. A Figura 5.12 mostra um esquema da eletrônica responsável pela aquisição do espectro de contagem.

Figura 5.10: Pré-amplificador ORTEC 142 (ORTEC, 2002).

Figura 5.11: Analisador multicanal Lynx, Canberra (CANBERRA, 2008).

Figura 5.12: Esquema do sistema eletrônico utilizado para aquisição do espectro de contagem.

Para cada medição realizada utilizando as esferas com diferentes tamanhos, obteve-se um espectro de contagem diferente, onde é possível observar o pico relativo à interação dos nêutrons com o ^6Li . Com o intuito de obter o número de contagens referentes à interação dos nêutrons com o detector, fixou-se uma região de interesse nesse pico (ROI), onde somente essas contagens foram utilizadas no desdobramento do espectro. A Figura 5.13 apresenta o espectro de contagem do detector cintilador de $^6\text{Li}(\text{Eu})$, gerado pelo programa Genie 2000 Spectroscopy System.

Figura 5.13: Espectro de contagem do detector cintilador de $^6\text{Li}(\text{Eu})$, gerado pelo programa Genie 2000 Spectroscopy System.

5.6. Cones de sombra

Com o intuito de estimar a radiação de nêutrons espalhada por meio do Método do Cone de Sombra, foram utilizados três cones de sombra (Cone 1, Cone 2 e Cone 3), que possuem 50 cm de comprimento, sendo 20 cm de ferro e 30 cm de polietileno borado, com diferentes diâmetros frontais e finais, assim possibilitando variação no ângulo de abertura. A Tabela 5.3 apresenta as dimensões dos cones de sombra 1, 2 e 3, e seus ângulos de abertura. Os cones foram gentilmente emprestados pelo grupo de Dosimetria do Instituto de Física/USP. Os cones de sombra 1, 2 e 3 são apresentados na Figura 5.14.

Tabela 5.3: Dimensões dos cones de sombra 1, 2 e 3.

Cone	Diâmetro frontal (cm)	Diâmetro final (cm)	Ângulo de abertura (graus)
1	12,5	21,0	3,98
2	7,0	9,0	1,07
3	5,5	6,5	0,35

Figura 5.14: Cones de sombra 1, 2 e 3.

5.7. Programa NeuraLN

O desdobramento do espectro de nêutrons produzidos pela fonte de $^{241}\text{AmBe}$ em diferentes distâncias fonte-detector no laboratório LCN foi realizado por meio do programa NeuraLN, desenvolvido por Lemos (2009). Este programa utiliza as taxas de contagens para se obter os resultados de fluência de nêutrons, que são distribuídos em 84 intervalos de energia, e os de equivalente de dose ambiente, que são normalizados para o maior valor do espectro de referência obtido na norma ISO 8529-1 (ISO, 2001). O modelo utilizado para expressar as incertezas dos parâmetros calculados teve por base os procedimentos recomendados pelo Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), e calculadas por Lemos (2009). A Figura 5.15 mostra a tela principal do programa NeuraLN.

Figura 5.15: Tela principal do programa NeuraLN.

5.8. Estimativa de incertezas

A expressão da incerteza das medições é requisito fundamental para se obter credibilidade dos resultados adquiridos; assim, é necessária a elaboração de um modelo matemático para realizar a sua estimativa. As formas de avaliação das incertezas utilizadas na realização desse trabalho foram dos Tipos A e B; as incertezas combinadas e expandidas foram obtidas de acordo com as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003).

A incerteza do Tipo A é obtida por meio de uma análise estatística de uma série de medições, onde são obtidos a média aritmética e o desvio padrão; desta forma, a incerteza do Tipo A é o desvio-padrão da média destas medições. As Equações 5.1 e 5.2 apresentam as fórmulas para o cálculo da média aritmética e para o cálculo de desvio-padrão:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (5.1)$$

$$\delta_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (5.2)$$

onde X_i são os valores obtidos, e N é o número de medições, que foram realizadas para cada experimento.

A incerteza do Tipo B está relacionada aos erros sistemáticos, e não necessita de uma análise estatística, mas de outros parâmetros, tais como: a resolução dos instrumentos, a incerteza associada à fonte de radiação e as incertezas dos fatores de correção.

Na análise de alguns resultados experimentais foi necessário realizar a determinação da incerteza combinada, que é obtida por meio de outras grandezas, e também envolve as avaliações do Tipo A e B. A lei da propagação das incertezas pode ser observada na Equação 5.3:

$$\sigma_k = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial k}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2} \quad (5.3)$$

onde $\partial k / \partial x_i$ é a derivada parcial da função k em relação x_i e σ_{x_i} é a incerteza de x_i .

Os valores das incertezas finais deste trabalho foram obtidas por meio das incertezas expandidas, considerando-se as incertezas do Tipo A e B, e o fator de abrangência k igual a 2, o qual se refere ao nível de confiança de 95%.

5.9. Código de Monte Carlo (MCNP)

O código computacional Monte Carlo versão 5 (MCNP5) permite observar os nêutrons desde o seu surgimento, até seu desaparecimento, que pode ocorrer por absorção ou por escape do meio investigado, assim possibilitando estimar o espalhamento e a geração de fótons, decorrente da interação dos nêutrons com materiais do meio ou com o ar. Os nêutrons podem ser simulados em intervalos de energia entre 1×10^{-11} MeV e 20 MeV.

Nas simulações do LCN foi utilizado o código MCNP5, com o objetivo de desenvolver um estudo detalhado do espalhamento, que ocorre devido à interação dos nêutrons com o ar e com os componentes estruturais do laboratório tais como: o piso e o teto. Foram simuladas 2×10^{10} histórias, com o *tally F4*, com o propósito de se obter resultados com incertezas menores. No processo de elaboração da geometria, utilizou-se a planta baixa do laboratório, a fim de garantir que todas as dimensões utilizadas na simulação estivessem em concordância com as do laboratório.

Os materiais levados em consideração na composição do LCN foram feitos com base nos dados do relatório PNNL-15870 onde o concreto possui a densidade de $2,35 \text{ g/cm}^3$, granito $2,69 \text{ g/cm}^3$, portas de madeira $0,42 \text{ g/cm}^3$, porta de ferro $7,874 \text{ g/cm}^3$ e a porta de chumbo de $11,35 \text{ g/cm}^3$ (McCONN Jr. *et al.*, 2011). A fonte radioativa utilizada para a realização deste estudo foi de $^{241}\text{AmBe}$ (37 GBq), posicionada à altura de 120 cm do piso, que é a mesma altura utilizada nos procedimentos de calibração. O espectro desta fonte, utilizado na simulação, foi obtido por meio da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001).

Foram avaliadas 18 posições de especial interesse em duas direções perpendiculares em várias distâncias fonte-detector, que variam de 30 cm a 258 cm, na direção A, e de 60 cm a 140 cm, na direção B. Nestas posições foram inseridas esferas de ar com 1,0 cm de raio, preenchidas com o mesmo material que preenche a sala (ar atmosférico). A Figura 5.16 apresenta a localização das posições de interesse e a geometria da sala, utilizadas com o código MCNP5.

Figura 5.16: Geometria da instalação do LCN, utilizada nas simulações de Monte Carlo com o código MCNP5.

6. Resultados

Os resultados obtidos neste trabalho serão apresentados e discutidos neste capítulo.

6.1 Estabilidade em médio prazo da resposta do Espectrômetro de Multiesferas de Bonner

Esse estudo foi realizado utilizando o detector sem moderação e as esferas de 5,08 cm (2"), 7,62 cm (3"), 12,70 cm (5"), 20,32 cm (8"), 25,40 cm (10"), e 30,48 cm (12") de diâmetro, que compõem o Espectrômetro de Multiesferas de Bonner (EMB). Foram realizadas 10 medições de taxa de contagem a uma distância de 100 cm em relação à fonte, em intervalos de 300 s. Para cada conjunto de medições obtidas no caso de cada esfera, foi calculado um valor médio e a variação destes valores médios e seus desvios padrões das médias forneceram a reprodutibilidade das respostas obtidas no caso de cada esfera. As Figuras 6.1 a 6.7 mostram os resultados da reprodutibilidade da resposta das esferas que compõem o sistema EMB. A Tabela 6.1 apresenta os resultados obtidos para este teste utilizando todas as esferas do sistema EMB.

Figura 6.1: Reprodutibilidade da resposta do sistema EMB utilizando o detector sem a esfera de moderação.

Figura 6.2: Reprodutibilidade da resposta do sistema EMB utilizando a esfera de 5,08 cm (2").

Figura 6.3: Reprodutibilidade da resposta do sistema EMB utilizando a esfera de 7,62 cm (3").

Figura 6.4: Reprodutibilidade da resposta do sistema EMB utilizando a esfera de 12,70 cm (5").

Figura 6.5: Reprodutibilidade da resposta do sistema EMB utilizando a esfera de 20,32 cm (8").

Figura 6.6: Reprodutibilidade da resposta do sistema EMB utilizando a esfera de 25,40 cm (10").

Figura 6.7: Reprodutibilidade da resposta do sistema EMB utilizando a esfera de 30,48 cm (12").

Tabela 6.1: Teste de reprodutibilidade da resposta do sistema EMB, utilizando as diferentes esferas.

Diâmetro da esfera (cm)	Desvio padrão percentual (%)
Detector sem moderação	1,63
5,08 (2")	0,91
7,62 (3")	0,31
12,70 (5")	1,03
20,32 (8")	0,99
25,40 (10")	1,11
30,48 (12")	1,44

Pode-se verificar que a variação máxima obtida para o teste de reprodutibilidade de resposta do sistema EMB utilizando as diferentes esferas foi de 1,63% para o caso do detector sem moderação.

6.2 Cálculo da taxa de fluência e da taxa de equivalente de dose de nêutrons

A partir da taxa de emissão de nêutrons (descrita no certificado de calibração), é possível obter-se a taxa de fluência e a taxa de equivalente de dose ambiente de nêutrons às diferentes distâncias fonte-detector. Para determinar a taxa de fluência de nêutrons ($\dot{\Phi}$), expressa em $n/cm^2.s$ (NGOC LE et al., 2018), foi utilizada a Equação 6.1:

$$\dot{\Phi} = \frac{S}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \times F_1(\Theta) \times F_A(d) \quad (6.1)$$

onde S é a taxa de emissão da fonte de nêutrons (s^{-1}) e d é a distância fonte-detector (cm), $F_1(\Theta)$ é o fator de anisotropia da fonte e $F_A(d)$ é o fator de atenuação pelo ar (EISENHAUER et al., 1985). A Tabela 6.2 apresenta a taxa de fluência nos diferentes pontos de medição nas direções A e B do arranjo de irradiação do LCN.

Tabela 6.2: Taxas de fluência de nêutrons nos diferentes pontos de medição obtidas por meio de cálculo.

Distância fonte-detector (cm)	Taxa de fluência (n/cm².s)
Direção A	
30	225,0 ± 6,9
50	81,1 ± 2,5
70	41,5 ± 1,3
90	25,1 ± 0,8
100	20,4 ± 0,6
110	16,9 ± 0,5
130	12,1 ± 0,4
150	9,1 ± 0,3
170	7,1 ± 0,2
190	5,7 ± 0,2
220	4,3 ± 0,1
240	3,6 ± 0,1
258	3,1 ± 0,1
Direção B	
60	56,4 ± 1,7
80	31,8 ± 1,0
120	14,2 ± 0,4
140	10,4 ± 0,3

As Figuras 6.8 e 6.9 apresentam as taxas de fluência obtidas às diferentes distâncias fonte-detector, que variam de 30 cm a 258 cm, na direção A, e de 60 cm a 140 cm, na direção B.

Figura 6.8: Taxas de fluência obtidas por cálculo, às distâncias fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.

Figura 6.9: Taxas de fluência obtidas por cálculo, às distâncias fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.

Como esperado, por meio do ajuste das curvas da taxa de fluência em função da distância (d), obteve-se o coeficiente de determinação (R^2) igual 1,00 tanto na direção A como na direção B.

A taxa de equivalente de dose ambiente $\dot{H}^*(10)$ pode ser estimada, utilizando a Equação 6.2:

$$\dot{H}^*(10) = \dot{\Phi} \times h_{\Phi}^* \quad (6.2)$$

onde $\dot{\Phi}$ é a taxa de fluência de nêutrons ($n/cm^2.s$) e h_{Φ}^* é o coeficiente de conversão de fluência para equivalente de dose ambiente (pSv/cm^2), utilizado para a fonte de $^{241}\text{AmBe}$ e recomendada pela norma ISO 8529-2 (ISO, 2000). A Tabela 6.3 apresenta a taxa de equivalente de dose nos diferentes pontos de medição nas direções A e B.

Tabela 6.3: Taxas de equivalente de dose obtidas por cálculo nos diferentes pontos de medição.

Distância (cm)	Taxa de equivalente de dose $\dot{H}^*(10)$ ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
	Direção A
30	316,3 $\pm$ 9,8
50	114,2 $\pm$ 3,5
70	58,4 $\pm$ 1,8
90	35,4 $\pm$ 1,1
100	28,7 $\pm$ 0,9
110	23,7 $\pm$ 0,7
130	17,0 $\pm$ 0,5
150	12,8 $\pm$ 0,4
170	10,0 $\pm$ 0,3
190	8,0 $\pm$ 0,2
220	6,0 $\pm$ 0,2
240	5,0 $\pm$ 0,2
258	4,4 $\pm$ 0,1
Direção B	
60	79,4 $\pm$ 2,5
80	44,7 $\pm$ 1,4
120	20,0 $\pm$ 0,6
140	14,7 $\pm$ 0,5

As Figuras 6.10 e 6.11 apresentam as taxas de equivalente de dose obtidas por cálculo às diferentes distâncias fonte-detector, que variam de 30 cm a 258 cm, na direção A, e de 60 cm a 140 cm, na direção B.

Figura 6.10: Taxas de equivalente de dose obtidas por cálculo, às distâncias fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.

Figura 6.11: Taxas de equivalente de dose obtidas por cálculo, às distâncias fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.

Por meio do ajuste da taxa de equivalente de dose em função da distância (d), obteve-se o coeficiente de determinação (R^2) igual 1,00, nas direções A e B.

6.3 Medição da radiação de fundo

Foram realizadas medições da radiação de fundo (*background*), com o intuito de mensurar os níveis de radiação de nêutrons no laboratório quando a fonte está recolhida na blindagem, e para realizar depois a correção das medições no processo de caracterização do campo. As medições foram realizadas em um período de 3 h, utilizando o sistema EMB posicionado no centro do laboratório. A Tabela 6.4 apresenta as taxas de contagem obtidas na medição da radiação de fundo e suas respectivas incertezas padrões propagadas.

Tabela 6.4: Taxas de contagem da radiação de fundo obtidas utilizando o sistema EMB.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem da radiação de fundo (cps)
Detector sem moderação	0,0471 ± 0,0009
5,08 (2")	0,0655 ± 0,0011
7,62 (3")	0,0752 ± 0,0012
12,70 (5")	0,0984 ± 0,0013
20,32 (8")	0,0490 ± 0,0008
25,40 (10")	0,0258 ± 0,0007
30,48 (12")	0,0144 ± 0,0005

Observando os resultados da Tabela 6.4, constatou-se que a esfera de 12,70 cm (5") apresentou a maior taxa de contagem na medição da radiação de fundo.

6.4 Medição da taxa de contagem em diferentes distâncias fonte-detector

Foram realizadas medições em um período de três horas utilizando o sistema EMB, com o objetivo de obter as taxas de contagem líquida (obtidas por meio da subtração da taxa de contagem total pelos dados da medição da radiação de fundo) no caso de cada esfera, às distâncias fonte-detector de

30 cm a 258 cm, na direção A. As taxas de contagem líquida obtidas em diferentes distâncias na direção A são apresentadas nas Tabelas 6.5 a 6.17, para todas as esferas. Esses valores são usados como dados de entrada no programa de desdobramento do espectro NeuraLN.

Tabela 6.5: Taxas de contagem líquida obtidas a 30 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	0,369 ± 0,006
5,08 (2")	1,007 ± 0,010
7,62 (3")	2,136 ± 0,016
12,70 (5")	9,683 ± 0,030
20,32 (8")	13,671 ± 0,036
25,40 (10")	11,660 ± 0,033
30,48(12")	9,531 ± 0,030

Tabela 6.6: Taxas de contagem líquida obtidas a 50 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	0,296 ± 0,006
5,08 (2")	0,710 ± 0,008
7,62 (3")	1,189 ± 0,013
12,70 (5")	4,569 ± 0,021
20,32 (8")	6,012 ± 0,024
25,40 (10")	5,244 ± 0,022
30,48(12")	4,382 ± 0,020

Tabela 6.7: Taxas de contagem líquida obtidas a 70 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	$0,243 \pm 0,005$
5,08 (2")	$0,586 \pm 0,008$
7,62 (3")	$0,625 \pm 0,011$
12,70 (5")	$2,991 \pm 0,017$
20,32 (8")	$3,731 \pm 0,019$
25,40 (10")	$3,258 \pm 0,017$
30,48 (12")	$2,630 \pm 0,016$

Tabela 6.8: Taxas de contagem líquida obtidas a 90 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	$0,241 \pm 0,005$
5,08 (2")	$0,541 \pm 0,007$
7,62 (3")	$0,430 \pm 0,006$
12,70 (5")	$2,319 \pm 0,015$
20,32 (8")	$2,454 \pm 0,015$
25,40 (10")	$2,168 \pm 0,014$
30,48 (12")	$1,931 \pm 0,013$

Tabela 6.9: Taxas de contagem líquida obtidas a 100 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	$0,236 \pm 0,005$
5,08 (2")	$0,521 \pm 0,007$
7,62 (3")	$0,399 \pm 0,006$
12,70 (5")	$2,010 \pm 0,014$
20,32 (8")	$2,200 \pm 0,013$
25,40 (10")	$1,968 \pm 0,013$
30,48 (12")	$1,765 \pm 0,013$

Tabela 6.10: Taxas de contagem líquida obtidas a 110 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	0,261 ± 0,005
5,08 (2")	0,517 ± 0,007
7,62 (3")	0,354 ± 0,006
12,70 (5")	1,817 ± 0,013
20,32 (8")	1,889 ± 0,013
25,40 (10")	1,812 ± 0,013
30,48 (12")	1,474 ± 0,012

Tabela 6.11: Taxas de contagem líquida obtidas a 130 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	0,264 ± 0,005
5,08 (2")	0,494 ± 0,007
7,62 (3")	0,270 ± 0,005
12,70 (5")	1,669 ± 0,012
20,32 (8")	1,773 ± 0,013
25,40 (10")	1,500 ± 0,012
30,48 (12")	1,131 ± 0,010

Tabela 6.12: Taxas de contagem líquida obtidas a 150 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	0,233 ± 0,005
5,08 (2")	0,484 ± 0,007
7,62 (3")	0,207 ± 0,004
12,70 (5")	1,488 ± 0,012
20,32 (8")	1,496 ± 0,012
25,40 (10")	1,196 ± 0,011
30,48 (12")	0,922 ± 0,009

Tabela 6.13: Taxas de contagem líquida obtidas a 170 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	0,238 ± 0,005
5,08 (2")	0,477 ± 0,007
7,62 (3")	0,169 ± 0,004
12,70 (5")	1,356 ± 0,011
20,32 (8")	1,331 ± 0,011
25,40 (10")	0,946 ± 0,009
30,48 (12")	0,734 ± 0,008

Tabela 6.14: Taxas de contagem líquida obtidas a 190 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	0,234 ± 0,005
5,08 (2")	0,467 ± 0,007
7,62 (3")	0,144 ± 0,004
12,70 (5")	1,179 ± 0,010
20,32 (8")	1,241 ± 0,011
25,40 (10")	0,803 ± 0,009
30,48 (12")	0,687 ± 0,008

Tabela 6.15: Taxas de contagem líquida obtidas a 220 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	0,190 ± 0,004
5,08 (2")	0,422 ± 0,006
7,62 (3")	0,121 ± 0,003
12,70 (5")	0,869 ± 0,009
20,32 (8")	0,957 ± 0,009
25,40 (10")	0,648 ± 0,008
30,48 (12")	0,512 ± 0,007

Tabela 6.16: Taxas de contagem líquida obtidas a 240 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	0,212 ± 0,004
5,08 (2")	0,413 ± 0,006
7,62 (3")	0,076 ± 0,003
12,70 (5")	0,812 ± 0,009
20,32 (8")	0,908 ± 0,009
25,40 (10")	0,622 ± 0,008
30,48 (12")	0,441 ± 0,006

Tabela 6.17: Taxas de contagem líquida obtidas a 258 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	0,248 ± 0,005
5,08 (2")	0,391 ± 0,006
7,62 (3")	0,048 ± 0,002
12,70 (5")	0,731 ± 0,008
20,32 (8")	0,763 ± 0,009
25,40 (10")	0,547 ± 0,007
30,48 (12")	0,424 ± 0,006

As Tabelas 6.18 a 6.21 apresentam as taxas de contagem líquidas obtidas às distâncias fonte-detector de 60 cm, 80 cm, 120 cm e 140 cm, na direção B.

Tabela 6.18: Taxas de contagem líquida obtidas a 60 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção B.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	$0,241 \pm 0,005$
5,08 (2")	$0,575 \pm 0,007$
7,62 (3")	$1,562 \pm 0,012$
12,70 (5")	$4,187 \pm 0,020$
20,32 (8")	$5,437 \pm 0,022$
25,40 (10")	$5,072 \pm 0,022$
30,48 (12")	$4,223 \pm 0,020$

Tabela 6.19: Taxas de contagem líquida obtidas a 80 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção B.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	$0,261 \pm 0,005$
5,08 (2")	$0,228 \pm 0,005$
7,62 (3")	$1,286 \pm 0,011$
12,70 (5")	$3,108 \pm 0,017$
20,32 (8")	$3,824 \pm 0,019$
25,40 (10")	$3,276 \pm 0,017$
30,48 (12")	$2,689 \pm 0,016$

Tabela 6.20: Taxas de contagem líquida obtidas a 120 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção B.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	$0,224 \pm 0,005$
5,08 (2")	$0,486 \pm 0,007$
7,62 (3")	$0,943 \pm 0,010$
12,70 (5")	$1,833 \pm 0,013$
20,32 (8")	$2,093 \pm 0,014$
25,40 (10")	$1,789 \pm 0,013$
30,48 (12")	$1,382 \pm 0,011$

Tabela 6.21: Taxas de contagem líquida obtidas a 140 cm de distância em relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$, direção B.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem líquida (cps)
Detector sem moderação	0,216 ± 0,005
5,08 (2")	0,433 ± 0,007
7,62 (3")	0,824 ± 0,009
12,70 (5")	1,539 ± 0,012
20,32 (8")	1,627 ± 0,012
25,40 (10")	1,332 ± 0,011
30,48 (12")	1,031 ± 0,010

As Figuras 6.12 a 6.18 apresentam o comportamento das taxas de contagem líquida obtidas pelo detector sem moderação e pelas esferas de 5,08 cm (2"), 7,62 cm (3"), 12,70 cm (5"), 20,32 cm (8"), 25,40 cm (10"), e 30,48 cm (12") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.

Figura 6.12: Taxas de contagem líquida obtidas utilizando o detector sem moderação, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.

Figura 6.13: Taxas de contagem líquida obtidas utilizando a esfera de 5,08 cm (2"), variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.

Figura 6.14: Taxas de contagem líquida obtidas utilizando a esfera de 7,62 cm (3"), variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.

Figura 6.15: Taxas de contagem líquida obtidas utilizando a esfera de 12,70 cm (5"), variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.

Figura 6.16: Taxas de contagem líquida obtidas utilizando a esfera de 20,32 cm (8"), variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.

Figura 6.17: Taxas de contagem líquida obtidas utilizando a esfera de 25,40 cm (10"), variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.

Figura 6.18: Taxas de contagem líquida obtidas utilizando a esfera de 30,48 cm (12"), variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.

Analisando o comportamento das taxas de contagem líquida obtidas às distâncias de 30 cm a 258 cm na direção A, apresentadas nas Figuras 6.12 a 6.18, foi possível observar que as taxas de contagem líquida não obedecem à lei do inverso do quadrado da distância fonte-detector, devido ao feixe total ser composto de radiação direta e radiação espalhada.

As Figuras 6.19 a 6.25 apresentam o comportamento das taxas de contagem líquida obtidas pelo detector sem moderação e pelas esferas de 5,08 cm (2"), 7,62 cm (3"), 12,70 cm (5"), 20,32 cm (8"), 25,40 cm (10") e 30,48 cm (12") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.

Figura 6.19: Taxas de contagem líquida obtidas utilizando detector sem moderação, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.

Figura 6.20: Taxas de contagem líquida obtidas utilizando uma esfera de 5,08 cm (2"), variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.

Figura 6.21: Taxas de contagem líquida obtidas utilizando uma esfera de 7,62 cm (3"), variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.

Figura 6.22: Taxas de contagem líquida obtidas utilizando uma esfera de 12,70 cm (5"), variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.

Figura 6.23: Taxas de contagem líquida obtidas utilizando uma esfera de 20,30 cm (8"), variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.

Figura 6.24: Taxas de contagem líquida obtidas utilizando uma esfera de 25,40 cm (10"), variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.

Figura 6.25: Taxas de contagem líquida obtidas utilizando uma esfera de 30,48 cm (12"), variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.

As taxas de contagem líquida obtidas na direção B não seguem a lei do inverso do quadrado da distância fonte-detector, devido à interação dos nêutrons com as paredes, teto, piso e o ar, assim ocasionando mudanças significativas nas taxas de contagem.

O coeficiente de correlação (R^2) avalia o quanto o modelo obtido pelo ajuste consegue explicar os valores observados, sendo capaz de variar de 0 a 1, onde se observa que um ajuste bom apresenta um valor próximo de 1. A Tabela 6.22 apresenta os valores dos coeficientes de correlação (R^2) obtidos por meio do *software ORIGIN*, utilizando as taxas de contagem líquida às diferentes distâncias, de 30 cm a 258 cm na direção A e de 60 cm a 140 cm na direção B.

Tabela 6.22: Coeficientes de correlação obtidos por meio da taxa de contagem líquida às diferentes distâncias, nas direções A e B.

Diâmetro da esfera (cm)	Coeficiente de correlação (R^2)
Direção A	
Detector sem moderação	0,9407
5,08 (2")	0,9412
7,62 (3")	0,9741
12,70 (5")	0,9851
20,32 (8")	0,9792
25,40 (10")	0,9981
30,48 (12")	0,9983
Direção B	
Detector sem moderação	0,9626
5,08 (2")	0,9870
7,62 (3")	0,9976
12,70 (5")	0,9979
20,32 (8")	0,9977
25,40 (10")	0,9984
30,48 (12")	0,9992

Na Tabela 6.22, são apresentados os valores de R^2 obtidos às distâncias de 30 cm a 258 cm na direção A e de 60 cm a 140 cm na direção B, onde foi possível observar que as taxas de contagem líquida não obedecem à lei do inverso do

quadrado da distância fonte-detector, devido ao feixe total ser composto de radiação direta e radiação espalhada. Os valores de R^2 para o detector sem moderação apresentaram os piores resultados, devido à baixa sensibilidade do detector para nêutrons intermediários e rápidos. A partir das esferas de 7,62 cm de diâmetro na direção A e de 5,08 cm na direção B, pode-se notar uma melhora no ajuste e, portanto, nos valores de R^2 .

6.5 Fatores de atenuação do ar

Na Tabela 6.23 são apresentados os fatores de atenuação do ar [$F_A(d)$], para uma fonte de $^{241}\text{AmBe}$, obtidos às distâncias fonte-detector de 30 cm a 258 cm na direção A, e de 60 cm a 140 cm na direção B. Esses fatores foram obtidos por meio da Equação 4.8.

Tabela 6.23: Fatores de atenuação pelo ar nas diferentes distâncias.

Distância fonte-detector (cm)	Fator de atenuação do ar $F_A(d)$
Direção A	
30	1,002673 $\pm$ 0,000002
50	1,004459 $\pm$ 0,000002
70	1,006249 $\pm$ 0,000002
90	1,008042 $\pm$ 0,000002
100	1,008939 $\pm$ 0,000002
110	1,0098380 $\pm$ 0,000002
130	1,011637 $\pm$ 0,000002
150	1,013439 $\pm$ 0,000002
170	1,015245 $\pm$ 0,000002
190	1,017053 $\pm$ 0,000002
220	1,019772 $\pm$ 0,000002
240	1,021589 $\pm$ 0,000002
258	1,023227 $\pm$ 0,000002
Direção B	
60	1,005354 $\pm$ 0,000002
80	1,007145 $\pm$ 0,000002
120	1,010737 $\pm$ 0,000002
140	1,012537 $\pm$ 0,000002

Pode-se concluir que os valores dos fatores de correção para atenuação pelo ar são crescentes à medida que a distância fonte-detector aumenta; assim, os maiores valores obtidos foram às distâncias fonte-detector de 258 cm na direção A e de 140 cm na direção B.

6.6 Determinação do espectro de nêutrons em várias distâncias no LCN.

Neste estudo foram avaliados os espectros, a energia, a taxa de fluência, a taxa de equivalente de dose ambiente [$\dot{H}^*(10)$] e o coeficiente de conversão de fluência em dose [$h_\phi^*(10)$] em diferentes posições do LCN, utilizando o feixe total (direto + espalhado). Esses parâmetros foram obtidos por meio do desdobramento realizado pelo programa NeuraLN, a partir das taxas de contagem líquidas de nêutrons obtidas no caso de cada esfera às diferentes distâncias fonte-detector, nas direções A e B, apresentadas nas Tabelas 6.4 a 6.20.

As Figuras 6.26 a 6.39 apresentam os espectros do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$, obtidos às diferentes distâncias fonte-detector na direção A, em comparação com o espectro de referência ISO 8529-1 (ISO, 2001), e com os espectros simulados, obtidos nos treze pontos de interesse na direção A, levando em consideração os componentes estruturais do laboratório. Os resultados são representados utilizando a intensidade da fonte ($BE=dB/dE$), onde dB é o número de nêutrons emitidos pela fonte em um intervalo de tempo e dE é um determinado intervalo de energia, em função da energia dos nêutrons.

Figura 6.26: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 30 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).

Figura 6.27: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 50 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).

Figura 6.28: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 70 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).

Figura 6.29: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 90 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).

Figura 6.30: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 100 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001), com o espectro total simulado (MCNP5) e com o espectro total obtido no LNMRI/IRD.

Figura 6.31: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 110 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).

Figura 6.32: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 130 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).

Figura 6.33: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 150 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).

Figura 6.34: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 170 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).

Figura 6.35: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 190 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).

Figura 6.36: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 220 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).

Figura 6.37: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 240 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).

Figura 6.38: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 258 cm na direção A, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).

A partir dos espectros experimentais obtidos às distâncias de 30 cm a 258 cm na direção A, apresentados nas Figuras 6.26 a 6.38, foi possível observar que os espectros totais e simulados, que possuem grande semelhança, sofreram algumas mudanças significativas quando comparados com o espectro de referência. Observou-se que à medida que se aumenta a distância fonte-detector, aumenta o espalhamento causado pela interação dos nêutrons com o piso, o teto e as paredes do laboratório.

Nos espectros simulados e nos experimentais, foi possível observar o surgimento de picos entre as energias de 10^{-8} MeV a 10^{-4} MeV nos espectros apresentados nas Figuras 6.36 a 6.38, o que ocorre em consequência do grande espalhamento causado devido à proximidade destes pontos de medição da parede, que chega a ser de 30 cm; tal comportamento também foi observado por Khabaz (2015).

Na Figura 6.30, é possível observar que o espectro obtido no LCN possui uma diferença perceptível em relação ao espectro obtido no LMNRI/IRD, isso ocorre devido às dimensões dos laboratórios serem diferentes do IPEN, pois o

LMNRI/IRD possui dimensões de 7 m x 18 m por 6 m de altura, o que diminui drasticamente os nêutrons espalhados, assim resultando em uma pequena quantidade de nêutrons térmicos e epitérmicos.

As Figuras 6.39 a 6.42 apresentam os espectros do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$, obtidos às diferentes distâncias fonte-detector, na direção B, em comparação com o espectro de referência ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado.

Figura 6.39: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 60 cm na direção B, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).

Figura 6.40: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 80 cm na direção B, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).

Figura 6.41: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 120 cm na direção B, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).

Figura 6.42: Espectro do feixe total (direto + espalhado) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 140 cm na direção B, em comparação com o feixe de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro total simulado (MCNP5).

Observando os espectros experimentais obtidos às distâncias de 60 cm a 140 cm na direção B, que são apresentados nas Figuras 6.39 a 6.42, constatou-se que os espectros totais e simulados, que possuem grande similaridade, sofreram alterações quando comparados com o espectro de referência; à medida que se aumenta a distância fonte-detector, aumenta o espalhamento causado pela interação dos nêutrons com o piso, o teto, as paredes e a porta do laboratório.

Verificou-se o surgimento de picos entre as energias de 10^{-8} MeV a 10^{-2} MeV nos espectros apresentados nas Figuras 6.40 a 6.42, o que ocorre em virtude do grande espalhamento causado devido à proximidade destes pontos à parede e à porta, que chega a ser de 40 cm.

A Tabela 6.24 apresenta os valores obtidos para energia média, taxa de fluência, $\dot{H}^*(10)$, e $h_{\phi}^*(10)$ calculados pelo programa de desdobramento às diferentes distâncias nas direções A e B no LCN, utilizando as taxas de contagem líquida relativas ao feixe total (direto + espalhado).

Tabela 6.24: Valores obtidos por meio do desdobramento realizado pelo programa NeuraLN às diferentes distâncias nas direções A e B no LCN, utilizando as taxas de contagem relativas ao feixe total (direto + espalhado).

Distância fonte-detector (cm)	Energia média (MeV)	Taxa de fluência (n/cm ² .s)	$\dot{H}^*(10)$ ($\mu\text{Sv/h}$)	$h_{\phi}^*(10)$ (pSv/cm ²)
Direção A				
30	4,23 ± 0,21	261,6 ± 13,1	381,4 ± 19,1	405 ± 20
50	4,27 ± 0,21	121,3 ± 6,1	176,8 ± 8,8	405 ± 20
70	4,20 ± 0,21	75,8 ± 3,8	110,5 ± 5,5	405 ± 20
90	4,10 ± 0,21	54,0 ± 2,7	78,7 ± 3,9	405 ± 20
100	3,89 ± 0,19	48,6 ± 2,4	70,8 ± 3,5	405 ± 20
110	3,90 ± 0,21	43,2 ± 2,2	62,9 ± 3,1	405 ± 20
130	4,19 ± 0,21	37,5 ± 1,9	54,7 ± 2,7	405 ± 20
150	4,17 ± 0,21	31,8 ± 1,6	46,3 ± 2,3	405 ± 20
170	4,13 ± 0,21	28,0 ± 1,4	40,0 ± 2,0	405 ± 20
190	4,03 ± 0,21	24,8 ± 1,2	36,2 ± 1,8	405 ± 20
220	3,80 ± 0,19	19,4 ± 1,0	28,2 ± 1,4	405 ± 20
240	3,68 ± 0,18	18,0 ± 0,9	26,2 ± 1,3	405 ± 20
258	3,60 ± 0,21	15,9 ± 0,8	23,2 ± 1,2	405 ± 20
Direção B				
60	4,14 ± 0,21	115,5 ± 5,8	168,4 ± 8,4	405 ± 20
80	4,10 ± 0,21	79,1 ± 4,0	115,2 ± 5,8	405 ± 20
120	2,90 ± 0,15	46,8 ± 2,3	68,2 ± 3,4	405 ± 20
140	2,75 ± 0,14	37,4 ± 1,9	54,3 ± 2,7	405 ± 20

Verificou-se que os valores de taxa de fluência possuem uma diferença percentual máxima quando comparados ao valor teórico apresentado na Tabela 6.2 de 80,2% na direção A, a uma distância fonte-detector de 258 cm, e na direção B é de 72,1% para a distância fonte-detector de 140 cm. No caso de

$\dot{H}^*(10)$, possuem uma diferença de 81,2% na direção A para a distância fonte-detector de 258 cm e de 73,0% na direção B para a distância de 140 cm.

A diferença entre os valores de $h_{\phi}^*(10)$ é de apenas 3,5%, na direção A para a distância fonte-detector 258 cm, e de apenas 3,5% na direção B para a distância fonte-detector de 140 cm, quando comparados com os valores de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) descritos na Tabela 5.2; para a energia média foi de 12% para a distância de 220 cm na direção A e de 34% para a distância fonte-detector de 140 cm na direção B, quando comparados com os valores de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) descritos na Tabela 5.2.

A discrepância nos valores de taxa de fluência, energia média, $\dot{H}^*(10)$ e $h_{\phi}^*(10)$, quando comparados com os valores calculados, ocorre devido à interação da radiação de nêutrons com o ar, o piso, o teto, as paredes e ainda com o arranjo de irradiação. Também foi verificado que, à medida que se aumenta a distância fonte-detector, ocorre o aumento do espalhamento (Atanackovic *et al*, 2015).

Com o objetivo de validar o desdobramento, realizou-se a comparação com os resultados obtidos pelos monitores de nêutrons calibrados recentemente no LNMRI. Para isto, foram utilizados três monitores: Dineutron (133), Thermo ASP-2 (02514) e Thermo ASP-2 (02517).

Cada monitor foi posicionado às distâncias fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, e de 60 cm a 140 cm, na direção B, onde foram realizadas 10 medições utilizando cada monitor e determinando o desvio padrão de cada medição, ou seja, a incerteza do tipo A. A Tabela 6.25 apresenta os resultados de $\dot{H}^*(10)$ obtidos nas medições utilizando os monitores de nêutrons calibrados às diferentes distâncias fonte-detector, nas direções A e B, no LCN.

Tabela 6.25: Resultados de $\dot{H}^*(10)$ obtidos por meio das medições utilizando monitores de nêutrons calibrados às diferentes distâncias fonte-detector nas direções A e B no LCN.

Distância fonte-detector (cm)	Monitor	Monitor	Monitor
	Dineutron	Thermo ASP-2	Thermo ASP-2
	133 $\dot{H}^*(10)$ ($\mu\text{Sv/h}$)	02514 $\dot{H}^*(10)$ ($\mu\text{Sv/h}$)	02517 $\dot{H}^*(10)$ ($\mu\text{Sv/h}$)
Direção A			
30	363,6 $\pm$ 2,4	360,4 $\pm$ 4,5	362,2 $\pm$ 1,6
50	166,0 $\pm$ 3,8	162,9 $\pm$ 4,1	165,1 $\pm$ 2,3
70	98,6 $\pm$ 3,0	100,2 $\pm$ 4,0	102,4 $\pm$ 2,5
90	65,5 $\pm$ 2,2	68,8 $\pm$ 4,6	72,1 $\pm$ 3,5
100	59,4 $\pm$ 3,0	58,3 $\pm$ 5,2	60,8 $\pm$ 3,9
110	49,1 $\pm$ 3,7	51,6 $\pm$ 5,4	52,5 $\pm$ 3,1
130	41,5 $\pm$ 3,5	45,7 $\pm$ 3,9	47,0 $\pm$ 2,6
150	34,7 $\pm$ 3,4	46,3 $\pm$ 3,2	39,1 $\pm$ 4,1
170	29,3 $\pm$ 3,1	33,0 $\pm$ 2,7	33,7 $\pm$ 2,5
190	26,3 $\pm$ 2,1	30,1 $\pm$ 2,8	29,5 $\pm$ 3,1
220	20,2 $\pm$ 2,3	22,8 $\pm$ 2,7	22,8 $\pm$ 1,9
240	18,5 $\pm$ 4,2	21,2 $\pm$ 1,5	21,0 $\pm$ 1,8
258	16,2 $\pm$ 3,6	18,5 $\pm$ 1,6	18,6 $\pm$ 1,2
Direção B			
60	151,2 $\pm$ 2,4	153,4 $\pm$ 3,1	154,9 $\pm$ 2,6
80	96,9 $\pm$ 2,5	101,5 $\pm$ 3,5	103,1 $\pm$ 2,4
120	50,4 $\pm$ 2,8	56,1 $\pm$ 1,7	55,2 $\pm$ 1,6
140	37,1 $\pm$ 2,1	43,6 $\pm$ 2,8	43,9 $\pm$ 2,3

De acordo com a Tabela 6.25, pode-se concluir que os valores de $\dot{H}^*(10)$, obtidos por meio dos monitores portáteis de nêutrons, apresentam uma diferença percentual máxima quando comparados aos valores apresentados na Tabela 6.24 de 20,3% utilizando o monitor Thermo ASP-2 (02514) na direção A para a

distância fonte-detector de 258 cm, e na direção B é de 19,7% para a distância fonte-detector de 140 cm. O monitor Thermo ASP-2 (02517) apresentou uma diferença de 19,8% na direção A para a distância fonte-detector de 258 cm, e de 19, 2% na direção B para a distância de 140 cm. Assim, pode-se observar que os monitores apresentam resultados dentro dos limites recomendados de 20% (IAEA, 2000).

O monitor Dineutron (133) apresentou uma diferença percentual de 30,2% na direção A, para a distância fonte-detector de 258 cm, e de 31,7% na direção B, para a distância de 140 cm. Portanto, os resultados obtidos estão fora do limite recomendado pela norma de 20% (IAEA, 2000). Segundo Thomas and Taylor (1997), essa discrepância ocorre devido à baixa sensibilidade que o monitor tem quando é utilizado em campos de nêutrons com muito espalhamento ou com baixa energia. Assim, devido à proximidade desses pontos de medição em relação à parede, observou-se que ocorre aumento do espalhamento devido à interação dos nêutrons.

6.7 Determinação da radiação espalhada

Com o intuito de determinar a influência da radiação espalhada nos pontos de calibração do LCN, foram utilizados dois métodos recomendados pela norma ISO 8529-2: o Método de Ajuste Reduzido e o Método do Cone de Sombra (ISO, 2000).

6.7.1 Método de Ajuste Reduzido

O Método de Ajuste Reduzido avalia a contribuição da radiação de nêutrons espalhada variando as distâncias fonte-detector. Com o intuito de obter a taxa de contagem direta [$M_D(d)$], ou seja, sem espalhamento, em cada ponto de medição, foram utilizadas as taxas de contagem total em cada distância, apresentadas nas Tabelas de 6.4 a 6.20, que foram ajustadas em função da distância utilizando a Equação 4.11 por meio do Método dos Mínimos Quadrados. Esse ajuste, obtido por meio do *software Origin*, forneceu a constante característica fonte-detector (k) e suas respectivas incertezas.

A norma ISO 8529-2 (ISO, 2000) recomenda a utilização da constante característica fonte-detector (k) para corrigir todos os efeitos do espalhamento por meio da Equação 6.3:

$$k = M_D(d) \times d^2 \quad 6.3$$

onde $M_D(d)$ é a taxa de contagem direta corrigida para todos os efeitos de espalhamento à distância fonte-detector d.

A Tabela 6.26 apresenta os valores da constante característica fonte-detector (k), obtidos pelo detector sem moderação e com as esferas de 5,08 cm (2"), 7,62 cm (3"), 12,70 cm (5"), 20,32 cm (8"), 25,40 cm (10"), e 30,48 cm (12") de diâmetro às diferentes distâncias.

Tabela 6.26: Valores da constante característica da fonte (k).

Diâmetro da esfera (cm)	Constante característica da fonte (k)
Detector sem moderação	114,9 ± 21,8
5,08 (2")	429,4 ± 18,7
7,62 (3")	1638,4 ± 81,1
12,70 (5")	7283,0 ± 128,1
20,32 (8")	11093,9 ± 368,9
25,40 (10")	8972,7 ± 336,1
30,48 (12")	7434,5 ± 232,3

A taxa de contagem referente ao feixe direto [$M_D(d)$] em uma determinada distância (d) pode ser obtida por meio da divisão da constante característica da fonte (k) pela distância (d) ao quadrado, como mostrado na Equação 6.3. As Tabelas 6.27 a 6.39 apresentam as taxas de contagem relativas ao feixe direto [$M_D(d)$] e as taxas de contagem da radiação espalhada (obtida por meio da subtração da taxa de contagem líquida pela taxa de contagem direta), adquiridas utilizando o detector sem moderação e com as esferas de 5,08 cm (2"), 7,62 cm (3"), 12,70 cm (5"), 20,32 cm (8"), 25,40 cm (10"), e 30,48 cm (12") de diâmetro, às distâncias fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A. Esses valores serão utilizados para realizar o desdobramento do espectro por meio do programa NeuraLN.

Tabela 6.27: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 30 cm, na direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,128 ± 0,024	0,243 ± 0,005
5,08 (2")	0,477 ± 0,021	0,533 ± 0,007
7,62 (3")	1,820 ± 0,091	0,321 ± 0,005
12,70 (5")	8,093 ± 0,015	1,616 ± 0,012
20,32 (8")	12,327 ± 0,418	1,381 ± 0,011
25,40 (10")	9,970 ± 0,379	1,721 ± 0,013
30,48(12")	8,261 ± 0,264	1,296 ± 0,011

Tabela 6.28: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 50 cm, na direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,046 ± 0,009	0,252 ± 0,005
5,08 (2")	0,172 ± 0,007	0,542 ± 0,007
7,62 (3")	0,655 ± 0,033	0,539 ± 0,007
12,70 (5")	2,913 ± 0,053	1,676 ± 0,012
20,32 (8")	4,438 ± 0,149	1,601 ± 0,012
25,40 (10")	3,589 ± 0,135	1,678 ± 0,012
30,48(12")	2,974 ± 0,094	1,428 ± 0,011

Tabela 6.29: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 70 cm, na direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,023 ± 0,004	0,221 ± 0,005
5,08 (2")	0,088 ± 0,004	0,502 ± 0,007
7,62 (3")	0,334 ± 0,017	0,294 ± 0,005
12,70 (5")	1,486 ± 0,026	1,523 ± 0,012
20,32 (8")	2,264 ± 0,076	1,490 ± 0,014
25,40 (10")	1,831 ± 0,069	1,447 ± 0,013
30,48(12")	1,517 ± 0,048	1,129 ± 0,010

Tabela 6.30: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 90 cm, na direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,014 ± 0,003	0,229 ± 0,005
5,08 (2")	0,053 ± 0,002	0,493 ± 0,007
7,62 (3")	0,202 ± 0,010	0,231 ± 0,005
12,70 (5")	0,899 ± 0,016	1,439 ± 0,012
20,32 (8")	1,370 ± 0,046	0,816 ± 0,009
25,40 (10")	1,108 ± 0,042	1,366 ± 0,011
30,48(12")	0,918 ± 0,029	1,029 ± 0,010

Tabela 6.31: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 100 cm, na direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,011 ± 0,002	0,226 ± 0,005
5,08 (2")	0,043 ± 0,002	0,479 ± 0,007
7,62 (3")	0,164 ± 0,008	0,239 ± 0,005
12,70 (5")	0,728 ± 0,013	1,300 ± 0,011
20,32 (8")	1,109 ± 0,037	0,876 ± 0,009
25,40 (10")	0,897 ± 0,034	1,322 ± 0,011
30,48(12")	0,743 ± 0,023	1,037 ± 0,010

Tabela 6.32: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 110 cm, na direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,009 ± 0,002	0,254 ± 0,005
5,08 (2")	0,035 ± 0,002	0,491 ± 0,007
7,62 (3")	0,135 ± 0,007	0,222 ± 0,005
12,70 (5")	0,602 ± 0,011	1,233 ± 0,011
20,32 (8")	0,917 ± 0,031	0,991 ± 0,010
25,40 (10")	0,742 ± 0,028	1,088 ± 0,010
30,48(12")	0,614 ± 0,019	0,874 ± 0,009

Tabela 6.33: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 130 cm, na direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,007 ± 0,001	0,261 ± 0,005
5,08 (2")	0,025 ± 0,001	0,491 ± 0,007
7,62 (3")	0,097 ± 0,005	0,176 ± 0,004
12,70 (5")	0,431 ± 0,008	1,257 ± 0,011
20,32 (8")	0,656 ± 0,022	1,137 ± 0,010
25,40 (10")	0,531 ± 0,020	0,987 ± 0,010
30,48 (12")	0,440 ± 0,014	0,704 ± 0,008

Tabela 6.34: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 150 cm, na direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,005 ± 0,001	0,231 ± 0,005
5,08 (2")	0,019 ± 0,001	0,471 ± 0,007
7,62 (3")	0,073 ± 0,004	0,137 ± 0,004
12,70 (5")	0,324 ± 0,006	1,185 ± 0,010
20,32 (8")	0,493 ± 0,016	1,023 ± 0,010
25,40 (10")	0,399 ± 0,015	0,813 ± 0,009
30,48 (12")	0,330 ± 0,010	0,604 ± 0,007

Tabela 6.35: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 170 cm, na direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,004 ± 0,001	0,237 ± 0,005
5,08 (2")	0,015 ± 0,001	0,469 ± 0,007
7,62 (3")	0,057 ± 0,003	0,115 ± 0,003
12,70 (5")	0,252 ± 0,004	1,125 ± 0,010
20,32 (8")	0,384 ± 0,013	0,967 ± 0,009
25,40 (10")	0,310 ± 0,012	0,650 ± 0,008
30,48 (12")	0,257 ± 0,008	0,488 ± 0,007

Tabela 6.36: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 190 cm, na direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,003 ± 0,001	0,235 ± 0,005
5,08 (2")	0,012 ± 0,001	0,464 ± 0,007
7,62 (3")	0,045 ± 0,002	0,101 ± 0,003
12,70 (5")	0,202 ± 0,004	1,061 ± 0,010
20,32 (8")	0,307 ± 0,010	0,892 ± 0,009
25,40 (10")	0,249 ± 0,009	0,568 ± 0,007
30,48 (12")	0,206 ± 0,006	0,492 ± 0,007

Tabela 6.37: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 220 cm, na direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,0024 ± 0,0004	0,192 ± 0,004
5,08 (2")	0,0089 ± 0,0004	0,421 ± 0,006
7,62 (3")	0,0339 ± 0,0017	0,089 ± 0,003
12,70 (5")	0,1505 ± 0,0027	0,826 ± 0,009
20,32 (8")	0,2298 ± 0,0076	0,656 ± 0,008
25,40 (10")	0,1854 ± 0,0069	0,475 ± 0,007
30,48 (12")	0,1536 ± 0,0048	0,368 ± 0,006

Tabela 6.38: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 240 cm, na direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,0020 ± 0,0004	0,215 ± 0,004
5,08 (2")	0,0075 ± 0,0003	0,414 ± 0,006
7,62 (3")	0,0284 ± 0,0014	0,049 ± 0,002
12,70 (5")	0,1264 ± 0,0022	0,802 ± 0,009
20,32 (8")	0,1926 ± 0,0064	0,637 ± 0,008
25,40 (10")	0,1558 ± 0,0058	0,480 ± 0,007
30,48 (12")	0,1291 ± 0,0048	0,322 ± 0,005

Tabela 6.39: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 258 cm, na direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,0017 ± 0,0003	0,252 ± 0,005
5,08 (2")	0,0065 ± 0,0003	0,393 ± 0,006
7,62 (3")	0,0246 ± 0,0012	0,025 ± 0,002
12,70 (5")	0,1094 ± 0,0019	0,671 ± 0,008
20,32 (8")	0,1667 ± 0,0055	0,581 ± 0,007
25,40 (10")	0,1348 ± 0,0051	0,425 ± 0,006
30,48 (12")	0,1117 ± 0,0035	0,322 ± 0,005

As Tabelas 6.40 a 6.43 apresentam as taxas de contagem relativas ao feixe direto [$M_D(d)$] e as taxas de contagem da radiação espalhada (obtida por meio da subtração da taxa de contagem líquida pela taxa de contagem direta), às distâncias fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.

Tabela 6.40: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 60 cm, na direção B.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,032 ± 0,024	0,221 ± 0,005
5,08 (2")	0,119 ± 0,005	0,559 ± 0,007
7,62 (3")	0,455 ± 0,023	0,428 ± 0,006
12,70 (5")	2,023 ± 0,036	1,181 ± 0,010
20,32 (8")	3,082 ± 0,103	1,962 ± 0,013
25,40 (10")	2,492 ± 0,094	2,509 ± 0,015
30,48 (12")	2,065 ± 0,065	1,828 ± 0,013

Tabela 6.41: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 80 cm, na direção B.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,018 ± 0,003	0,237 ± 0,005
5,08 (2")	0,067 ± 0,003	0,501 ± 0,007
7,62 (3")	0,256 ± 0,013	0,276 ± 0,005
12,70 (5")	1,138 ± 0,020	1,480 ± 0,012
20,32 (8")	1,733 ± 0,058	1,715 ± 0,013
25,40 (10")	1,402 ± 0,053	1,614 ± 0,012
30,48 (12")	1,162 ± 0,036	1,123 ± 0,010

Tabela 6.42: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 120 cm, na direção B.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,008 ± 0,002	0,245 ± 0,005
5,08 (2")	0,030 ± 0,001	0,480 ± 0,007
7,62 (3")	0,114 ± 0,006	0,200 ± 0,004
12,70 (5")	0,506 ± 0,009	1,246 ± 0,011
20,32 (8")	0,770 ± 0,026	1,050 ± 0,010
25,40 (10")	0,623 ± 0,023	1,093 ± 0,010
30,48 (12")	0,516 ± 0,016	0,881 ± 0,009

Tabela 6.43: Valores das taxas de contagem das radiações direta e espalhada à distância fonte-detector de 140 cm, na direção B.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem radiação direta (cps)	Taxa de contagem radiação espalhada (cps)
Detector sem moderação	0,006 ± 0,001	0,244 ± 0,005
5,08 (2")	0,022 ± 0,001	0,464 ± 0,007
7,62 (3")	0,084 ± 0,004	0,176 ± 0,004
12,70 (5")	0,372 ± 0,007	1,187 ± 0,010
20,32 (8")	0,566 ± 0,019	0,447 ± 0,006
25,40 (10")	0,458 ± 0,017	0,891 ± 0,009
30,48 (12")	0,379 ± 0,012	0,665 ± 0,008

As Figuras 6.43 a 6.49 apresentam o comportamento das taxas de contagem relativas ao feixe direto [$M_D(d)$] obtidas pelo detector sem moderação e pelas esferas de 5,08 cm (2"), 7,62 cm (3"), 12,70 cm (5"), 20,32 cm (8"), 25,40 cm (10"), e 30,48 cm (12") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.

Figura 6.43: Taxas de contagem direta [$M_D(d)$] obtidas utilizando o detector sem moderação, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.

Figura 6.44: Taxas de contagem direta $[M_D(d)]$ obtidas utilizando a esfera de 5,08 cm (2") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.

Figura 6.45: Taxas de contagem direta $[M_D(d)]$ obtidas utilizando a esfera de 7,62 cm (3") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.

Figura 6.46: Taxas de contagem direta $[M_D(d)]$ obtidas utilizando a esfera de 12,70 cm (5") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.

Figura 6.47: Taxas de contagem direta $[M_D(d)]$ obtidas utilizando a esfera de 20,32 cm (8") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.

Figura 6.48: Taxas de contagem direta $[M_D(d)]$ obtidas utilizando a esfera de 25,40 cm (10") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.

Figura 6.49: Taxas de contagem direta $[M_D(d)]$ obtidas utilizando a esfera de 30,48 cm (12") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 6.43 a 6.49, pode-se concluir que as taxas de contagem relativas ao feixe direto (sem espalhamento), obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido, obedecem à lei do inverso do quadrado da distância. Portanto, esse método possibilita discriminar a radiação direta da radiação espalhada com êxito.

As Figuras 6.50 a 6.56 apresentam a taxa de contagem relativa ao feixe direto $[M_D(d)]$ obtida pelo detector sem moderação e pelas esferas de 5,08 cm (2"), 7,62 cm (3"), 12,70 cm (5"), 20,32 cm (8"), 25,40 cm (10"), e 30,48 cm (12") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.

Figura 6.50: Taxas de contagem direta $[M_D(d)]$ obtidas utilizando o detector sem moderação, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.

Figura 6.51: Taxas de contagem direta [$M_D(d)$] obtidas utilizando a esfera de 5,08 cm (2") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.

Figura 6.52: Taxas de contagem direta [$M_D(d)$] obtidas utilizando a esfera de 7,62 cm (3") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B; obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.

Figura 6.53: Taxas de contagem direta $[M_D(d)]$ obtidas utilizando a esfera de 12,70 cm (5") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.

Figura 6.54 Taxas de contagem direta $[M_D(d)]$ obtidas utilizando a esfera de 20,32 cm (8") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.

Figura 6.55: Taxas de contagem direta [$M_D(d)$] obtidas utilizando a esfera de 25,40 cm (10") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.

Figura 6.56: Taxas de contagem direta [$M_D(d)$] obtidas utilizando a esfera de 30,48 cm (12") de diâmetro, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B, obtidas por meio do Método de Ajuste Reduzido.

As taxas de contagem direta (sem espalhamento) obtidos na direção B mostram que suas respostas seguem a lei do inverso do quadrado da distância, e por esse motivo, o Método de Ajuste Reduzido é considerado eficiente na discriminação da radiação espalhada.

A Tabela 6.44 apresenta os coeficientes de correlação (R^2) obtidos por meio do Método de Ajuste Reduzido, às diferentes distâncias fonte-detector nas direções A e B, relativas às taxas de contagem direta [$M_D(d)$].

Tabela 6.44: Coeficientes de correlação (R^2), obtidos por meio do Método de Ajuste Reduzido às diferentes distâncias, nas direções A e B.

Diâmetro da esfera (cm)	R^2
Direção A	
Detector sem moderação	0,9999
5,08 (2")	0,9999
7,62 (3")	0,9999
12,70 (5")	0,9999
20,32 (8")	0,9999
25,40 (10")	0,9999
30,48 (12")	0,9999
Direção B	
Detector sem moderação	0,9999
5,08 (2")	0,9999
7,62 (3")	0,9999
12,70 (5")	0,9999
20,32 (8")	0,9999
25,40 (10")	0,9999
30,48 (12")	0,9999

Pode-se concluir que os coeficientes de correlação (R^2) obtidos nas direções A e B, às diferentes distâncias fonte-detector, apresentaram uma forte correlação entre as taxas de contagem e as distâncias fonte-detector.

As Figuras 6.57 a 6.69 apresentam os espectros dos feixes direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$, adquiridos por meio do desdobramento realizado pelo programa NeuraLN, a partir das taxas de contagem das radiações direta e espalhada apresentadas nas Tabelas 6.25 a 6.37, obtidas no caso de cada esfera às diferentes distâncias fonte-detector na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com os espectros simulados, que foram obtidos no LCN desconsiderando a densidade dos componentes estruturais e sem o ar, ou seja, no vácuo.

Figura 6.57: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 30 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

Figura 6.58: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 50 cm, na direção A em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

Figura 6.59: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 70 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

Figura 6.60: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 90 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

Figura 6.61: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 100 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

Figura 6.62: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 110 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

Figura 6.63: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 130 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

Figura 6.64: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 150 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

Figura 6.65: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 170 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

Figura 6.66: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 190 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

Figura 6.67: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 220 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

Figura 6.68: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 240 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

Figura 6.69: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 258 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

As Figuras 6.70 a 6.73 apresentam os espectros dos feixes direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$, adquiridos por meio do desdobramento realizado pelo programa NeuraLN, a partir das taxas de contagem da radiação direta e da radiação espalhada apresentadas nas Tabelas 6.38 a 6.41, obtidas no caso de cada esfera às diferentes distâncias fonte-detector na direção B, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com os espectros simulados, que foram obtidos no LCN desconsiderando a densidade dos componentes estruturais e no vácuo.

Figura 6.70: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 60 cm, na direção B, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

Figura 6.71: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 80 cm, na direção B, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

Figura 6.72: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 120 cm, na direção B, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

Figura 6.73: Espectros do feixe direto e espalhado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 140 cm, na direção B, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto simulado (MCNP5).

A partir dos espectros obtidos por meio dos feixes diretos, quando comparados com o espectro de referência e com os espectros diretos simulados, às distâncias fonte-detector 30 cm a 258 cm na direção A e 60 cm a 140 cm na direção B, observou-se que os espectros dos feixes diretos apresentaram similaridade na forma com o espectro de referência e com os espectros diretos simulados, portanto, mostrando um bom resultado no processo de desdobramento dos espectros.

Os espectros adquiridos por meio do feixe espalhado apresentaram mudanças significativas nos pontos de medição localizados próximos das paredes, nas direções A e B. Tal comportamento ocorre devido à interação dos nêutrons com as paredes.

As Tabelas 6.45 e 6.46 apresentam os valores obtidos para energia, taxa de fluência $\dot{H}^*(10)$ e $h_{\phi}^*(10)$ em diferentes posições do LCN, utilizando os feixes direto e espalhado respectivamente. Esses parâmetros foram obtidos por meio do programa NeuraLN, a partir das taxas de contagem diretas adquiridas por meio do

Método de Ajuste Reduzido às diferentes distâncias fonte-detector nas direções A e B, apresentadas nas Tabelas 6.27 a 6.43.

Tabela 6.45: Resultados obtidos pelo programa NeuraLN para energia, taxa de fluência, $\dot{H}^*(10)$ e $h_{\phi}^*(10)$ em diferentes distâncias do LCN, utilizando as taxas de contagem do feixe direto.

Distância fonte-detector (cm)	Energia média (MeV)	Taxa de fluência (n/cm ² .s)	$\dot{H}^*(10)$ (μ Sv/h)	$h_{\phi}^*(10)$ (pSv/cm ²)
Direção A				
30	4,20 $\pm$ 0,21	224,7 $\pm$ 11,2	327,5 $\pm$ 16,4	405 $\pm$ 20
50	4,20 $\pm$ 0,21	80,9 $\pm$ 4,0	117,9 $\pm$ 5,6	405 $\pm$ 20
70	4,20 $\pm$ 0,21	41,3 $\pm$ 2,1	60,1 $\pm$ 3,0	405 $\pm$ 20
90	4,20 $\pm$ 0,21	25,0 $\pm$ 1,3	36,4 $\pm$ 1,8	405 $\pm$ 20
100	4,20 $\pm$ 0,21	20,2 $\pm$ 1,0	29,5 $\pm$ 1,5	405 $\pm$ 20
110	4,20 $\pm$ 0,21	16,7 $\pm$ 0,8	24,4 $\pm$ 1,2	405 $\pm$ 20
130	4,20 $\pm$ 0,21	12,0 $\pm$ 0,6	17,4 $\pm$ 0,9	405 $\pm$ 20
150	4,20 $\pm$ 0,21	9,0 $\pm$ 0,5	13,1 $\pm$ 0,7	405 $\pm$ 20
170	4,20 $\pm$ 0,21	7,0 $\pm$ 0,4	10,2 $\pm$ 0,5	405 $\pm$ 20
190	4,20 $\pm$ 0,21	5,6 $\pm$ 0,3	8,2 $\pm$ 0,4	405 $\pm$ 20
220	4,20 $\pm$ 0,21	4,2 $\pm$ 0,2	6,1 $\pm$ 0,3	405 $\pm$ 20
240	4,20 $\pm$ 0,21	3,5 $\pm$ 0,2	5,1 $\pm$ 0,3	405 $\pm$ 20
258	4,21 $\pm$ 0,21	3,0 $\pm$ 0,2	4,4 $\pm$ 0,2	404 $\pm$ 20
Direção B				
60	4,20 $\pm$ 0,21	56,2 $\pm$ 2,8	81,9 $\pm$ 4,1	405 $\pm$ 20
80	4,20 $\pm$ 0,21	31,7 $\pm$ 1,6	46,1 $\pm$ 2,3	405 $\pm$ 20
120	4,20 $\pm$ 0,21	14,0 $\pm$ 0,7	20,5 $\pm$ 1,0	405 $\pm$ 20
140	4,20 $\pm$ 0,21	10,3 $\pm$ 0,5	15,0 $\pm$ 0,8	405 $\pm$ 20

Os valores de taxa de fluência experimental apresentam uma diferença percentual máxima de 3,4% para distância fonte-detector de 258 cm na direção A e de 1,3% na direção B, para distância fonte-detector de 140 cm, quando comparada com os valores obtidos de forma teórica descritos na Tabela 6.2. Os

valores de $\dot{H}^*(10)$ apresentam uma diferença percentual máxima de 3,3% para a distância fonte-detector de 30 cm na direção A, e na direção B é de 2,1% para a distância fonte-detector de 140 cm, em relação ao valor calculado descrito na Tabela 6.3.

Os valores de energia média obtidos de forma experimental apresentam uma diferença percentual de 1,0% para a distância fonte-detector de 258 cm e de 4,1% para a distância fonte-detector de 140 cm; e os valores de $h_{\phi}^*(10)$ apresentam uma diferença percentual de 3,5% para a distância fonte-detector de 258 cm na direção A, e de 3,5% para a distância fonte-detector de 140 cm, em relação aos valores de referência descritos na Tabela 5.2.

Tabela 6.46: Resultados obtidos pelo programa NeuralN para energia, taxa de fluência, $\dot{H}^*(10)$ e $h_{\phi}^*(10)$ em diferentes distâncias do LCN, utilizando as taxas de contagem do feixe espalhado.

Distância fonte-detector (cm)	Energia média (MeV)	Taxa de fluência (n/cm ² .s)	$\dot{H}^*(10)$ (μ Sv/h)	$h_{\phi}^*(10)$ (pSv/cm ²)
Direção A				
30	3,63 $\pm$ 0,18	37,9 $\pm$ 1,9	49,1 $\pm$ 2,5	359 $\pm$ 18
50	3,61 $\pm$ 0,18	41,0 $\pm$ 2,1	53,9 $\pm$ 2,7	359 $\pm$ 18
70	3,60 $\pm$ 0,18	34,0 $\pm$ 1,7	53,0 $\pm$ 2,7	359 $\pm$ 18
90	3,53 $\pm$ 0,18	29,7 $\pm$ 1,5	38,4 $\pm$ 1,9	359 $\pm$ 18
100	3,59 $\pm$ 0,18	29,0 $\pm$ 1,5	37,5 $\pm$ 1,9	359 $\pm$ 18
110	3,67 $\pm$ 0,18	27,1 $\pm$ 1,4	35,0 $\pm$ 1,8	359 $\pm$ 18
130	3,65 $\pm$ 0,18	26,2 $\pm$ 1,3	34,0 $\pm$ 1,7	359 $\pm$ 18
150	3,68 $\pm$ 0,18	23,4 $\pm$ 1,2	30,3 $\pm$ 1,5	359 $\pm$ 18
170	3,73 $\pm$ 0,18	21,1 $\pm$ 1,1	27,3 $\pm$ 1,4	359 $\pm$ 18
190	3,60 $\pm$ 0,18	19,8 $\pm$ 1,0	25,6 $\pm$ 1,3	359 $\pm$ 18
220	3,59 $\pm$ 0,18	15,9 $\pm$ 0,8	20,3 $\pm$ 1,0	359 $\pm$ 18
240	3,78 $\pm$ 0,18	15,0 $\pm$ 0,8	19,3 $\pm$ 1,0	359 $\pm$ 18
258	3,68 $\pm$ 0,18	14,0 $\pm$ 0,7	17,3 $\pm$ 0,9	359 $\pm$ 18
Direção B				
60	3,69 $\pm$ 0,2	60,0 $\pm$ 3,0	83,0 $\pm$ 4,2	388 $\pm$ 19
80	3,99 $\pm$ 0,2	48,3 $\pm$ 2,4	67,4 $\pm$ 3,4	388 $\pm$ 19
120	3,67 $\pm$ 0,2	35,5 $\pm$ 1,6	45,4 $\pm$ 2,3	388 $\pm$ 19
140	2,68 $\pm$ 0,2	26,8 $\pm$ 1,3	38,0 $\pm$ 1,9	388 $\pm$ 19

Os resultados apresentados na Tabela 6.46 mostraram que os valores de taxa de fluência possuem uma diferença percentual máxima, quando comparados ao valor teórico apresentado na Tabela 6.2, de 83,2% na direção A para a distância fonte-detector de 30 cm, e na direção B é de 61,1% para a distância fonte-detector de 140 cm, e os valores $\dot{H}^*(10)$ apresentam uma diferença de

84,5% na direção A para a distância fonte-detector de 30 cm, e de 61,4% na direção B para a distância de 140 cm, em relação ao valor calculado descrito na Tabela 6.3.

Os valores de energia média e $h_{\phi}^*(10)$, quando comparados com os valores de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001), descritos na Tabela 5.2, são de 8,2% na direção A para a distância fonte-detector 258 cm, e de 0,8% na direção B para a distância fonte-detector de 140 cm; para a energia média e os valores de $h_{\phi}^*(10)$ chegam a ser de 12,7% na direção A para a distância fonte-detector de 258 cm, e de 11,3% na direção B para a distância fonte-detector de 140 cm.

6.7.2 Método do Cone de Sombra

O Método do Cone de Sombra avalia a contribuição da radiação de nêutrons espalhada de forma direta. O cone é posicionado entre a fonte e o sistema EMB, obstruindo o feixe direto emitido pela fonte, de modo que somente os nêutrons espalhados cheguem ao detector. Foram comparadas as grandezas: energia, taxa de fluência, $\dot{H}^*(10)$ e $h_{\phi}^*(10)$ obtidas utilizando o feixe completo (sem cone) e o feixe espalhado (com cone), assim possibilitando obter o feixe direto (sem espalhamento). Utilizou-se o tempo de contagem de 3 h, à distância fonte-detector de 100 cm, na direção A, em cada medição.

Com o intuito de eliminar a possibilidade do efeito super-sombra, que ocorre devido ao ângulo sólido do cone ser muito grande e assim reduzindo significativamente os nêutrons espalhados. Foi necessário utilizar 3 cones (Cone 1, Cone 2 e Cone 3) apresentados na Figura 5.14.

Segundo Mirzajani *et al* (2013) e Freitas *et al* (2013), observou-se que a não utilização de dois ou mais cones resultaria em uma diminuição considerável no valor de energia média, quando comparado com os valores de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001), utilizando uma fonte de $^{241}\text{AmBe}$.

Para avaliar a contribuição da radiação espalhada nas esferas de moderação de 25,40 cm (10") e 30,48cm (12") de diâmetro, utilizou-se o Cone 1, e para as esferas de moderação 7,62 cm (3"), 12,70 cm (5") e 20,32 cm (8") de diâmetro,

utilizou-se o Cone 2, e para as esferas de 5,08 cm (2") e o detector sem moderação, utilizou-se o Cone 3.

A Tabela 6.47 apresenta as taxas de contagem obtidas por meio do feixe completo (sem cone), feixe espalhado (com cone) e do feixe direto (sem cone – com cone), à distância fonte-detector de 100 cm, na direção A.

Tabela 6.47: Taxas de contagem obtidas por meio do feixe completo, feixe espalhado e do feixe direto à distância fonte-detector de 100 cm, na direção A.

Diâmetro da esfera (cm)	Taxa de contagem relativa ao feixe completo (cps)	Taxa de contagem relativa ao feixe espalhado (cps)	Taxa de contagem relativa ao feixe direto (cps)
Detector sem moderação	0,236 ± 0,005	***0,229 ± 0,005	0,007 ± 0,001
5,08 (2")	0,517 ± 0,007	***0,493 ± 0,007	0,024 ± 0,001
7,62 (3")	0,399 ± 0,010	**0,331 ± 0,006	0,170 ± 0,004
12,70 (5")	2,010 ± 0,014	**1,553 ± 0,012	0,703 ± 0,008
20,32 (8")	1,968 ± 0,014	*0,916 ± 0,009	1,076 ± 0,010
25,40 (10")	2,200 ± 0,013	*1,433 ± 0,012	0,875 ± 0,009
30,48 (12")	1,765 ± 0,013	*1,120 ± 0,010	0,752 ± 0,008

* Utilizando Cone 1

** Utilizando Cone 2

*** Utilizando Cone 3

A Figura 6.74 apresenta os espectros do feixe direto e espalhado da fonte de ²⁴¹AmBe, adquiridos por meio do desdobramento realizado pelo programa NeuraLN, a partir das taxas de contagem das radiações direta e espalhada apresentadas na Tabela 6.47, obtidas por meio do Método do Cone de Sombra, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e o espectro direto obtido no LNMRI/IRD a uma distância de 100 cm, utilizando o Método do Cone de Sombra (ISO, 2000).

Figura 6.74 Espectro direto (sem cone – com cone), e o espectro espalhado (com cone) da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ à distância fonte-detector de 100 cm, na direção A, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e o espectro direto obtido por meio do Método do Cone de Sombra no LNMRI/IRD.

A partir dos espectros direto e espalhado, em comparação com o espectro de referência da norma ISO 8529-1 (ISO, 2001) e com o espectro direto obtido no LNMRI/IRD, à mesma distância e utilizando o mesmo método, observou-se que os espectros do feixe direto apresentaram similaridade na forma com os espectros de referência e com o espectro direto obtido utilizando o mesmo método no LNMRI/IRD, e, portanto mostrando um bom resultado do Método do Cone de Sombra na discriminação do espalhamento do LCN.

A Tabela 6.48 apresenta os valores obtidos para energia média, taxa de fluência, $\dot{H}^*(10)$ e $h_{\phi}^*(10)$, à distância fonte-detector de 100 cm, na direção A, utilizando o feixe completo, o feixe espalhado e o feixe direto, obtidos no LCN e no LNMRI. Esses parâmetros foram obtidos por meio do programa NeuraLN, a partir das taxas de contagem da radiação direta adquiridas por meio do Método do Cone de Sombra.

Tabela 6.48 Valores obtidos para energia média, taxa de fluência e $\dot{H}^*(10)$, $h_{\phi}^*(10)$ às distâncias fonte-detector 100 cm, na direção A, obtidos utilizando o Método do Cone de Sombra no LCN e no LNMRI.

Distância fonte-detector (cm)	Energia média (MeV)	Taxa de fluência (n/cm ² .s)	$\dot{H}^*(10)$ (μ Sv/h)	$h_{\phi}^*(10)$ (pSv/cm ²)
Feixe completo (Sem cone)- LCN				
100	4,20 $\pm$ 0,19	48,6 $\pm$ 2,4	70,9 $\pm$ 3,5	405 $\pm$ 20,3
Feixe espalhado (Com cone) - LCN				
100	3,41 $\pm$ 0,17	32,8 $\pm$ 1,6	40,9 $\pm$ 2,0	345 $\pm$ 17
Feixe direto (Com cone – Sem cone) -LCN				
100	3,91 $\pm$ 0,20	19,4 $\pm$ 1,0	28,3 $\pm$ 1,4	411 $\pm$ 21
Feixe direto (Com cone – Sem cone) – LNMRI/IRD				
100	4,01 $\pm$ 0,20	17,4 $\pm$ 0,8	25,0 $\pm$ 1,2	396 $\pm$ 20

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6.48, observou-se que os valores de taxa de fluência relativa ao feixe direto obtido no LCN, utilizando o Método do Cone de Sombra, possuem uma diferença percentual máxima de 4,8% em relação ao valor obtido de forma teórica descrito na Tabela 6.2, e de 10,0% em relação ao valor obtido no LNMRI/IRD; e em comparação ao valor adquirido por meio do Método de Ajuste Reduzido para a distância fonte-detector de 100 cm, descrito na Tabela 6.45, foi de 4,0%.

Os valores de $\dot{H}^*(10)$ possuem uma diferença percentual máxima de 1,3% em relação ao valor obtido de forma teórica descrito na Tabela 6.3, e de 11,0% em relação ao valor obtido no LNMRI/IRD, e em comparação ao valor adquirido por meio do Método de Ajuste Reduzido para a distância fonte-detector de 100 cm, descrito na Tabela 6.45, foi de 4,0%.

O valor da energia média relativa ao feixe direto obtido por meio do Método do Cone de Sombra possui uma diferença percentual máxima de 6,0% em relação ao valor de referência descrito na Tabela 5.2, e de 2,0% em relação ao valor obtido no LNMRI/IRD, e em comparação ao valor adquirido por meio do Método de Ajuste Reduzido para a distância fonte-detector de 100 cm, descrito na Tabela 6.45, foi de 7,0%.

O valor de $h_{\phi}^*(10)$ possui uma diferença percentual de 4,9% em relação ao valor de referência descrito na Tabela 5.2, e de 4,0% em relação ao valor obtido no LNMRI/IRD, e em comparação ao valor adquirido por meio do Método de Ajuste Reduzido para a distância fonte-detector de 100 cm, descrito na Tabela 6.45, foi de 1,5%.

6.8. Determinação da fração de espalhamento

Com base nos resultados obtidos por meio dos Métodos de Ajuste Reduzido e Cone de Sombra, que são apresentados nas Tabelas 6.45, 6.46 e 6.48, pode-se obter a fração de espalhamento para taxa de fluência e $\dot{H}^*(10)$, que foram determinadas como sendo a razão entre os valores de taxa de fluência e $\dot{H}^*(10)$ obtidos pelo feixe completo pelo feixe espalhado, às distâncias fonte-detector que variam de 30 cm a 258 cm na direção A e de 60 cm a 140 cm na direção B. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.49.

Os resultados adquiridos utilizando o Método do Cone de Sombra para a distância fonte-detector de 100 cm, para a taxa de fluência foi de 67%, e para $\dot{H}^*(10)$ foi de 57%, e os valores para essas grandezas que são obtidos por meio do Método de Ajuste Reduzido são apresentados na Tabela 6.49.

Tabela 6.49: Fração de espalhamento para taxa de fluência e $\dot{H}^*(10)$, obtida por meio do Método de Ajuste Reduzido às distâncias fonte-detector que variam de 30 cm a 258 cm na direção A e de 60 cm a 140 cm na direção B.

Distância fonte-detector (cm)	Fração de espalhamento para taxa de fluência (%)	Fração de espalhamento para $\dot{H}^*(10)$ (%)
Direção A		
30	14	13
50	33	30
70	45	49
90	55	48
100	61	53
110	63	56
130	68	62
150	72	65
170	76	68
190	80	71
220	81	72
240	82	74
258	83	75
Direção B		
60	41	49
80	61	59
120	69	67
140	72	70

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6.49, observou-se que a maior fração de espalhamento para taxa de fluência foi de 83% à distância fonte-detector de 258 cm, na direção A, e de 72% para a distância fonte-detector de 140 cm, na direção B, e para $\dot{H}^*(10)$ a maior fração de espalhamento foi de

75% à distância fonte-detector 258 cm, na direção A, e de 70% à distância de 140 cm, na direção B.

Assim, foi possível observar que o espalhamento cresce à medida que a distância fonte-detector aumenta.

Comparando os resultados desses dois métodos aplicados na avaliação do espalhamento descritos na Tabela 6.45 e 6.48, observou-se que os métodos possuem uma diferença percentual máxima de 10% para taxa de fluência, e de 9% para a $\dot{H}^*(10)$ à distância fonte-detector de 100 cm.

Segunda a norma da ISO 8529-2 (ISO, 2000), a contribuição de espalhamento não deve ser superior a 40% no ponto de calibração; sendo assim, observou-se que às distâncias fonte-detector de 30 cm e 50 cm, a contribuição de espalhamento está dentro do limite aceitável pela norma; portanto, essas distâncias serão utilizadas para calibração dos detectores no LCN.

6.9. Mapeamento da radiação gama no campo de radiação da fonte de $^{241}\text{AmBe}$

A fonte de nêutrons de $^{241}\text{AmBe}$ utilizada na calibração dos monitores de nêutrons, além de emitir nêutrons, também emite radiação gama devido ao Amerício (Am), que decai pela emissão de fótons de 59,5 keV. Assim, houve a necessidade de mapear o campo de radiação gama nos pontos de medição do LCN.

Para realizar a medição da radiação gama, o monitor Automess foi posicionado às distâncias fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, e de 60 cm a 140 cm, na direção B, onde foram realizadas 10 medições em cada ponto, determinando-se o desvio padrão de cada medição, ou seja, a incerteza do tipo A. A Tabela 6.50 apresenta os resultados de $\dot{H}^*(10)$ e a radiação de fundo obtidos nas medições utilizando o monitor gama calibrado às diferentes distâncias fonte-detector, nas direções A e B, no LCN.

Tabela 6.50: Resultados de $\dot{H}^*(10)$ e radiação de fundo obtidos por meio das medições utilizando monitor gama calibrado às diferentes distâncias fonte-detector nas direções A e B no LCN.

Distância fonte-detector (cm)	Monitor gama $\dot{H}^*(10)$ ($\mu\text{Sv/h}$)	Radiação de fundo ($\mu\text{Sv/h}$)
Direção A		
30	$37,4 \pm 0,5$	$0,25 \pm 0,03$
50	$19,6 \pm 0,6$	$0,24 \pm 0,04$
70	$10,5 \pm 0,8$	$0,20 \pm 0,03$
90	$7,9 \pm 0,3$	$0,19 \pm 0,03$
100	$7,3 \pm 0,3$	$0,19 \pm 0,03$
110	$5,7 \pm 0,3$	$0,19 \pm 0,03$
130	$4,8 \pm 0,3$	$0,21 \pm 0,04$
150	$3,8 \pm 0,3$	$0,19 \pm 0,04$
170	$2,9 \pm 0,1$	$0,20 \pm 0,03$
190	$2,6 \pm 0,2$	$0,19 \pm 0,02$
220	$2,1 \pm 0,2$	$0,18 \pm 0,02$
240	$1,9 \pm 0,2$	$0,17 \pm 0,03$
258	$1,5 \pm 0,2$	$0,17 \pm 0,02$
Direção B		
60	$13,7 \pm 0,8$	$0,21 \pm 0,03$
80	$11,7 \pm 0,3$	$0,20 \pm 0,02$
120	$6,7 \pm 0,3$	$0,19 \pm 0,03$
140	$3,8 \pm 0,2$	$0,19 \pm 0,04$

Nota-se que os maiores valores de $\dot{H}^*(10)$ foram de $37,4 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ obtido à distância fonte-detector de 30 cm na direção A, e de $13,7 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ para a distância

fonte-detector de 60 cm na direção B. Assim, foi possível observar que o $\dot{H}^*(10)$ diminui à medida que a distância fonte-detector aumenta. O valor médio da radiação de fundo foi de $0,20 \pm 0,03 \mu\text{Sv/h}$ para todas as distâncias.

As Figuras 6.75 e 6.76 apresentam os comportamentos das taxas de equivalente de dose ambiente [$\dot{H}^*(10)$], obtidas por meio do monitor gama Automess, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A, e 60 cm a 140 cm, na direção B.

Figura 6.75 Taxa de equivalente de dose ambiente [$\dot{H}^*(10)$], obtida por meio do monitor Automess, variando a distância fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.

Figura 6.76: comportamento das taxas de equivalente de dose ambiente [$\dot{H}^*(10)$], obtida por meio do monitor gama Automess, variando a distância fonte-detector de 60 cm a 140 cm, na direção B.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 6.75 e 6,76, pode-se concluir que as taxas de equivalente de dose ambiente [$\dot{H}^*(10)$], obtidas nas direções A e B, não obedecem à lei do inverso do quadrado da distância.

6.10. Avaliação da radiação espalhada pelos componentes estruturais do LCN nos pontos de calibração

A calibração de um monitor de nêutrons deve ocorrer em um campo livre, isto é, sem a contribuição dos nêutrons espalhados pelo ar e pelos elementos estruturais do laboratório, tais como: parede, piso, teto e arranjo de irradiação. No entanto, é impossível obter um campo de radiação livre de qualquer influência da radiação espalhada.

Com o intuito de avaliar a radiação espalhada, que ocorre devido à interação dos nêutrons com o ar e com os componentes estruturais do laboratório tais como: piso, teto, paredes e portas, e determinar qual é a principal estrutura espalhadora do LCN, foram realizadas simulações computacionais utilizando o Método de Monte Carlo por meio do código MCNP5.

As simulações foram realizadas modelando o ambiente do laboratório sem a presença dos elementos estruturais (vácuo), com a sala completa, com a sala sem o piso, com a sala sem o teto, de maneira a avaliar a fluência de nêutrons.

Foram avaliadas 13 posições de especial interesse às distâncias que variam de 30 cm a 258 cm, na direção A. Nestas posições foram inseridas esferas de ar com 1,0 cm de raio, preenchidas com o ar atmosférico; os valores da fluência de nêutrons foram obtidos diretamente do código MCNP5.

A fração de espalhamento foi determinada por meio da razão entre os valores obtidos da taxa de fluência da sala sem os componentes estruturais e dos valores da taxa de fluência da sala com os componentes estruturais, onde se pretende avaliar de modo específico o espalhamento causado pelo teto e pelo piso. A Tabela 6.51 apresenta os resultados da influência da radiação espalhada nas estruturas para a fluência de nêutrons, obtidos nas 13 posições de medição, que variam de 30 cm a 258 cm, na direção A, calculados utilizando o código MCNP5.

Tabela 6.51: Influência da radiação espalhada nas distâncias fonte-detector de 30 cm a 258 cm, na direção A.

Distância fonte detector (cm)	Fração de espalhamento (%)		
	Sala completa	Sala sem o piso	Sala sem o teto
	Direção A		
30	13	7	6
50	31	22	18
70	44	32	26
90	56	40	34
100	60	42	36
110	61	44	37
130	67	49	38
150	73	51	46
170	75	53	45
190	79	54	47
220	82	55	48
240	81	56	50
258	84	57	51

Pode-se verificar que a distância fonte-detector de 30 cm apresenta a menor influência da radiação espalhada, que é de 13% com a sala completa, 7% sem o piso e 6% sem o teto; isso ocorre devido à proximidade da fonte. Para as maiores distâncias fonte-detector, observa-se que a influência do espalhamento torna-se muito maior; para a distância de 258 cm, chega a 84% com a sala completa, 57% sem o piso e 51% sem o teto; esta influência ocorre devido à interação dos nêutrons com os componentes estruturais do laboratório.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6.51, é possível observar que o piso é o principal componente estrutural do laboratório, que contribui para o aumento do espalhamento, onde apresenta o valor de 57% para a distância de 258 cm, na direção A.

Comparando os resultados da fração de espalhamento obtidos às distâncias de 30 cm a 258 cm, na direção A, por meio da simulação e dos Métodos de Ajuste Reduzido e do Método do Cone de Sombra, observou-se que os valores simulados em relação ao Método de Ajuste Reduzido, descritos na Tabela 6.49, possuem uma diferença percentual máxima de 7,0% para taxa de fluência, à distância fonte-detector de 30 cm, e de 10,0% em relação ao Método do Cone de Sombra, à distância fonte-detector de 100 cm.

A radiação espalhada é um problema bastante significativo e recorrente. Em virtude disso, a norma da ISO 8529-2 (ISO, 2000) recomenda que a distância máxima de calibração seja fixada de forma que o aumento da leitura devido ao espalhamento no laboratório seja menor do que 40%. Assim, no LCN, deve-se calibrar os monitores de radiação de nêutrons às distâncias fonte-detector de 30 cm e 50 cm, onde a contribuição de espalhamento apresentou-se dentro do limite aceitável pela norma.

6.11. Calibração de um monitor portátil

Com o objetivo de calibrar o monitor de nêutrons Ludlum 12-4 (227914), foram realizadas 10 medições em um intervalo de 1 min, às distâncias fonte-detector de 30 cm e 50 cm, onde a fração de espalhamento menor que 40 %. Assim, observou-se que as respostas obtidas pelo monitor, descritas na Tabela 6.51, apresentam uma diferença superior ao recomendado pela norma, que é de 20 % (CASEC, 2011). Deste modo, constatou-se a necessidade de realizar um ajuste no instrumento.

Depois de ajustado, o monitor Ludlum 12-4 foi exposto novamente à radiação e foram realizadas 10 medições em um intervalo de tempo de 1 min às distâncias fonte-detector de 30 cm e 50 cm. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.52, com os valores de: antes do ajuste e após o ajuste, com as suas respectivas incertezas.

Tabela 6.52: Valores obtidos do monitor Ludlum 12-4 (227914) para a grandeza $\dot{H}^*(10)$ às distâncias fonte-detector de 30 cm e 50 cm, sem ajuste e com ajuste.

Distância fonte-detector (cm)	EMB $\dot{H}^*(10)$ ($\mu\text{Sv/h}$)	Monitor Ludlum 12-4	
		$\dot{H}^*(10)$ ($\mu\text{Sv/h}$)	
		Antes do ajuste	Após o ajuste
30	381,4 $\pm$ 19,1	346,0 $\pm$ 4,6	382,5 $\pm$ 20,7
50	176,8 $\pm$ 8,8	139,9 $\pm$ 2,4	176,3 $\pm$ 9,8

Observa-se que os valores pós-ajuste do monitor Ludlum 12-4 (227914) apresentam uma diferença percentual máxima de 0,4 % para distância fonte-detector de 30 cm e de 0,2 % para distância fonte-detector de 50 cm, tais valores apresentam uma diferença dentro do recomendado pela norma (CASEC, 2011). As incertezas foram calculadas para o tipo A e B, após o ajuste, com o fator de abrangência ($k=2$).

7. CONCLUSÕES

Os objetos propostos neste projeto foram alcançados, onde foi estabelecido e caracterizado um Laboratório de Calibração com Campos Neutrônicos de referência com rastreabilidade ao sistema metrológico internacional, com objetivo de atender à demanda grande de serviços com esse tipo de radiação.

Utilizando o EMB, realizou-se um estudo da estabilidade em médio prazo, em que foram realizadas uma série de medições da taxa de contagem à uma distância fonte-detector de 100 cm; foi possível observar que a maior variação da resposta obtida foi do detector sem moderação.

A partir da atividade da fonte e da taxa de emissão da $^{241}\text{AmBe}$, obteve-se a taxa de fluência e taxa de equivalente de dose nas 17 posições de interesse às diferentes distâncias fonte-detector.

No processo de caracterização do campo de radiação de nêutrons do LCN, foram obtidas as taxas de contagens de cada esfera, às distâncias nas direções A e B; foi possível observar que o comportamento das taxas de contagem não obedecem à lei do inverso do quadrado da distância, devido a radiação espalhada.

Um dos responsáveis por causar o espalhamento da radiação de nêutrons, é o ar, portanto, fez-se necessário determinar um fator de atenuação do ar para as 17 posições de interesse; observou-se que os fatores de correção são crescentes à medida que a distância fonte-detector aumenta.

Realizou-se a determinação dos espectros, da energia, da taxa de fluência, $\dot{H}^*(10)$ e o $h_{\phi}^*(10)$ nos pontos de calibração do LCN. Esses parâmetros foram obtidos por meio do desdobramento realizado pelo programa NeuraLN, a partir das taxa de contagem direta, espalhada e total.

Os espectros, a energia, a taxa de fluência, $\dot{H}^*(10)$ e o $h_{\phi}^*(10)$ obtidos por meio das taxas de contagem relativas ao feixe total (direto + espalhado) sofreram mudanças significativas em relação aos valores teóricos de referência e com o espectro de referência, devido ao espalhamento causado pela interação dos nêutrons, que cresce à medida que a distância fonte-detector aumenta.

Com o objetivo de validar o desdobramento, realizou-se a comparação dos resultados obtidos pelos monitores de nêutrons calibrados no LMNRI, para a

grandeza de $\dot{H}^*(10)$. Assim, observou-se que os monitores Thermo ASP-2, apresentam resultados dentro dos limites, mas o monitor Dineutron apresentou uma diferença superior aos limites recomendados pela norma, devido a sua baixa sensibilidade para nêutrons térmicos.

A modelagem computacional do LCN foi realizada de acordo com as dimensões obtidas por meio da planta baixa do laboratório; foram levados em consideração todos os materiais que compõem o laboratório com o objetivo de obter uma simulação realista. As simulações foram realizadas modelando o ambiente do laboratório sem a presença dos elementos estruturais (vácuo), com a sala completa, com sala sem o piso, com a sala sem o teto, de maneira a avaliar a fluência de nêutrons nos pontos de medição.

O feixe direto e a influência da radiação espalhada nos pontos de calibração do LCN foram determinados por meio das simulações e os Métodos de Ajuste Reduzido e do Cone de Sombra; verificou-se que os espectros relativos ao feixe direto apresentam similaridade na forma com o espectro de referência e com os espectros simulados, assim. Os espectros espalhados apresentaram similaridades aos espectros simulados, onde se verificou mudanças significativas, principalmente nos pontos de medição próximos das paredes, nas direções A e B.

Os valores obtidos para energia, taxa de fluência, $\dot{H}^*(10)$ e $h_{\phi}^*(10)$ por meio das taxas de contagem relativas ao feixe direto, apresentaram boa concordância com os valores obtidos de forma teórica, o que indicando a confiabilidade no processo de caracterização do campo.

Finalmente, foram determinados os valores da fração de espalhamento nas distâncias de 30 cm a 258 cm, na direção A e B, por meio da simulação e dos Métodos de Ajuste Reduzido e do Método do Cone de Sombra; observou-se que os resultados sugerem que a calibração deva ser realizada nas distâncias menores que 50 cm, assim, garantindo que a contribuição da radiação espalhada na leitura do aparelho esteja dentro do limite aceitável pela norma.

Realizou-se a calibração de um monitor Ludlum 12-4, com medições às distâncias fonte-detector de 30 cm e 50 cm, sem e com ajuste no instrumento. Um procedimento para calibração de instrumentos foi elaborado dentro do sistema de qualidade do IPEN.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Guia para Expressão da Incerteza da Medição**. 3ª Ed. Brasileira em Língua Portuguesa. Rio de Janeiro: ABNT, INMETRO, SBM, 2003.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Radiações de Nêutrons de Referência – Parte 2: Fundamentos de Calibração de Dispositivos de Radioproteção relacionados às Grandezas Básicas que caracterizam o Campo de Radiação**. ABNT/CEE-135, Parte 2, Brasil, 2012.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Campos de Radiação de Referência – Campos de Nêutrons simulados de Local de Trabalho - Parte 1: Características e Métodos de Produção**. ABNT/CEE-135, Parte 1, Brasil, 2013a.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Radiações de Nêutrons de Referência – Parte 3: Calibração de Dosímetros Individuais e de Área e Determinação de suas Respostas em Função da Energia do Nêutron e do Ângulo de Incidência**. ABNT/CEE-135, Parte 3, Brasil, 2013b.

ALEVRA, A. V. Neutron spectrometry. **Radiation Protection Dosimetry**, v.34, n. 3, p. 305-333, 1999.

ALEVRA, A. V.; THOMAS, D.J. Neutron spectrometry in mixed fields: multisphere spectrometers. **Radiation Protection Dosimetry**, v.107, p. 37-72, 2003.

ALVARENGA, S. T. **Instalação e Caracterização Básica de um Laboratório para Testes de Monitores Portáteis com Radiação de Nêutrons**. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2014.

AMERSHAM. **AMERSHAM Products Catalog**. Amersham International, UK, 1986.

ATANACKOVIC, T.; YONKEU, A.; DUBEAU, J.; WITHARANA, H, S.; PRIEST, N. Characterization of neutron fields from bare and heavy water moderated ^{252}Cf spontaneous fission source using Bonner sphere spectrometer. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 99, p. 122-132, 2015.

BYRNE, J. **Neutrons, Nuclei and Matter**. Institute of Physics Pub, 1 ed., California, 1995.

BEDOGNI, R.; DOMINGO, C.; ROBERTS, N.; ROBERTS, N.; THOMAS, D. J.; CHITI, M.; ESPOSITO, A.; GARCIA, J. R.; GENTILE, A.; LUI, Z. Z.; SANPEDRO, M. Investigation of the neutron spectrum of Americium–Beryllium sources by Bonner Sphere Spectrometry. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A**. v. 763, p. 547-552, 2014.

BLANCO, C. X.; VILLAFañE, M. R.; SEGURA, E. M.; VEGA-CARRILLO, R. H.; GOZALO, S. J. Characterization of the storage pool of the Neutron Standards Laboratory of CIEMAT, using Monte Carlo techniques. In: **Proceedings of the XIV INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SOLID STATE DOSIMETRY, ISSSD Congress**, April 13-16, 2014, Cusco, Peru.

BRAMBLETT, R. L.; EWING, R. I.; EWING, T.W. A new type of neutron spectrometer. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A**, v.9, p.1-12, 1960.

BRIESMEISTER, J. F. **MCNP- A General Monte Carlo n-particle Transport Code**. Dover Publications, Los Alamos, 2. ed., 1993.

BYRNER, J. **Neutrons, Nuclei, and Matter: An Exploration of the Physics of Slow Neutrons**. Dover Publications, Portland, 2. ed, 2011.

CANBERRA, **Manual de operação para analisador multicanal Canberra, modelo: Lynx**, Canberra Industries, 2008.

CASEC, COMITÊ DE AVALIAÇÃO DE SERVIÇOS DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO, Requisitos Técnicos para Certificação de Laboratório de Calibração de Instrumento de Medição para Radiação Ionizante Usados em Radioproteção, Documento RT-LCI, 2011.

CHU, C. M.; FUNG, Y. K.; KWOK, T.; LEUNG, C. K. J.; LIN, C. Y.; LIU, H.; LUK, B. K.; NGAI, Y. H.; PUN, J. S. C.; WONG, H. L. H. Development of a Bonner sphere neutron spectrometer from a commercial neutron dosimeter. **Journal of Instrumentation**. v.11, p. 1-25, 2016.

CNEN, COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**, NN-3.01/002, Rio de Janeiro (2011).

EISENHAUER, C. M.; HUNT, J. B.; SCHWARTZ, R. B. Calibration Techniques for neutron personal dosimetry. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 10, p. 43-47, 1985.

FISHER, B. M.; ABDURASHITOV, J. N.; COAKLEY, K. J.; GAVRIN, V. N.; GILLIAM, D. M.; NICO, J. S.; SHIKHIN, A. A.; THOMPSON, A. K.; VECCHIA, D. F.; YANTS, V. E. Fast neutron detection with ^6Li -loaded liquid scintillator nuclear. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A**, v. 646, p. 126-134, 2011.

FREITAS, M. F.; MARTINS, M. M.; PATRÃO, C. S. K.; FONSECA, S. E.; PERREIRA, W. W.; MAURICIO, P. L. C. Scattering correction for ^{241}Am -Be calibration of an individual Albedo neutron dosimeter. In: **Proceedings of the INAC-INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE**, Nov 24-29, 2013, Recife-PE, Brasil.

GALLEGO, E.; LORENTE, A.; VEGA-CARRILLO, H. R. Characterization of an irradiation facility for testing neutron dosimetry instruments. In: **Proceedings of the 11 IRPA - INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION**, May 23-28, 2004, Madrid, Spain.

GHODKE, S.; KUMARI, S.; SINGH, Y.; SATHIAN, V.; MAHANT, K, A.; SHARMA, D, N. Standardisation of water-moderated $^{241}\text{Am}(\text{Be})$ neutron source using the pangher neutron long counter: Experimental and Monte Carlo modelling. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 148, p. 358-365, 2011.

GRESSIER, V.; TAYLOR, C, G. Calibration of neutron-sensitive devices. **Metrologia**, v. 48, p. 313-327, 2011.

IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Neutron Monitoring for Radiological Protection**, Vienna, 1985 (Technical Reports Series, n. 252).

IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments**, Vienna, 2000 (Safety Report Series n.16).

IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes**, Vienna 2001 (Technical Reports Series, n. 403).

ICRP, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation**, Vienna, 1996 (Technical Reports Series, n. 74).

INMETRO, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE e TECNOLOGIA. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (VIM)**. 1ª edição luso-brasileira, 2012.

JUN, M, J.; KIM, H, B.; KIM, L, J.; LEE, K, J. Calibration of spherical neutron measuring devices with a ^{252}Cf source in the neutron calibration room of the KAERI. **Journal of Nuclear Science and Technology**, v. 5, p. 286-289, 2008.

KAPLAN, I. **Nuclear Physics**. Addison-Wesley, 2. ed, London, 1962.

KHABAZ, R.; HAKIMABAD, M, H. Determination of ^{241}Am -Be spectra using Bonner Sphere Spectrometer by applying shadow cone technique in calibration. **Journal of Applied Sciences**, v. 11, p. 2849-2854, 2011.

KHABAZ, R. Analysis of neutron scattering components inside a room with concrete walls. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 95, p. 1 - 7, 2015.

KNOLL, G. **Radiation Detection and Measurement**. John Wiley & Sons, 4. ed., New York, 2010.

LEMOS, M. R. **Desdobramento de Espectro de Nêutrons utilizando o Método de Monte Carlo e Redes Neurais**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Energia Nuclear (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

LOWRY, K. A.; JOHNSON T. L. **Modifications to Iterative Recursion Unfolding Algorithms and Computer Codes to find more appropriate Neutron Spectra**. NRL Memorandum Report 5340. Washington, D. C., USA, 1984.

LUDLUM, **Manual de operação para detector de nêutrons Ludlum, modelo: 42-5**, Ludlum Measurements, 2003.

LUSZIK-BHADRA, M.; ALBERTS, W. G.; DIETZ, E.; GULDBAKKE, S. Aspects of combining Albedo and etched track techniques for use in individual neutron monitoring. **Radiation Protection Dosimetry**, v.46 (1), p.31-36, 1993.

MADI FILHO, T. **Desenvolvimento de Detectores de Nêutrons usando Sensor Tipo Barreira de Superfície com Conversor (n,p) e Conversor (n,α)**. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 1999.

MAZROU, H.; ALLAB, M. Neutron field measurements of the CRNA OB26 irradiator using a Bonner sphere spectrometer for radiation protection purposes. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 151, p. 354-364, 2012.

McCONN Jr, R.J.; GESH, C.J.; PAGH, R.T.; RUCKER R.A. WILLIAMS, R.G. **Radiation Portal Monitor Project. Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling**. Technical Report PNNL-15870, Rev. 1, Pacific Northwest National Laboratory, 2011.

McDONALD, J. C.; AKABANI, G.; LOESCH, R. M. Intercomparison of high-energy neutron personnel dosimeters. In: **Proceedings of the WORKSHOP ON MEASUREMENT QUALITY ASSURANCE FOR IONIZING RADIATION**, p. 159-164, Gaithersburg, 1993.

MIRZAJANI, N.; CIOLINI, R.; CURZIO, G. Analysis of the application of the shadow cone technique for the determination of the neutron spectrum with Bonner sphere spectrometer. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A**, v. 722, p. 24-28, 2013.

MIRZAJANI, N. **Characterization of the Mixed Radiation Fields for BNCT**. PhD (Thesi) - Sicurezza Nucleare e Industriale, Università Di Pisa, Italy, 2013.

NGOC LE, T.; TRAM, N. H.; NGUYEN, N. Q.; TRINH, V. G.; NGUYEN, T. K. Characterization of a neutron calibration field with $^{241}\text{AmBe}$ source using Bonner sphere spectrometer. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 133, p. 68-74, 2018.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. **Física das Radiações**. Oficina de Textos, São Paulo, 1. ed., 2010.

OLSHER, R. H.; McLEAN, T. D.; MALLETT, M. W.; SEAGRAVES, D. T.; GADD, M. S.; MARKHAM, R. L.; MURPHY, R. O.; DEVINE, R. T. Characterization of neutron reference fields at US Department of Energy calibration fields. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 126, p. 1-4, 2007.

ORTEC, **Manual de operação para pré-amplificador Ortec, modelo: 142**, Ortec- Advanced Measurement Technology, 2002.

PARK, H.; KIM, J.; CHOI, O. Neutron calibration facility with radioactive neutron sources at KRISS. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 148, p. 358-365, 2011.

POZZI, F. **CERN Radiation Protection (RP) Calibration Facilities**. Dissertation (Master)- Fakultät für Maschinenwesen, Lehrstuhl für Nukleartechnik, 2016.

REGINATTO, M.; GOLDHAGEN, P.; NEUMANN, S. Spectrum unfolding, sensitivity analysis and propagation of uncertainties with the maximum entropy deconvolution code MAXED. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A**, v. 476, p.242-246, 2002.

SCHUHMACHER, H. Neutron calibration facility. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 110, p. 33-42, 2004

SWEEZY, J. Bonner sphere unfolding made simple: An HTML based multisphere neutron spectrometer unfolding package. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 476, p. 263-269, 2001.

TAKADA, C.; YOSHIDA, T.; SAITOH, K.; TSUJIMURA, N.; MIKAMI, S. Calibration of neutron measuring devices in differently sized rooms with different-structural irradiation apparatuses. In: **Proceedings of the 11 IRPA- INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION**, May 23-28, 2004, Madrid, Spain.

THOMAS. D. J.; TAYLOR. G. C. Response function measurements for the REM 500: a microdosimetric counter based area survey instrument. In: **Proceedings of the CONFERENCE ON RADIATION DOSIMETRY AND SAFETY**. Mar 31- 2 Apr, 1997, Taipei, Taiwan.

THOMAS, D. J.; ALEVRA, A. V. Bonner sphere spectrometers - a critical review. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A**, v. 476, p. 12-20, 2002.

THOMAS, D. J. Neutron spectrometry for radiation protection. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 110, p. 141-149, 2004.

TSOULFANIDIS, N. **Measurement and Detection of Radiation**. Taylor & Francis, Washington, 2. ed., 1995.

TURNER, J, F. **Atoms, Radiation and Radiation Protection**. Wiley-VCH, Weinheim, 3. ed., 2007.

VANHAVERE, F.; COECK, M.; VERMEERSCH, F. Procedures for neutron scattering corrections in a calibration facility with a non-symmetric set-up. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 93, p. 5-10, 2001.

VEGA-CARRILLO, H.R.; WEHRING, B. W.; VEINOT, K.; HERTEL, N. E. Response matrix for a multisphere spectrometer using a ^6LiF thermoluminescence dosimeter. **Radiation Protection Dosimetry**. v. 81, p. 133-139, 1999.

VEGA-CARRILLO, H. R.; ORTIZ-RODRIGUES, M. J.; MARTÍNEZ-BLANCO, M. R. NSDUAZ unfolding package for neutron spectrometry and dosimetry with Bonner spheres. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 71, p. 87-91, 2012.

VIVOLO, V.; Potiens, M, P, A. Evaluation of the planar sources surface homogeneity used to instruments calibration. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 68, p. 605-606, 2010.

X-5 MonteCarloTeam, 2008. **MCNP – A General Monte Carlo N-particle Transport Code, Version 5, Volume: Overview and Theory**. LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory (revised 2008).

APÊNDICE A

Procedimento para calibração de monitores portáteis com radiação de nêutrons IT-LCI

A.1 – Objetivo

Descrever o processo e as condições operacionais necessárias para realizar a calibração de monitores de área para nêutrons usados em radioproteção, no Laboratório de Calibração com Nêutrons do IPEN.

A.2 – Campo de aplicação

Aplica-se aos monitores portáteis de radiação de nêutrons encaminhados ao LCN	Quem	Quando	Onde
	Técnico e tecnologista	Na data de calibração dos instrumentos, conforme agenda do LCI	No LCN, localizado no Bunker do LCI

A.3 – Procedimento de calibração

A.3.1 Condições e recursos necessários

- Os monitores de área são calibrados em um campo de radiação metrologicamente rastreado, com taxas de fluência e energias conhecidas;
- Presença de um técnico com conhecimento e apto para realizar o procedimento de calibração;
- Sistema de posicionamento dos instrumentos com acesso remoto e com câmeras de vídeo instalados no laboratório.
- Fonte de radiação de nêutrons recomendada pela Norma ISO 8529-1;
- Instrumentos para controle das condições ambientais, ar-condicionado e desumificador;
- Microcomputador com impressora;

- Planilhas eletrônicas para a realização dos cálculos necessários para a determinação do fator de calibração do monitor e das incertezas envolvidas;
- Arquivo técnico (digital ou físico) composto pelos manuais dos diversos tipos e modelos dos monitores de radiação de nêutrons.

A.3.2 Precauções e cuidados especiais

- Por se tratar de equipamentos eletrônicos sensíveis, cuidados especiais devem ser tomados no manuseio, no armazenamento e no seu transporte;
- Não realizar calibrações se as condições ambientais não estiverem devidamente controladas;
- Verificar se as lâmpadas de sinalização de segurança de área estão funcionando corretamente;
- Os monitores de área deverão ser calibrados utilizando um campo previamente rastreado e caracterizado para taxa de fluência e taxa de equivalente de dose ambiente;
- Os monitores devem ser posicionados na bancada utilizada para a calibração, utilizando-se o sistema de controle remoto;
- O executor do procedimento deve utilizar dosímetro e avental, toda vez que adentrar ao laboratório;
- Antes de expor o instrumento ao campo de radiação de nêutrons, deve-se verificar a sua resposta na ausência de radiação, com o intuito de verificar alguma anomalia no funcionamento do monitor. Caso seja detectada alguma anormalidade, o cliente deve ser informado e essa informação deve ser inserida na planilha de calibração do instrumento.

A.3.3 Descrição das atividades

A.3.3.1 Descrição do procedimento

A seguir são apresentados os testes iniciais para a calibração do monitor.

- Inspeção visual do equipamento, anotando qualquer irregularidade que impossibilite a calibração, como: mau contato na fonte de alimentação, cabos com mau contato e avaria no suporte da bateria;

- Ligar o equipamento na função teste de bateria (quando existir), com o intuito de verificar a tensão nominal da bateria; assim, se houver a necessidade, deve-se realizar a substituição;
- Ligar o sistema de ar-condicionado e o desumidificador antes do início das medições, para que elas sejam controladas e favoráveis à calibração;
- Ligar os monitores de vídeo e o sistema de posicionamento;
- Realizar o preenchimento da planilha eletrônica que será utilizada para calibração e a determinação das incertezas associadas, com as seguintes informações: responsável pelo equipamento, executante do procedimento, tipo de equipamento, data da calibração, marca do monitor, modelo, número de série, tipo de detector, número do protocolo do instrumento, temperatura, umidade e pressão ambientais;
- As calibrações devem ser sempre realizadas utilizando a fonte de $^{241}\text{AmBe}$, recomendada pela Norma ISO 8529-1;
- Realizar o preenchimento da planilha eletrônica de calibração, com as informações :
 1. Selecionar a grandeza de referência de acordo com a escala do equipamento em calibração (rem ou Sv);
 2. Selecionar o tipo de mostrador (analógico, digital ou misto);
 3. Selecionar unidade de escala;
 4. Observar e anotar a escala do instrumento;
 5. Definir os valores de referência em 20, 50 e 80 % de cada escala de acordo com as instruções do fabricante, limitação técnica ou conforme a orientação do cliente;
- Posicionar a monitor nos pontos de calibração, de forma que seu eixo longitudinal coincida com a direção preferencial do feixe de radiação;
- Posicionar a fonte no “zero” da régua fixada no trilho da bancada;
- Ao iniciar o procedimento, deve-se coletar 10 medições do monitor de área em um intervalo de tempo de 1 min em cada um dos pontos de calibração metrologicamente rastreados;
- Aguardar o tempo de aquecimento e a estabilização do equipamento;

- Ainda com o monitor exposto à radiação, deve-se alterar a distância fonte-detector e realizar as 10 medições; tal procedimento deve ser repetido em todos os pontos de calibração, com o intuito de calibrá-lo nas diferentes escalas;
- Deve-se realizar um conjunto de medições iniciais variando as distâncias fonte-detector e as escalas do monitor, com o intuito de avaliar a necessidade de ajuste ou determinação de um fator de calibração; as medições coletadas devem ser inseridas na planilha eletrônica, como leitura antes do ajuste;
- Caso o monitor apresente uma resposta inapropriada em relação ao campo já estabelecido e metrologicamente rastreado, recomenda-se determinar um fator de calibração ou realizar o ajuste do instrumento;
- Depois de ajustado, o monitor de área deverá ser exposto novamente à radiação e serão coletadas as 10 medições em um intervalo de tempo de 1 min nos pontos de calibração metrologicamente rastreados, utilizando diferentes escalas;
- Os valores das medições serão inseridos na planilha eletrônica, como leituras pós-ajuste, onde será realizado o cálculo das incertezas em cada ponto de medição, seguindo as recomendações da norma ISO GUM;
- Se o instrumento não apresentar os resultados dentro do limite aceitável pela norma, deve-se preencher o relatório referente ao instrumento, onde será especificado como “Não conforme”.
- No certificado de calibração dos instrumentos deverão constar todos os valores medidos sem ajuste e pós-ajuste ou fator de calibração, caso não seja possível realizar o ajuste, e o valor da incerteza apresentada em cada ponto de medição;
- Será afixada uma etiqueta de calibração no instrumento; caso não seja possível, a etiqueta será enviada ao usuário junto com o certificado de calibração, a ser entregue ao cliente;
- O registro da calibração será arquivado junto com a cópia do certificado de calibração após a revisão pelo signatário autorizado.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada
à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela
Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.**