

**Prycylla Gomes Creazolla**

**PROCEDIMENTO PARA MEDIÇÃO DO FATOR DE ANISOTROPIA DE FONTES  
DE NÊUTRONS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado para obtenção da certificação de Especialista pelo Programa de Pós-Graduação em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas do Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear.

Orientador: Dr. Walsan Wagner Pereira

Rio de Janeiro – Brasil

Instituto de Radioproteção e Dosimetria – Comissão Nacional de Energia Nuclear

Coordenação de Pós-Graduação

T  
539.7  
C912p

Creazolla, Prycylla Gomes

Procedimentos para medição do fator de anisotropia de fontes de nêutrons / Prycylla Gomes Creazolla. Rio de Janeiro: IRD/IAEA, 2017.

XIII, 54 f.: il.; tab.; 29 cm.

Orientador: Dr. Walsan Wagner Pereira

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização (Lato Sensu) em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas) – Instituto de Radioproteção e Dosimetria. 2017.

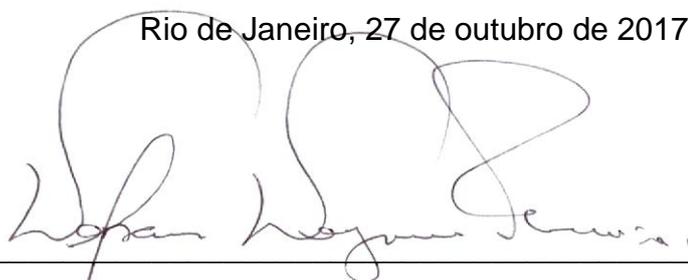
Referências bibliográficas: f. 33-35

1. Anisotropia 2. Fontes de nêutrons 3. Emissão de nêutrons I. Título

**Prycylla Gomes Creazolla**

**PROCEDIMENTO PARA MEDIÇÃO DO FATOR DE ANISOTROPIA DE FONTES  
DE NÊUTRONS**

Rio de Janeiro, 27 de outubro de 2017.



Prof. Dr. Walsan Wagner Pereira – IRD/CNEN



Prof. Dr. Francisco César Augusto da Silva – IRD/CNEN



Prof. Dr. José Ubiratan Delgado – IRD/CNEN

O presente trabalho foi desenvolvido no Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear, sob a orientação de Prof. Dr. Walsan Wagner Pereira.

*"Existem coisas melhores adiante do que  
qualquer outra que deixamos para trás."*  
C.S. Lewis

*"Ora, àquele que é poderoso para fazer  
tudo muito mais abundantemente além  
daquilo que pedimos ou pensamos,  
segundo o poder que em nós opera."*  
Efésios 3:21

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, o autor e o Senhor da minha vida, meu refúgio, minha porção e minha herança para sempre.

À minha família, pelo amor, apoio, dedicação e paciência que sempre tiveram comigo.

Agradeço a todos os mestres que desempenharam com dedicação as aulas ministradas, sempre nos incentivando e motivando a chegar mais longe. Especialmente o meu orientador, o Dr. Walsan Wagner Pereira pela orientação, apoio, transmissão de conhecimentos, paciência, dedicação e incentivo.

Ao Fellipe Silva, pela compreensão e o apoio para que eu terminasse o presente trabalho e quem contribuiu diretamente e incansavelmente na elaboração do mesmo, com as suas ideias, sugestões e orientações.

Aos membros do Laboratório de Nêutrons (LN) do IRD, por jamais me negarem um pedido de ajuda.

A todos os professores, pesquisadores e funcionários do Curso de Pós-Graduação Lato Sensu do IRD.

Aos meus colegas de turma, pelo carinho e atenção prestada durante o curso. Com vocês, minhas manhãs foram muito mais alegres.

E por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente me ajudaram nessa jornada e que por fim, finalizei.

## RESUMO

As fontes radioisotópicas de nêutrons permitem a produção de campos de referência para calibração de dispositivos de medição de nêutrons para fins de radioproteção e análises. Quando a taxa de emissão dessas fontes se dá de forma isotrópica, não é necessária nenhuma correção. Entretanto, variações no material da cápsula da fonte e na concentração do material emissor produzem diferenças em sua taxa de emissão de nêutrons em relação ao eixo axial da fonte, este efeito é denominado anisotropia. Neste trabalho foi apresentada a descrição do procedimento para medição do fator de anisotropia de fontes de nêutrons realizadas no Laboratório de Metrologia de Nêutrons (LN) utilizando um detector do tipo *Precision Long Counter* (PLC). Pois, um procedimento de medição que leve em consideração o fator de anisotropia de fontes de nêutrons contribui para a solução de alguns problemas, particularmente com relação às grandes incertezas associadas a dosimetria de nêutrons. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica baseada em literaturas e normas internacionais e no regulamento técnico específico da área de campos de nêutrons de referência, e posteriormente, foram reproduzidos na prática, por meio do procedimento para medição do fator de anisotropia em fontes de nêutrons do LN. O fator de anisotropia é determinado em função do ângulo de  $90^\circ$  em relação ao eixo axial da fonte. Esse ângulo tem maior importância por ser a posição com maior uso em medições e também devido a sua maior taxa de emissão de nêutrons em relação aos demais ângulos.

Palavras chaves: Anisotropia. Fontes de Nêutrons. Emissão de Nêutrons.

## ABSTRACT

Radioisotope neutron sources allow the production of reference fields for calibration of neutron detectors for radiation protection and analysis purposes. When the emission rate of these sources is isotropic, no correction is necessary. However, variations in source encapsulation and in the radioactive material concentration produce differences in its neutron emission rate, relative to the source axis, this effect is called anisotropy. In this study, is describe a procedure for measuring the anisotropy factor of neutron sources performed in the *Laboratório de Metrologia de Neutrons* (LN) using a Precision Long Counter (PLC) detector. A measurement procedure that takes into account the anisotropy factor of neutron sources contributes to solve some issues, particularly with respect to the high uncertainties associated with neutron dosimetry. Thus, a bibliographical review was carried out based on international standards and technical regulations specific to the area of neutron fields, and were later reproduced in practice by means of the procedure for measuring the anisotropy factor in neutron sources of the LN. The anisotropy factor is determined as a function of the angle of  $90^\circ$  in relation to the cylindrical axis of the source. This angle is more important due to its high use in measurements and also of its higher neutron emission rate if compared with other angles.

Keywords: Anisotropy. Neutrons Sources. Neutron Emission.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 Objetivo.....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Organização do trabalho.....	2
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	4
2.1 Descoberta dos Nêutrons.....	4
2.2 Interação do Nêutron com a matéria.....	5
2.3 Classificação dos Nêutrons.....	7
2.3.1 Nêutrons Térmicos.....	7
2.3.2 Nêutrons Epitérmicos.....	8
2.3.3 Nêutrons Rápidos.....	8
2.4 Moderação dos Nêutrons.....	9
2.5 Espectro de Energia dos Nêutrons.....	10
2.6 Fontes de Nêutrons.....	11
2.6.1 Fontes de Radioisótopos ( $\alpha,n$ ).....	11
2.6.2 Fontes Fotonucleares ( $\gamma,n$ ).....	12
2.6.3 Fontes de Fissão Nuclear.....	13
2.7 Encapsulamento de fontes de Nêutrons.....	14
2.8 Princípios de Calibração com Fontes de Nêutrons.....	17
2.8.1 Procedimento de Calibração.....	18
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	20
3.1 Determinação dos parâmetros para a Medição de Anisotropia.....	20
3.1.1 Fontes de Nêutrons do LN.....	20
3.1.2 Salão de Baixo Espalhamento do LN.....	21
3.1.3 Detector PLC.....	21
3.1.4 Sistema Mecânico de Rotação de Fontes.....	22
3.1.5 Distância Fonte-Detector.....	23
3.1.6 Cálculos envolvidos na Determinação de Anisotropia de Fontes de Nêutrons .....	23
3.2 Determinação do fator de Anisotropia de uma fonte de Nêutrons.....	25

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>27</b>
4.1	$^{241}\text{AmBe}$ 37 GBq	27
4.2	$^{241}\text{AmBe}$ 185 GBq	28
4.3	$^{241}\text{AmBe}$ 592 GBq	30
4.4	$^{238}\text{PuBe}$ 1,85 TBq	31
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>33</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores da perda média de energia para alguns materiais e as colisões necessárias para reduzir a faixa de energia de um nêutron de 2 MeV para a faixa de 0,025 eV.....	10
Tabela 2: Propriedades das fontes de ( $\alpha$ ,n) mais utilizadas.....	12
Tabela 3: Propriedades das fontes fotonucleares mais utilizadas.....	13
Tabela 4: Especificação das fontes de nêutrons do LN.....	20
Tabela 5: Fatores de anisotropia para uma fonte de nêutrons encapsulada de $^{241}\text{AmBe}$ 37 GBq. A medição foi realizada em intervalos de $10^\circ$ .....	28
Tabela 6: Fatores de anisotropia para uma fonte de nêutrons encapsulada de $^{241}\text{AmBe}$ 185 GBq. A medição foi realizada em intervalos de $10^\circ$ .....	29
Tabela 7: Fatores de anisotropia para uma fonte de nêutrons encapsulada de $^{241}\text{AmBe}$ 592 GBq. A medição foi realizada em intervalos de $10^\circ$ .....	30
Tabela 8: Fatores de anisotropia para uma fonte de nêutrons encapsulada $^{238}\text{PuBe}$ 1,85 TBq. A medição foi realizada em intervalos de $10^\circ$ .....	31

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática de encapsulamento de fontes de nêutrons.....	16
Figura 2: Sistema mecânico de rotação de fontes.....	22
Figura 3: Sistema de coordenadas de uma fonte cilíndrica com emissão anisotrópica.....	25
Figura 4: Fluxograma representando o procedimento para determinação da Anisotropia de fontes de nêutrons.....	26
Figura 5: Fatores de anisotropia para a fonte de nêutrons encapsulada de $^{241}\text{AmBe}$ 37 GBq, referentes aos dados da Tabela 5.....	27
Figura 6: Fatores de anisotropia para a fonte de nêutrons encapsulada de $^{241}\text{AmBe}$ 185 GBq, referentes aos dados da Tabela 6.....	29
Figura 7: Fatores de anisotropia para a fonte de nêutrons encapsulada de $^{241}\text{AmBe}$ 592 GBq, referentes aos dados da Tabela 7.....	30
Figura 8: Fatores de anisotropia para a fonte de nêutrons encapsulada de $^{238}\text{PuBe}$ 1,85 TBq, referentes aos dados da Tabela 8.....	31

## LISTA DE ABREVIATURAS

Amerício-Berílio - Am-Be

Amerício-Boro - Am-B

Banho de Sulfato de Manganês – BSM

Califórnio –Cf

Fontes de Radioisótopos -  $\alpha$ ,p

Fontes Fotonucleares -  $\gamma$ ,n

Instituto de Radioproteção e Dosimetria - IRD

*International Organization for Standardization* - ISO

Laboratório de Metrologia de Nêutrons - LN

Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes - LNMRI

Plutônio-Berílio - PuBe

*Precision Long Counter* - PLC

Tempo de meia vida -  $T_{1/2}$

Trifluoreto de boro -  $BF_3$

## 1. INTRODUÇÃO

A metrologia de nêutrons ao atuar na calibração de monitores de área para nêutrons necessita utilizar uma fonte de nêutrons padronizada em um sistema absoluto tal como o Banho de Sulfato de Manganês (BSM) ou que seja calibrada em um sistema secundário como o detector do tipo *Precision Long Counter* (PLC). Estes dois sistemas permitem, sob condições específicas, a determinação da taxa de emissão da fonte de nêutrons e a estimativa de incertezas que serão conhecimentos característicos iniciais para a calibração dos monitores de nêutrons.

Geralmente, conhecendo-se o espectro em energia de uma fonte de nêutrons e a taxa de emissão dessa fonte, pode-se construir um modelo simples em que, num espaço amplo e livre de obstáculos, estejam posicionados a fonte de nêutrons e o monitor de área a ser calibrado. Diante deste modelo é possível construir uma dependência funcional entre a referência que expressa a grandeza operacional de interesse com a distância entre a fonte de nêutrons e o instrumento a ser calibrado.

Correções devem ser introduzidas neste modelo, como a dependência funcional da grandeza de interesse numa determinada distância, para uma representação mais realística dentro de um laboratório de calibração. O espalhamento de radiação de nêutrons devido às interações com o ar e materiais que delimitam o laboratório, tais como, teto, paredes e solo, entre outros também devem ser considerados. Estes são fatores relevantes no aperfeiçoamento deste modelo. As correções poderiam incluir fatores individuais ligados a cada um dos materiais considerados ou produzir um único fator que daria conta da contribuição do espalhamento.

Existe ainda uma correção a ser considerada para o procedimento de calibração que está ligada à fabricação das fontes de nêutrons. Geralmente, os fabricantes constroem as fontes de nêutrons baseadas em radionuclídeos radioativos com encapsulamentos em aço que seguem rigorosas regras de construção garantindo uma longa integridade. Quando a taxa de emissão dessas fontes se dá de forma isotrópica pela fonte, não é necessária nenhuma correção. Entretanto, a fonte de nêutrons, em sua construção, é distribuída e

encapsulada em geometrias cilíndricas, o que gera variações na espessura de aço e na distribuição do material radioativo. Essas variações geram efeitos de anisotropia na emissão de nêutrons. Sendo assim, é necessário considerar o fator anisotrópico relativo ao campo de nêutrons para que seja realizada uma calibração adequada dos instrumentos e dispositivos sensíveis aos nêutrons.

### **1.1 Objetivo**

O trabalho tem como objetivo realizar uma descrição geral sobre a determinação de anisotropia de diferentes fontes de nêutrons acompanhada de uma proposta de um procedimento técnico para medição experimental do fator de anisotropia das principais fontes usadas no Laboratório de Metrologia de Nêutrons (LN).

### **1.2 Objetivos específicos**

Como objetivo específico, executar um conjunto de medições para determinar experimentalmente o fator anisotrópico das fontes de nêutrons do LN a partir da medição da taxa de emissão de nêutrons em diferentes direções, a fim de contribuir para o uso adequado dessas fontes na calibração e irradiação de instrumentos. Bem como, descrever um sistema mecânico com a função de rotacionar a fonte e descrever um procedimento para medição de anisotropia utilizando o detector do tipo *Precision Long Counter* (PLC).

### **1.3 Organização do trabalho**

O trabalho possui uma estruturação que contempla os fundamentos teóricos sobre os principais parâmetros de campos de radiação de nêutrons, incluindo os conceitos básicos de calibração, encapsulamento de fontes, as principais reações e interações dos nêutrons com a matéria e os fatores que contribuem para a variação da taxa de emissão de nêutrons em diferentes direções. Além da fundamentação supracitada, é apresentado um procedimento para a medição do fator anisotrópico de fontes de nêutrons realizado no LN, bem como os resultados obtidos e as conclusões que podem

ser extraídas, destacando as potenciais contribuições da análise desse fator em relação à produção de campos de referência para calibração de dispositivos de medição de nêutrons para fins de radioproteção.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Descoberta dos Nêutrons

Rutherford foi o primeiro a observar através da reação  $^{14}\text{N}(\alpha,p)^{13}\text{C}$  a emissão de um próton a partir da desintegração do Nitrogênio (N) por partículas alfas. Walther Bothe e Franz, em 1930, detectaram uma pequena variação do espectro do próton a partir da reação  $^{10}\text{B}(\alpha,p)^{13}\text{C}$  acompanhado de radiação gama. Logo após, Bothe e Becker iniciaram uma busca sistemática de radiação gama emitida a partir de reações de fontes de radioisótopos ( $\alpha,p$ ) com núcleos leves, que de fato observaram em alvos de boro, alumínio e magnésio e verificaram também que surgia uma intensa e penetrante radiação a partir do bombardeamento de Lítio e Berílio (BYRNE, 2011; ZAMBONI, 2007).

Nos estudos de Webster em 1932, foi observado que a radiação emitida por berílio foi absorvida pela matéria até certo ponto, o ocorrido implicaria em uma energia quântica de cerca de 7 MeV, mais energética do que os raios gama conhecidos na época, cerca 2,62 MeV, emitido pelo núcleo do Chumbo-208 ( $^{208}\text{Pb}$ ) no depósito ativo do tório. Ele também notou que a radiação emitida na direção direta em relação ao impulso alfa incidente parecia ser mais energética do que a emitida na direção de trás e especulou-se que os efeitos analisados poderiam ser causados por corpúsculos de alta velocidade que consistiam numa combinação de um próton e um elétron (BYRNE, 2011).

No mesmo período dos estudos de Webster, Irène Joliot-Curie e seu marido, Jean Frédéric Joliot verificaram a saída de prótons com altas energias de uma lâmina de parafina, rica em hidrogênio, ao incidirem sobre ela a radiação proveniente do Berílio, resultado do bombardeamento por radiação alfa. Foi então interpretado como efeito Compton, mas ao invés dos raios gama arrancarem elétrons ao incidirem na superfície de um metal, esses raios arrancavam prótons da parafina com uma energia em torno de 50 MeV. Em seguida, Jean Baptiste Perrin e Ettore Majorana após a divulgação desse experimento, sugeriram que os raios observados por Joliot e Curie eram na realidade, nêutrons (BYRNE, 2011; ZAMBONI, 2007).

Chadwick ao reproduzir as experiências de Bothe e Joliot-Curie, em 1933, substituiu a lâmina de parafina por conversores de Hidrogênio (H), Lítio (Li), Berílio (Be), Boro (B) e Nitrogênio (N) para analisar a energia produzida por cada conversor após a incidência da radiação proveniente do bombardeamento do Berílio por radiação alfa, acrescentando também uma câmara de ionização ao experimento. Ele pôde, então, concluir que os diferentes espectros de energia produzidos de todos os átomos de recuo não tinham relação com o efeito Compton para uma energia fixa de raios gama recebido, pois a radiação gama incidente deveria ser maior conforme fosse o núcleo do alvo. Sendo assim, Chadwick supôs que a radiação fosse composta de partículas sem carga e com massa semelhante à do próton (BYRNE, 2011; SILVA, 2016; ZAMBONI, 2007).

## **2.2 Interação do Nêutron com a Matéria**

A interação do nêutron com a matéria ocorre por meio de interações com núcleos atômicos, pois não possuem carga elétrica e conseqüentemente não interagem com a matéria através da força coulombiana. Devido a isso, a energia cinética do nêutron não é alterada pela presença de elétrons, somente através de fenômenos resultantes de interações com os núcleos atômicos do meio material, seja penetrando no núcleo ou então passando muito próximo à sua superfície, dentro dos limites de ação da força nuclear (LEITE, 2010; TERREMOTO, 2004).

Para quantificar as probabilidades de reações nucleares e, portanto, a interação do nêutron com o núcleo, é definida uma grandeza denominada secção de choque que varia de acordo com cada átomo presente no material e também com a faixa de energia do nêutron (ZAMBONI, 2007).

Processos como espalhamento ou reações  $(n,n)$  são exemplos de interação do nêutron com a matéria, considerando o estado energético do núcleo alvo após a interação. Nas reações de espalhamento elástico, a energia cinética total do sistema é conservada mesmo após a colisão do nêutron com núcleos de massa próxima à dele. Nesse caso, as seções de choque em núcleos leves são razoavelmente independentes da energia cinética do nêutron

incidente até energias de aproximadamente 1 MeV. Para núcleos intermediários e pesados a seção de choque para espalhamento elástico é constante para energias baixas e exibe certa variação em energias mais elevadas. As exceções importantes a esta regra, são constituídas pela incidência de nêutrons com energia cinética inferior a 1 eV em água ou água pesada, nas quais, apesar da seção de choque dos átomos constituintes se manterem constantes, a estrutura molecular amplifica o valor da seção de choque para espalhamento elástico com a redução da energia cinética do nêutron (TERREMOTO, 2004; ZAMBONI, 2007).

No espalhamento inelástico, não há conservação cinética de energia, pois o nêutron é absorvido pelo núcleo alvo com massa superior à do nêutron, formando um núcleo composto e instável. Em casos onde a energia do nêutron incidente for de 0,1 MeV a 1,0 MeV em núcleos alvos médios e pesados ou então, com energia superior a 1,0 MeV para núcleos alvos leves, o núcleo alvo emite um nêutron com energia diferente da energia do nêutron incidente e libera o excesso de energia em forma de emissão gama, retornando ao seu estado fundamental (FRATIN, 1993; LEITE, 2010; TAHUATA, 2011; ZAMBONI, 2007).

Nas reações de captura radioativa, para que ocorra a absorção de nêutrons pelos núcleos, é necessário que haja reação nuclear de maneira que o núcleo composto passe a apresentar energia de excitação igual à energia de ligação do nêutron mais a energia cinética do nêutron incidente. A probabilidade de ocorrência de fenômenos de captura é maior para nêutrons térmicos por possuírem energia mais próxima da energia de equilíbrio térmico do meio, os mesmos permanecem mais tempo próximos aos núcleos, aumentando suas chances de serem capturados. Quando nêutrons rápidos são capturados, o núcleo entra em estado de excitação e esse fenômeno é acompanhado pela formação e emissão de partículas secundárias, como prótons e alfa, ocorrendo reações do tipo  $(n,\alpha)$  e  $(n,p)$  (CURTISS, 1959; FRATIN, 1993; LEITE, 2010).

Nos processos de absorção, pode ocorrer também a reação de fissão, geralmente com a interação de nêutrons térmicos em núcleos alvos pesados, como Urânio-233 ( $^{233}\text{U}$ ), Urânio-235 ( $^{235}\text{U}$ ) e Plutônio-239 ( $^{239}\text{Pu}$ ). O nêutron

após ser absorvido pelo núcleo forma um núcleo composto, tornando-se instável e fornece energia suficiente ao núcleo fazendo com que ocorra um processo de vibração coletiva e o átomo assume formas de elipsoide até atingir o formato de um oito, fissionando-se em seguida em dois fragmentos, geralmente com massas atômicas diferentes e emitindo de 2 a 3 nêutrons além da radiação gama (LEITE, 2010; TAHUATA, 2011).

## **2.3 Classificação dos Nêutrons**

Conhecer as propriedades fundamentais do nêutron é a base para entender as características gerais de seu comportamento. A classificação energética dos nêutrons ocorre conforme suas interações com a matéria. É possível discriminar nêutrons de uma variedade de energias em grupos bastante definidos. As divisões ocorrem naturalmente como resultado das interações peculiares a certos intervalos de energia, embora essas diferentes regiões se fundam umas nas outras e às vezes se sobreponham. A divisão em categorias que se desenvolveu é conveniente e muitas vezes necessária para a compreensão de tipos específicos de interações (ZAMBONI, 2007).

### **2.3.1 Nêutrons térmicos**

Nêutrons térmicos, ou seja, nêutrons que estão em equilíbrio térmico com o meio têm apenas a distribuição de Maxwell do movimento térmico característico da temperatura do meio em que eles existem. Usualmente, é assumido uma temperatura de 300 Kelvin (K) sendo equivalente a uma energia média de aproximadamente 0,025 eV. Nessa faixa de energia, ocorrem as interações do tipo espalhamento elástico com baixa transferência de energia do nêutron incidente ao núcleo e, portanto, não há alterações na estrutura nuclear (ATTIX, 2004; KNOLL, 2010; ZAMBONI, 2007).

Nessa faixa de energia, ocorrem também outras reações nucleares induzidas por nêutrons, entretanto, antes que ocorra outro tipo de interação, os nêutrons térmicos já estão em equilíbrio térmico com o meio devido às colisões elásticas serem muito mais possíveis de ocorrerem. Somente as radiações secundárias com energias diretamente detectáveis resultantes de reações de

nêutrons induzidos, principalmente reações como  $(n,\alpha)$ ,  $(n,p)$  e  $(n,f)$  são as que possuem uma importância maior do ponto de vista de interações com nêutrons térmicos, pois as radiações secundárias são partículas carregadas. Como os nêutrons incidentes possuem energias muito baixas, todas essas reações devem ter um *Q-value* positivo para serem energeticamente possíveis. Na maioria dos materiais, a reação de captura radiativa é a mais provável de ocorrer e desempenha um papel importante na atenuação ou blindagem de nêutrons (KNOLL, 2010).

### **2.3.2 Nêutrons Epitérmicos**

Compreende os nêutrons com energia superior à faixa de energia dos nêutrons térmicos e energia menor que o mínimo necessário para as reações limiares que ocorrem na faixa de energia dos nêutrons rápidos. Usualmente é assumido que os nêutrons epitérmicos têm energia na faixa em que ocorrem as ressonâncias da seção de choque de absorção de grande parte dos núcleos atômicos. Experimentalmente, a energia que define o limite entre nêutrons térmicos e nêutrons epitérmicos é determinada pelo grau de Cádmi (Cd), pois apresenta em seu espectro um degrau brusco na seção de choque de absorção do  $^{113}\text{Cd}$  em 0,25 eV. Entretanto, o limite entre nêutrons epitérmicos e rápidos não é tão bem definido, sendo usualmente, adotada uma faixa entre 100 keV a 200 keV (ZAMBONI, 2007).

### **2.3.3 Nêutrons Rápidos**

Compreende os nêutrons com energia suficiente para interagir com grande parte dos núcleos através de reações limiares, e não somente através de captura ou espalhamento. Estes nêutrons cobrem a faixa de energia de 10 keV em diante. Para a detecção, o processo de interação por meio de espalhamento torna-se melhor quando os nêutrons transferem uma quantidade considerável de energia em uma única colisão e as radiações secundárias resultantes são núcleos de recuo, que captaram uma quantidade detectável de energia de colisões de outros nêutrons. A diminuição de sua energia ocorre em cada região de espalhamento, dependendo do núcleo alvo e o número de

colisões necessárias. Elementos leves, como o hidrogênio servem como moderador, pois o nêutron pode perder toda a sua energia em apenas uma colisão. Para núcleos mais pesados, é possível apenas a transferência de parte da energia (ZAMBONI, 2007).

Se o nêutron rápido possuir uma energia suficientemente alta, o espalhamento inelástico sucederá preferencialmente em circunstâncias onde o núcleo de recuo possui probabilidades elevadas de ocorrência durante a colisão com nêutrons. Os núcleos rapidamente decaem, emitindo radiação gama e perdendo grande parte de sua energia. Em seguida, o seu comportamento passa ser semelhante ao processo de colisão elástica. Há também reações do tipo  $(n,n)$  onde o núcleo permanece em estado metaestável e reações  $(n,2n)$  que ocorrem com nêutrons que possuem energias superiores a 10 MeV. Espalhamento inelástico e suas subsequentes radiações gamas secundárias desempenham um importante papel no processo de blindagem de nêutrons com altas energias; todavia também apresenta uma complicação na resposta na maioria dos detectores de nêutrons rápidos, baseados no espalhamento elástico (KNOLL, 2010; SILVA, 2016).

## **2.4 Moderação dos Nêutrons**

A moderação é consequência das colisões elásticas ou inelásticas entre os nêutrons e o núcleo do moderador, a fim de que a energia cinética dos nêutrons fique próxima à energia térmica dos núcleos do meio. Um bom moderador faz com que os nêutrons percam sua energia sem serem fortemente absorvidos pelos núcleos e por isso eles compreendem elementos que possuem massa atômica baixa, em que o processo de moderação ocorre, preferencialmente por colisões elásticas (FRATIN, 1993).

Sendo assim, o moderador mais eficiente é o hidrogênio, tendo em vista que o nêutron pode perder toda sua energia em apenas uma colisão com núcleos de hidrogênio. Para núcleos mais pesados, é possível apenas a transferência de parte da sua energia. Na Tabela 1, pode-se observar o número de colisões necessárias para reduzir a energia de um nêutron de 2 MeV para uma faixa de nêutrons térmicos com energia de 0,025 eV a partir

do parâmetro de perda média logarítmica,  $\xi$ , sendo a perda média de energia de um nêutron em escala logarítmica (KNOLL, 2010; SILVA, 2016; ZAMBONI, 2007).

Tabela 1: Valores da perda média de energia para alguns materiais e as colisões necessárias para reduzir a faixa de energia de um nêutron de 2 MeV para a faixa de 0,025 eV (ZAMBONI, 2007).

Elemento	Número de massa	$\xi$	Nº de colisões necessárias [ $\ln(2 \times 10^6) - \ln(0,025) / \xi$ ]
Hidrogênio	1	1	18,2
Deutério	2	0,725	25,1
Hélio	4	0,425	43
Lítio	7	0,268	68
Berílio	9	0,209	87
Carbono	12	0,158	115
Oxigênio	16	0,120	152
Urânio	238	0,00838	2172

## 2.5 Espectro de Energia dos Nêutrons

A norma da ISO 8529-1 (2001) especifica os seguintes campos de nêutrons de referência, na faixa de energia de 0,025 eV até 20 MeV para a calibração de dispositivos de medição de nêutrons, utilizados para fins de proteção radiológica e para determinar a sua resposta em função de sua energia.

- Nêutrons produzidos por fontes radioisotópicas, incluindo fontes de nêutrons em um moderador;
- Nêutrons produzidos através de reações nucleares utilizando partículas carregadas provenientes de um acelerador;
- Nêutrons de reatores.

Além disso, são estabelecidos os espectros de fontes radioisotópicas de nêutrons de referência que devem ser usadas na rotina de calibração e de irradiação nos laboratórios de metrologia. Sendo eles os da fonte de <sup>241</sup>Americío-Berílio (<sup>241</sup>Am-Be), <sup>241</sup>Americío-Boro (<sup>241</sup>Am-B), Califórnio-252 (<sup>252</sup>Cf), Califórnio-252 imerso em água pesada (esfera de aço com 30 cm de diâmetro e revestida com folhas de cádmio).

## 2.6 Fontes de Nêutrons

Nêutrons não são emitidos espontaneamente por núcleos como resultado de qualquer processo de decaimento radioativo conveniente. Além disso, as fontes de nêutrons não são tão disponíveis como as fontes de radiação gama que possuem um grande número de núcleos povoados por decaimento beta. E por não terem carga elétrica, tampouco se podem acelerar nêutrons em aceleradores de partículas, como se faz com os elétrons, prótons ou núcleos pesados. As fontes de nêutrons baseiam-se em fissão espontânea ou em reações nucleares para as quais a partícula incidente é o produto de um processo de decaimento convencional e por isso o número de fontes de nêutrons é limitado (KNOLL, 2010). Existem cinco tipos de fonte de nêutrons:

- Fonte de radioisótopos;
- Fonte fotonucleares;
- Fonte de aceleradores;
- Fonte de fissão nuclear;
- Reações nucleares de alta energia (Spallation)

Destes, os dois primeiros são pequenos e facilmente acomodados em um laboratório padrão. Os três restantes são instalações cada vez mais sofisticadas com suas próprias características. Para a realização de medições precisas sobre as propriedades do próprio nêutron e para a produção de isótopos radioativos, o reator nuclear no passado foi, de longe, a fonte mais importante. Com o crescente estudo de matéria condensada, as fontes de reações nucleares de alta energia (*Spallation*) provavelmente terão um significado crescente no futuro (BYRNE, 2011).

### 2.6.1 Fontes de Radioisótopos ( $\alpha,n$ )

Essas fontes são principalmente baseadas na reação ( $\alpha,n$ ), cuja observação levou à descoberta do nêutron. Nesse tipo de fonte, há a combinação de um emissor alfa, como o  $^{239}\text{Pu}$ , o  $^{210}\text{Po}$  ou o  $^{241}\text{Am}$ , com um outro elemento leve, em geral o Berílio, de forma que a radiação alfa emitida pelo primeiro produza uma reação nuclear no segundo, resultando na emissão

de um nêutron. Essas fontes produzem nêutrons de energia na faixa de 0 MeV a 13 MeV, com uma energia média em torno de 5 MeV. Por garantirem um fluxo constante, possuírem meia-vida longa e apresentarem atividade tipicamente na faixa de 10<sup>5</sup> nêutrons por segundo, elas são os tipos de fontes mais utilizadas (KNOLL, 2010).

Uma fonte útil pode ser construída usando misturas de berílio metálico com compostos de polônio, rádio ou elementos transurânicos. Fontes com rendimentos substancialmente mais baixos de nêutrons por partícula alfa podem basear-se em reações ( $\alpha$ ,n) em boro natural (81,3% <sup>11</sup>B, 18,7% <sup>10</sup>B) ou flúor (100% <sup>19</sup>F) (KNOLL, 2010; ZAMBONI, 2007).

As características de uma variedade de fontes de nêutrons a partir da reação ( $\alpha$ ,n) estão resumidas na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades das fontes de ( $\alpha$ ,n) mais utilizadas (BYRNE, 2011).

Fonte	E $_{\alpha}$ (MeV)	T $_{1/2}$	Produção (n/ $\alpha$ )
<sup>210</sup> Po + Be	5,30	138,4 dias	0,7 x 10 <sup>4</sup>
<sup>226</sup> Ra + Be	4,78; 4,59	1,622 x 10 <sup>3</sup> anos	1,8 x 10 <sup>4</sup>
<sup>239</sup> Pu + Be	5,14	2,44 X 10 <sup>4</sup> anos	65 x 10 <sup>6</sup>
<sup>241</sup> Am + Be	5,48	4,33 x 10 <sup>2</sup> anos	82 x 10 <sup>6</sup>
<sup>242</sup> Cm+ Be	6,10	162 dias	1,18 x 10 <sup>4</sup>
<sup>241</sup> Am+ Bo	5,48	2,33 x 10 <sup>2</sup> anos	1,0 x 10 <sup>5</sup>
<sup>241</sup> Am + Fo	5,48	2,33 x 10 <sup>2</sup> anos	4,0 x 10 <sup>6</sup>
<sup>238</sup> Pu + Be	5,48	87,4 anos	79 x 10 <sup>6</sup>

### 2.6.2 Fontes Fotonucleares ( $\gamma$ ,n)

Nesse tipo de fonte, o nêutron é produto de uma reação induzida por fótons, ou seja, o núcleo alvo de um elemento passível de sofrer uma reação ( $\gamma$ ,n) é excitado devido a absorção de fótons com energia suficientemente alta de raios gama ( $\gamma$ ) após o decaimento de uma fonte beta ( $\beta$ ). As únicas reações fotonucleares com rendimentos de nêutrons suficientemente elevados para servir como fontes úteis de nêutrons são <sup>9</sup>Be( $\gamma$ ,n)<sup>8</sup>Be e <sup>2</sup>H( $\gamma$ ,n)<sup>1</sup>H. Estes produzem feixes homogêneos de nêutrons de energia menor que 1 MeV quando excitados por alguns tipos de radioisótopos gama emissores (BYRNE, 2011; ZAMBONI, 2001).

Os isótopos mais comumente usados são os emissores beta negativo ( $\beta^-$ ), como  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{72}\text{Ga}$ ,  $^{124}\text{Sb}$  e  $^{140}\text{La}$  que estão fechados em alvos de óxido de deutério (Água pesada) ou berílio metálico. Uma vez que o isótopo estável  $^{123}\text{Sb}$  forma 42,8% de antimônio natural, a fonte  $^{124}\text{Sb}/\text{Be}$  é particularmente conveniente porque pode ser reconstruída repetidamente por irradiação de nêutron em um reator nuclear. As principais características desse tipo de fonte estão resumidas na Tabela 3 (BYRNE, 2011).

Tabela 3: Propriedades das fontes fotonucleares mais utilizadas (BYRNE, 2011).

Fonte	$E_\alpha$ (MeV)	$T_{1/2}$	Produção (n/ $\beta$ )
$^{24}\text{Na} + \text{Be}$	2,757	15,1 horas	$3,8 \times 10^6$
$^{24}\text{Na} + \text{D}_2\text{O}$	2,757	15,1 horas	$7,3 \times 10^6$
$^{72}\text{Ga} + \text{D}_2\text{O}$	2,51	14,3 horas	$1,9 \times 10^6$
$^{124}\text{Sb} + \text{Be}$	5,48	60,9 dias	$5,1 \times 10^6$
$^{140}\text{La} + \text{Be}$	2,51	40,2 horas	$0,08 \times 10^6$

A vantagem da fonte ( $\gamma, n$ ) é que se o raio gama for monoenergético, os nêutrons emitidos serão, aproximadamente, monoenergéticos. Entretanto, é necessário que sejam empregadas altíssimas energias de raios gama para a produção de fontes de nêutrons com intensidade ideal para ser utilizada, além de haver uma forte presença de radiação gama no feixe de nêutrons (KNOLL, 2010; SILVA, 2016).

### 2.6.3 Fontes de Fissão Nuclear

O isótopo com aplicação prática nesse tipo de fonte é a de  $^{252}\text{Cf}$  que decai tanto por fissão espontânea como por emissão alfa e possui meia-vida de 2,645 anos. Além disso, é um dos isótopos mais largamente produzidos dentre todos os transurânicos. O rendimento de nêutrons é na faixa de  $0,116 \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}$  por Becquerel (Bq), onde a atividade é a taxa de decaimento de fissão alfa e espontânea combinada. Na base de massa unitária, são produzidos  $2,3 \times 10^6 \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}$  por micrograma da amostra. Por isso, o encapsulamento das fontes de  $^{252}\text{Cf}$  é constituída em tamanho muito pequeno, comparada com outras fontes isotópicas de nêutrons (KNOLL, 2010; BYRNE, 2011).

Nesse tipo de fonte, um núcleo captura um nêutron e subsequentemente se separa em dois núcleos de massa aproximadamente iguais. O processo é acompanhado por uma enorme liberação de energia, tipicamente 200 MeV por fissão e emissão de mais dois ou três nêutrons rápidos. A aplicação prática desse tipo de reação ocorre em um reator nuclear e também em uma bomba nuclear, diferenciada somente pelo controle dessa reação, onde na primeira, a reação é completamente controlada e na segunda, a energia é liberada de forma descontrolada (BYRNE, 2011; ZAMBONI, 2007).

Alguns núcleos como  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{239}\text{Pu}$  sofrem fissão sob bombardeamento de nêutrons lentos enquanto outros, como  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{237}\text{Np}$  requerem nêutrons de pelo menos 1 MeV de energia. No urânio natural constituído de 99,3% de  $^{238}\text{U}$  e 0,7% de  $^{235}\text{U}$ , uma reação em cadeia é possível somente com nêutrons lentos. Pois, neste caso, a seção de choque da fissão com nêutrons lentos em  $^{235}\text{U}$  é suficiente para compensar todos os outros mecanismos de perda de nêutrons que não resultem em fissão. Portanto, é necessário misturar o urânio com um moderador cujo papel é reduzir a emissão de 2 ou 3 nêutrons rápidos por fissão e, portanto, controlar a reação em cadeia. Os moderadores comuns são água pesada ou grafite; a água comum também atua como um bom moderador desde que a perda de nêutrons através do processo  $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$  seja compensada por um enriquecimento adequado do combustível em  $^{235}\text{U}$  (BYRNE, 2011).

## 2.7 Encapsulamento de Fontes de Nêutrons

A norma da ISO 2919 estabelece um padrão internacional para caracterizar uma fonte radioativa selada, o seu encapsulamento e também, os métodos de teste de segurança para uma aplicação específica. Desta maneira, o material fonte de nêutrons de radionuclídeo é encapsulado de forma segura para conter os elementos ativos. As fontes comercialmente disponíveis são duplamente encapsuladas, suficientemente robustas e passam por vários testes rigorosos para avaliar e manter sua integridade (BARDELL, 1998; ISO 2919,1999).

Na avaliação de fontes seladas, o fabricante e o usuário devem levar em consideração a probabilidade de incêndio, explosão, corrosão, etc. E os possíveis resultados de tais eventos, como a perda de atividade da fonte, a quantidade de material contido na fonte selada, a radiotoxicidade, a forma química e física do material radioativo e também o local de armazenamento da fonte. Para as fontes de nêutrons, é recomendada pela ISO (1999) uma classificação do tipo 4 para o teste de temperatura, 3 para o teste de pressão, impacto e punção e 2 para o teste de vibração. Essa classificação define os procedimentos de cada teste que devem ser adotados para cada tipo de fontes selada como requisito mínimo de aceitação (ISO 2919,1999).

O composto utilizado para encapsular o material radioativo da fonte pode contribuir para a modificação da distribuição angular dos nêutrons emitidos e também do espectro de energia. Esse composto, portanto, deve ser selecionado com o objetivo de minimizar as seções transversais de captura e dispersão macroscópicas e ter a espessura uniforme e pequena em comparação com o diâmetro externo. A forma da fonte deve ser esférica ou cilíndrica, todavia as fontes comercialmente disponíveis têm forma cilíndrica, e algumas delas incorporam um meio de fixação, geralmente um rebaixo roscado ou talão, o que dificulta a forma da fonte. É preferível também que o diâmetro e o comprimento das fontes cilíndricas sejam aproximadamente iguais. (BARDELL, 1998)

O comprimento do caminho percorrido pelos nêutrons emitidos dentro da fonte e seu encapsulamento variam de acordo com o ângulo de emissão em relação ao eixo da fonte. Tanto o material de origem como o encapsulamento pode causar dispersão, resultando numa emissão não isotrópica de nêutrons em todas as direções, e, portanto, não pode ser considerada como fonte puntiforme. As fontes disponíveis na área nuclear e mais próximas da isotropia são as fontes de  $^{252}\text{Cf}$ , pois são encapsuladas em aço inoxidável fino e não possuem meios adicionais de fixação, além de uma razão entre altura e diâmetro mais próxima entre si. A Figura 1 ilustra os diferentes tipos de encapsulamento disponíveis e estabelecidos pela ISO (BARDELL, 1998).

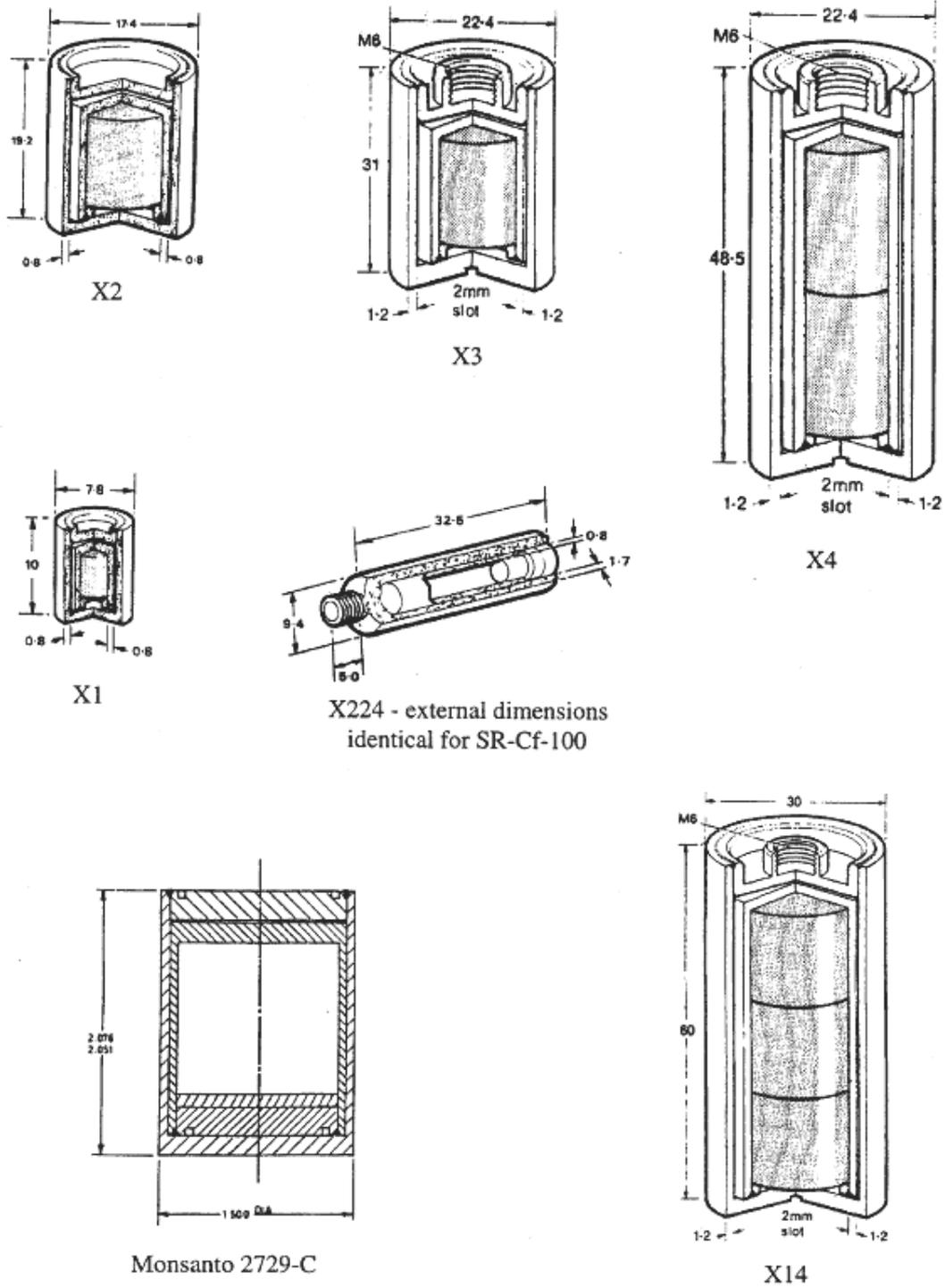


Figura 1. Representação esquemática de encapsulamento de fontes de nêutrons (BARDELL, 1998).

## 2.8 Princípios de Calibração com Fontes de Nêutrons

Fontes de nêutrons desempenham um papel importante em diversos setores da indústria, na exploração do petróleo, na medicina, nos estudos e em uma série de outras aplicações. Por isso, elas devem ser calibradas para serem usadas como fontes de referência na calibração de diversos instrumentos como dosímetros e medidores de taxa de dose para radiação de nêutrons com fins de proteção radiológica.

O sistema de calibração primária absoluto de fontes de nêutrons é conhecido como Banho de Sulfato de Manganês (BSM). Nesse sistema primário de medição, a taxa de emissão de nêutrons pode ser medida com bastante precisão, usando um processo bem compreendido que não contabiliza os nêutrons diretamente, mas sim detecta os fótons de raios gama emitidos pela sequência complexa de decaimento do manganês-56 ( $^{56}\text{Mn}$ ). Esses fótons surgem no final de um processo em que o manganês-55 ( $^{55}\text{Mn}$ ) captura um nêutron emitido pela fonte a ser calibrada e se transforma em  $^{56}\text{Mn}$ . Este isótopo não é estável, e decai em ferro-56 ( $^{56}\text{Fe}$ ) em um estado excitado. Quando o átomo de ferro decai para o seu estado de energia inferior, ele emite um raio gama, podendo então, ser determinada a taxa de emissão da fonte de nêutrons (BOUTIN, 2017).

Além do BSM também é possível realizar a calibração de fontes de nêutrons de forma não absoluta utilizando um equipamento denominado PLC. Este equipamento é utilizado também na determinação da anisotropia de fontes de nêutrons do LN.

A ISO 8529 (2001) descreve as características e métodos de produção das radiações de nêutrons de referência a serem utilizadas para calibrações, assim como o campo de radiação e os procedimentos de calibração. As fontes de referência são  $^{252}\text{Cf}$  com água pesada ( $T_{1/2}$ : 2,65 anos),  $^{252}\text{Cf}$  ( $T_{1/2}$ : 2,645 anos),  $^{241}\text{Am-B}$  ( $T_{1/2}$ : 433 anos)  $^{241}\text{Am-Be}$  ( $T_{1/2}$ : 433 anos). A cada cinco anos, os laboratórios de referência devem calibrar a fonte dentro de uma incerteza padrão relativa na faixa de 1,5% antes de serem utilizadas, pois podem haver variações quanto à atividade da fonte de nêutrons.

### 2.8.1 Procedimento de Calibração

O conhecimento da grandeza da taxa de fluência de nêutrons ( $n \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2}$ ), que é o número de partículas emitidas ou transferidas por segundo, é de importância fundamental para estudos relacionados aos danos causados pela radiação de nêutrons, para o cálculo de blindagem e também para a calibração. A taxa de fluência para calibração deve ser rastreável para um padrão nacional reconhecido, através da rastreabilidade das medições alcançada por meio de um instrumento de transferência que também deve ser calibrado.

A ISO 8529 (2001) detalha os procedimentos para a calibração de dispositivos de medição de nêutrons, considerando a taxa de equivalência de dose, o espectro da fonte ou o ângulo de incidência dos nêutrons, no entanto, sendo independente em relação à técnica usada na calibração, os fatores distância fonte-detector e o tamanho da sala onde é realizada a calibração. Nesse caso, o instrumento a ser calibrado é exposto ao campo de nêutrons com a taxa de fluência conhecida. A leitura do instrumento ao campo deve ser corrigida para todos os efeitos de dispersão de nêutrons, provocados pelo ar, pelas paredes da sala de calibração e também pelo piso e teto. Sobre os efeitos de dispersão, a ISO 8529 (2001) também situa algumas características importantes em relação a esses efeitos devido:

- Fonte: deve ser esférica ou cilíndrica com diâmetro e comprimento iguais e o seu encapsulamento deve estar em conformidade com os padrões nacionais e internacionais para a integridade da mesma. Além disso, para fontes cilíndricas, o detector deve ser calibração em  $\theta=90^\circ$  em relação ao eixo cilíndrico da fonte. A anisotropia deve ser medida para cada fonte;
- Suporte: o suporte onde a fonte deve ser colocada para realizar a calibração deve estar posicionado no centro da sala e o mais alto possível do chão. Sua estrutura deve ser formada de materiais não hidrogenados.
- Sala de irradiação: o tamanho, a forma e os materiais usados na construção da sala podem aumentar ou diminuir as contribuições de dispersão. Portanto, a sala deve possuir grandes dimensões e ser construída com materiais de baixa densidade;

- Atenuação do ar: os nêutrons emitidos pela fonte podem ser atenuados por reações nucleares com o ar. Esse efeito de dispersão se intensifica à medida que a distância entre a fonte e o detector aumenta;
- Efeito espectral: para todas as contribuições de dispersão, a distribuição espectral e angular é diferente da distribuição do espectro de origem. Assim, a contribuição relativa da radiação dispersa para a leitura do dispositivo depende da energia e da dependência angular da resposta do dispositivo.
- Efeito da radiação por fóton: a resposta do dispositivo aos fótons deve ser determinada e uma possível correção aplicada. Além disso, também deve ser determinado se a presença de fótons afeta a resposta do dispositivo aos nêutrons. A resposta aos raios gama deve ser determinada com uma fonte de raios gama de  $^{137}\text{Cs}$  ou de  $^{60}\text{Co}$ .

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Determinação dos parâmetros para a Medição de Anisotropia

Para a medição do fator de anisotropia, é necessário considerar alguns fatores, como o encapsulamento e o tipo de fonte de nêutrons, a sala, o tipo de detector, a distância fonte-detector e o sistema mecânico de rotação para a avaliação da anisotropia da fonte de nêutrons em estudo.

##### 3.1.1 Fontes de Nêutrons do LN

Um formato ideal de fonte a ser usada para calibração é aquele em que se aproxima de uma fonte puntiforme com emissão isotrópica. Entretanto, as fontes de nêutrons comercialmente disponíveis geralmente possuem formato cilíndrico e com os componentes radioativos duplamente encapsulados com materiais leves, geralmente aço inoxidável ou zircônio para evitar qualquer vazamento e minimizar a correção de nêutrons espalhados no material. Todavia, mesmo seguindo normas nacionais e internacionais, variações na espessura dos materiais no processo de encapsulamento das fontes de nêutrons fazem com que a emissão ocorra de forma anisotrópica, devido à dispersão elástica e inelástica sofrida pelos nêutrons. Além da geometria de como o material radioativo é encapsulado, quanto maior a diferença entre o comprimento do cilindro e o diâmetro da fonte, maior será a diferença na intensidade da emissão de nêutrons em relação ao eixo da fonte, resultando numa emissão anisotrópica de nêutrons.

A determinação da emissão anisotrópica das fontes de nêutrons usadas no LN foi as fontes de  $^{241}\text{Am-Be}$  e  $^{238}\text{Pu-Be}$ . Algumas especificações dessas fontes podem ser observadas na Tabela 4.

Tabela 4. Especificação das fontes de nêutrons do LN

Fonte	Encapsulamento	Atividade ( $10^9$ Bq)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)
$^{241}\text{Am-Be}$	SN3	37	30	30
$^{241}\text{Am-Be}$	SN4	185	35	35
$^{241}\text{Am-Be}$	-	592	31	105
$^{238}\text{Pu-Be}$	-	1850	-	-

### **3.1.2 Salão de Baixo Espalhamento do LN**

O Laboratório de Baixo Espalhamento (LBE) do LNMRI/LN possui dimensões laterais de 7,8 m x 18 m por 6 m de altura do piso ao teto a fim de minimizar o espalhamento, o LBE é constituído de materiais com número atômico baixo de forma a interagirem pouco com os nêutrons, as paredes são feitas de placas de isopor e de alumínio em esquema de sanduíche, composto por aço, isopor e aço. O teto é de telha de alumínio com forro de isopor. O salão segue as recomendações da ISO (2000) em relação às dimensões físicas que um salão de baixo espalhamento deve possuir a fim de que seja minimizada a contribuição do espalhamento (FREITAS, 2012; LNMRI/LN, 2017).

Entretanto, mesmo a sala possuindo grandes dimensões, ser construída com materiais de baixa densidade, ter o sistema fonte-detector posicionado o mais elevado possível do solo e uma quantidade mínima de materiais espalhadores na sua vizinhança, certa fração dos nêutrons da fonte será espalhada no detector a partir das paredes e das estruturas da sala. Para avaliar a influência do espalhamento e quantificar a sua contribuição, pode-se usar um cone de sombra entre a fonte e o detector. O cone ao bloquear a passagem direta de nêutrons da fonte para o detector permite obter somente a taxa de contagem oriunda ao feixe espalhado de nêutrons. Subtraindo, então, a leitura do detector com o uso do cone de sombra e a leitura sem o cone, obtêm-se a taxa de contagem corrigida apenas ao feixe direto. As correções também são aplicadas para o tempo morto (BARDELL, 1998. FREITAS, 2012).

### **3.1.3 Detector PLC**

A descrição de um procedimento padrão de medição de anisotropia em fontes de nêutrons pode ser realizada usando o detector do tipo PLC que consiste essencialmente em um conjunto de moderador cilíndrico de polietileno com um detector  $\text{BF}_3$  para nêutrons lentos, disposto ao longo do seu eixo. As principais vantagens deste contador para a medição da fluência de nêutrons e, conseqüentemente, para calibração é que ele possui uma alta eficiência para detecção rápida de nêutrons, uma resposta relativamente uniforme aos

nêutrons de diferentes energias e uma boa discriminação de raios gama (MASSAND, 1972).

### 3.1.4 Sistema Mecânico de Rotação de Fontes

As medições de anisotropia foram realizadas utilizando um sistema mecânico de rotação de fontes controlado eletronicamente e útil para evitar repetidas aproximações do operador com a fonte em cada medição. Esse sistema é composto por um motor de passo de quatro fases (NEMA 17), com 200 passos por volta, acoplado a uma caixa de redução (redução aproximada de 25:1). Para o controle do motor foi utilizada uma placa controladora (driver) e uma placa ARDUINO, que proporciona a interface computador/motor. Além de um programa específico do ARDUINO que foi desenvolvido para a movimentação do motor. O sistema mecânico de rotação é representado na Figura 2.



Figura 2. Sistema mecânico de rotação de fontes

O eixo da fonte foi orientado de forma que pudesse estar alinhado ao detector e a fonte foi posicionada no sistema mecânico de rotação, o que permitiu que a fonte pudesse ser girada a partir do ângulo de 0° até 180° ou 360°.

### 3.1.5 Distância Fonte-Detector

A distância entre a fonte e o detector é convencionalmente definida para cerca de 2 m. Há algumas considerações que justificam a escolha dessa distância, pois quanto mais próximo o contador estiver da fonte, menor será o tamanho da correção da dispersão e melhor será a precisão estatística obtida em um período de contagem.

### 3.1.6 Cálculos envolvidos na Determinação de Anisotropia de Fontes de Nêutrons

Na ausência de qualquer meio de dispersão, a taxa de fluência de nêutrons,  $\phi$ , em um ângulo  $\theta$ , medido em relação ao eixo do cilindro a um determinado ponto de calibração numa distância  $L$  do centro da fonte, cuja taxa de emissão total absoluta é  $B$  e  $F_1(\theta)$  é o fator de anisotropia, é representada pela expressão (1) (em  $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ):

$$\phi(L, \theta) = \frac{B F_1(\theta)}{4\pi L^2} \quad (1)$$

Se a emissão de nêutrons de uma fonte cilíndrica não depender do ângulo azimutal  $\alpha$ , mas somente sobre o ângulo  $\theta$ , uma vez que a emissão de nêutrons varia menos para a direção perpendicular ao eixo ( $\theta=90^\circ$ ), aplica-se então a expressão (2) em qualquer prática de calibração:

$$B = 2\pi L^2 \int_{\theta=0}^{\pi} \phi(L, \theta) \sin \theta d\theta \quad (2)$$

Experimentalmente, isso pode ser determinado usando um detector do tipo PLC numa distância de 2 metros do centro da fonte. O fator de anisotropia  $F_1(\theta)$  é definido a partir da substituição da expressão (1) na expressão (2) que resultará na equação (3). As medições devem realizadas com variações de dez graus ou menos.

$$F_I(\theta) = \frac{2\phi(L, \theta)}{\int_{\theta=0}^{\pi} \phi(L, \theta) \sin \theta d\theta} \quad (3)$$

A integral pode ser substituída pela soma dos fatores de anisotropia  $F_I(\theta_\alpha)$ , pois ambas as funções na integração apresentam-se contínuas dentro dos limites de integração. Para cada ângulo de medição  $\theta_\alpha$ . Onde  $C(L, \theta_i)$  é a taxa de contagem no ângulo  $\theta_i$  corrigida para os efeitos de tempo morto numa distância  $L$  e aplicado para todos os ângulos entre  $(\theta_{i-1} + \theta_i)/2$  e  $(\theta_i + \theta_{i+1})/2$ . Sendo assim, modificando a equação (3) para a equação (4) pode-se avaliar os coeficientes de anisotropia num ângulo  $\Theta_\alpha$  a partir do eixo da fonte.

$$F_I(\theta_\alpha) = \frac{2C(L, \theta_\alpha)}{\sum_{i=1}^n C(L, \theta_i) \times \left[ \cos\left(\frac{\theta_{i-1} - \theta_i}{2}\right) - \cos\left(\frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2}\right) \right]} \quad (4)$$

Onde:

$\Theta_\alpha$ : ângulo de interesse para cada medição;

$\Theta_i$ : ângulo para cada medição "i", que vai de 1 a 19, assumindo valores a partir de  $\theta_i = (i - 1) \times 10^\circ$ ;

$F_I(\theta_\alpha)$ : Coeficiente de anisotropia da fonte num ângulo  $\alpha$ ;

$C(L, \theta_i)$ : Taxa de contagem obtida numa distância  $L$  a partir do PLC;

$C(L, \theta_\alpha)$ : Taxa de fluência de nêutrons em uma posição  $(L, \theta)$  em relação ao centro da fonte para a mesma distância  $L$  de uma fonte isotrópica com a mesma taxa de emissão total.

A determinação do fator de anisotropia no ângulo de  $90^\circ$  em relação ao eixo cilíndrico da fonte tem uma importância maior por ser a direção mais usada para a calibração do detector e ter uma variação mínima de emissão com o ângulo. Portanto, é desejável fazer medições extras nesta direção para  $F_I(\theta=90^\circ)$  a fim de reduzir a incerteza estatística.

### 3.2 Determinação do fator de Anisotropia de uma Fonte de Nêutrons

A descrição de um procedimento padrão de medição de anisotropia para fontes de nêutrons é baseada em medições de anisotropia realizadas no Laboratório de Metrologia de Nêutrons usando um detector do tipo PLC.

A medição da emissão de nêutrons ocorre em função do ângulo polar  $\theta$  entre a direção do detector e o eixo da fonte (Figura 3). Sendo assim, a medição de anisotropia é realizada a partir do alinhamento horizontal da fonte com o detector a uma distância de 2 metros. O eixo da fonte deve ser orientado de forma que possa estar alinhado ao detector e a fonte posicionada no sistema mecânico de rotação. Em seguida, a fonte é rotacionada a partir de  $0^\circ$  até  $180^\circ$ . São realizadas 19 medições, variando em ângulos de  $10^\circ$ . O fluxograma do procedimento pode ser analisado na Figura 4.

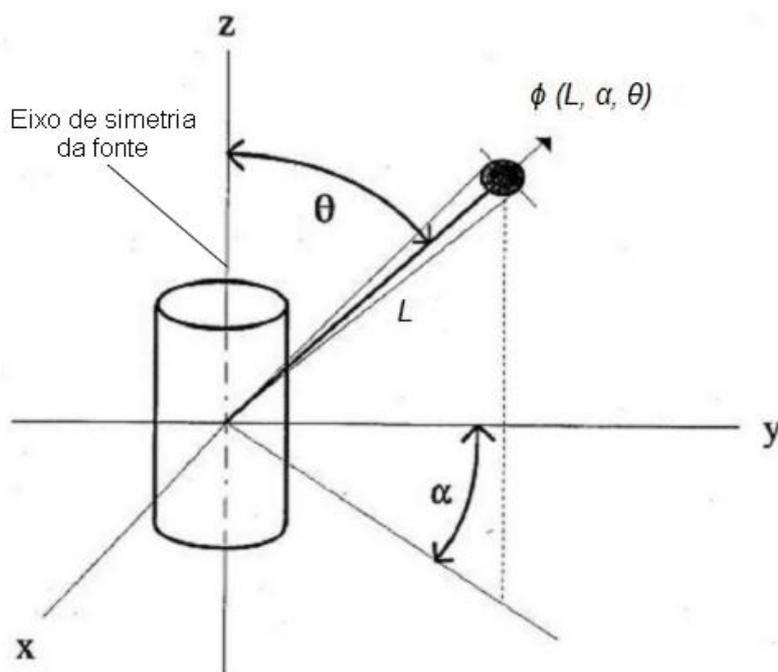


Figura 3. Sistema de coordenadas de uma fonte cilíndrica com emissão anisotrópica.  
(ISO, 2001)

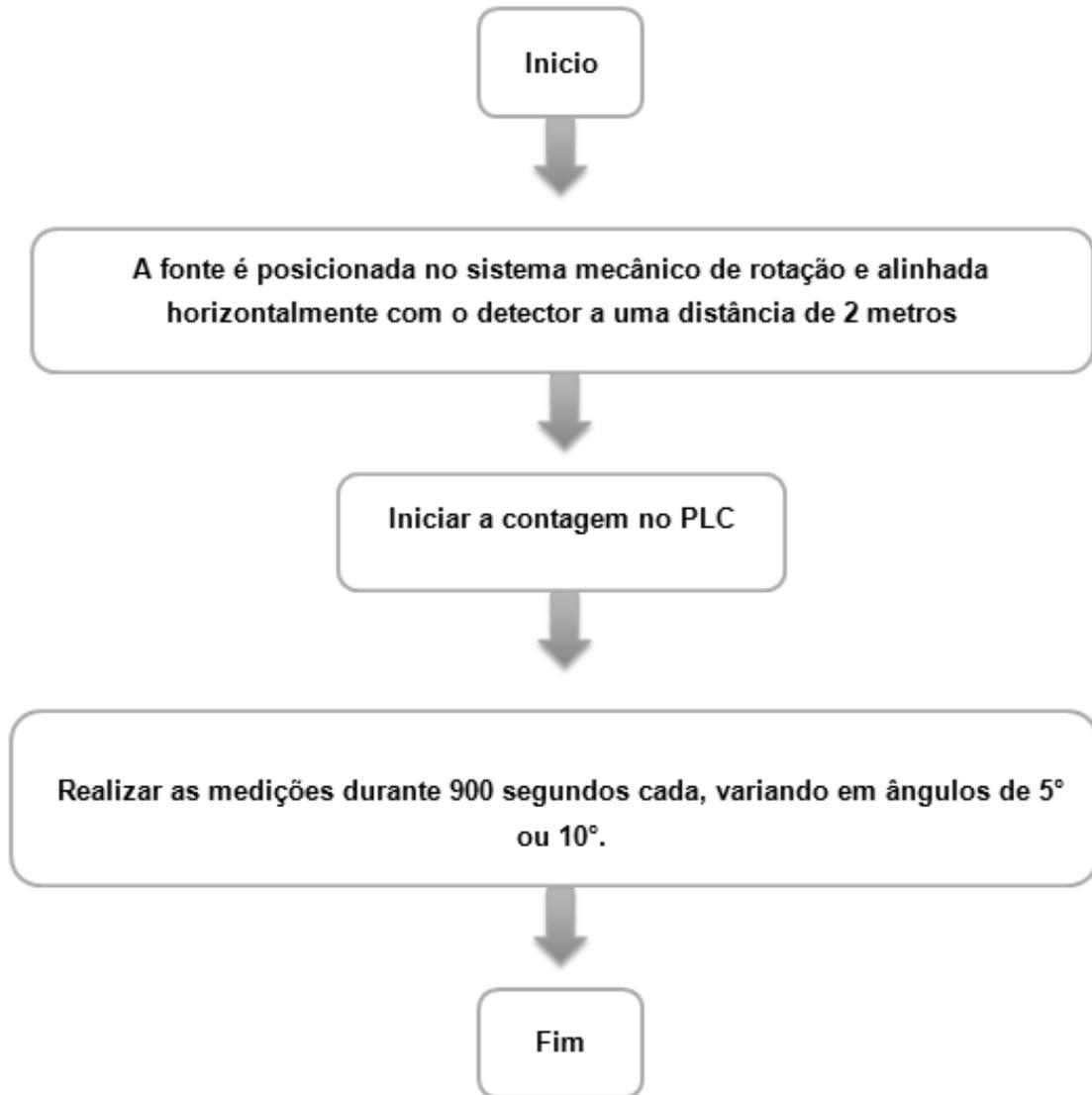


Figura 4. Fluxograma representando o procedimento para determinação da Anisotropia de fontes de nêutrons

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a equação de anisotropia, foram obtidos os coeficientes de anisotropia nos respectivos ângulos. Os resultados das medições experimentais do fator de anisotropia das diferentes fontes de nêutrons de  $^{241}\text{AmBe}$  e de  $^{238}\text{PuBe}$  do LN estão representadas graficamente pelas Figuras 5 a 9 e seus respectivos valores indicados pelas Tabelas 5 a 8. A partir da análise dos resultados dos coeficientes de anisotropia, é possível observar que os maiores valores obtidos foram devidos às maiores razões entre o diâmetro e a altura das fontes (tabela 4).

Para que uma fonte seja considerada como sendo uma fonte pontual, ela deve apresentar o valor de 1 em cada ângulo de medição. Portanto, valores abaixo ou superiores a 1 indicam o fator anisotrópico da fonte de nêutrons analisada.

### 4.1 $^{241}\text{AmBe}$ 37 GBq

Os coeficientes de anisotropia de cada ângulo da fonte de nêutrons de  $^{241}\text{AmBe}$  37 GBq pode ser analisados no grafico 5 e na tabela 5. Os valores apresentaram variação na emissão de nêutrons em relação ao eixo axial da fonte, e portanto ela não é considerada como sendo uma fonte pontual, pois não apresenta o valor de 1 em cada ângulo de medição. Seu valor de anisotropia, portanto, é definido como 2,36%.

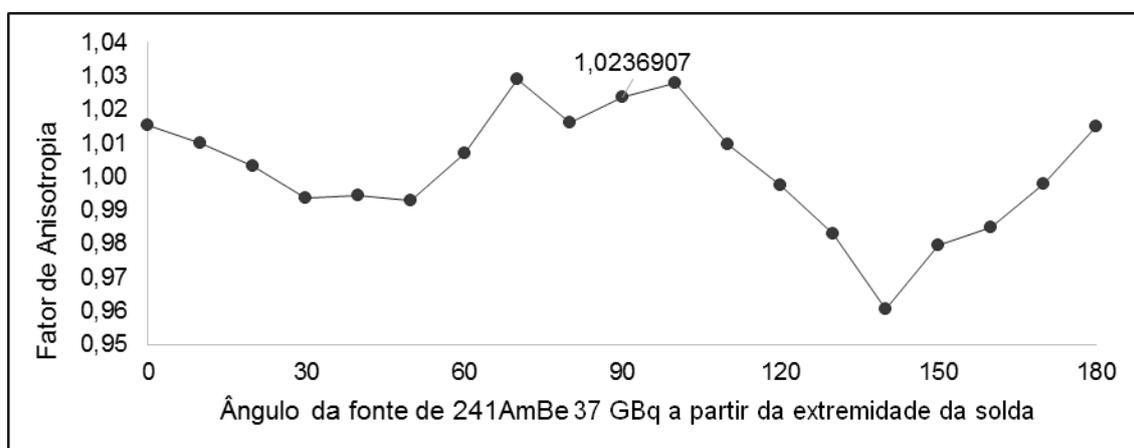


Figura 5. Fatores de anisotropia para a fonte de nêutrons encapsulada de  $^{241}\text{AmBe}$  37 GBq, referentes aos dados da Tabela 5.

Tabela 5. Fatores de anisotropia para uma fonte de nêutrons encapsulada de  $^{241}\text{AmBe}$  37 GBq. A medição foi realizada em intervalos de  $10^\circ$ .

$^{241}\text{AmBe}$ 37 GBq (SN3)	
Ângulo $\theta^\circ$	$F_i(\theta)$
0	1,0155
10	1,0100
20	1,0033
30	0,9938
40	0,9942
50	0,9927
60	1,0071
70	1,0290
80	1,0160
90	1,0236
100	1,0279
110	1,0095
120	0,9972
130	0,9830
140	0,9605
150	0,9797
160	0,9850
170	0,9977
180	1,0151

#### 4.2 $^{241}\text{AmBe}$ 185 GBq

Os coeficientes de anisotropia de cada ângulo da fonte de nêutrons de  $^{241}\text{AmBe}$  185 GBq podem ser analisados no grafico 6 e na tabela 6. Os valores apresentaram variação na emissão de nêutrons em relação ao eixo axial da fonte, principalmente entre os angulos  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , e portanto ela não é considerada como sendo uma fonte puntiforme. Seu valor de anisotropia é de 2,76%.

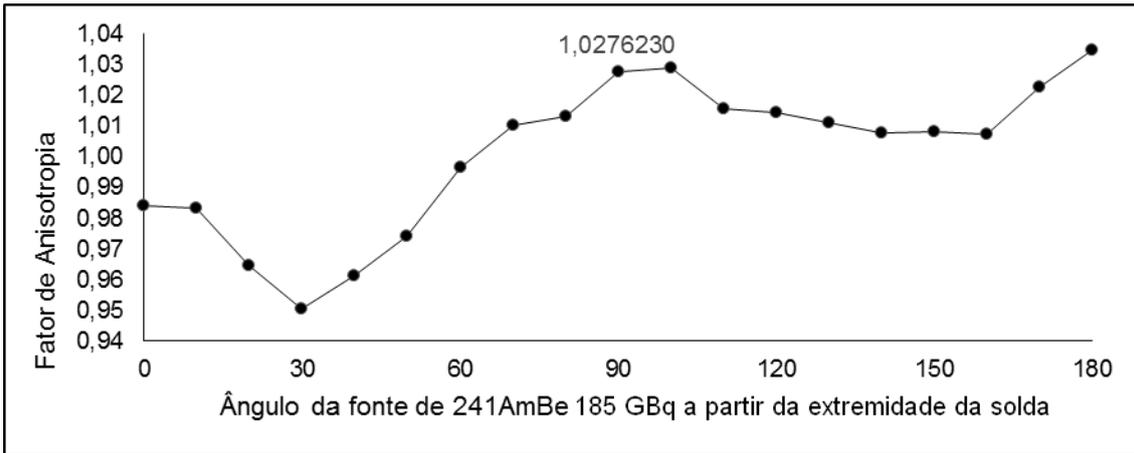


Figura 6. Fatores de anisotropia para a fonte de nêutrons encapsulada de  $^{241}\text{AmBe}$  185 GBq, referentes aos dados da Tabela 6.

Tabela 6. Fatores de anisotropia para uma fonte de nêutrons encapsulada de  $^{241}\text{AmBe}$  185 GBq. A medição foi realizada em intervalos de  $10^\circ$ .

$^{241}\text{Am-Be 185 GBq}$	
Ângulo $\theta^\circ$	$F_I(\theta)$
0	0,9842
10	0,9832
20	0,9647
30	0,9506
40	0,9614
50	0,9741
60	0,9967
70	1,0104
80	1,0133
90	1,0276
100	1,0290
110	1,0157
120	1,0142
130	1,0111
140	1,0078
150	1,0084
160	1,0074
170	1,0229
180	1,0348

### 4.3 $^{241}\text{AmBe}$ 592 GBq

Os resultados mostraram variação uniforme de anisotropia com o ângulo. Sua anisotropia foi determinada em 8,65% devido às variações na estrutura do material radioativo e maior razão entre a altura e o raio de seu encapsulamento cilíndrico.

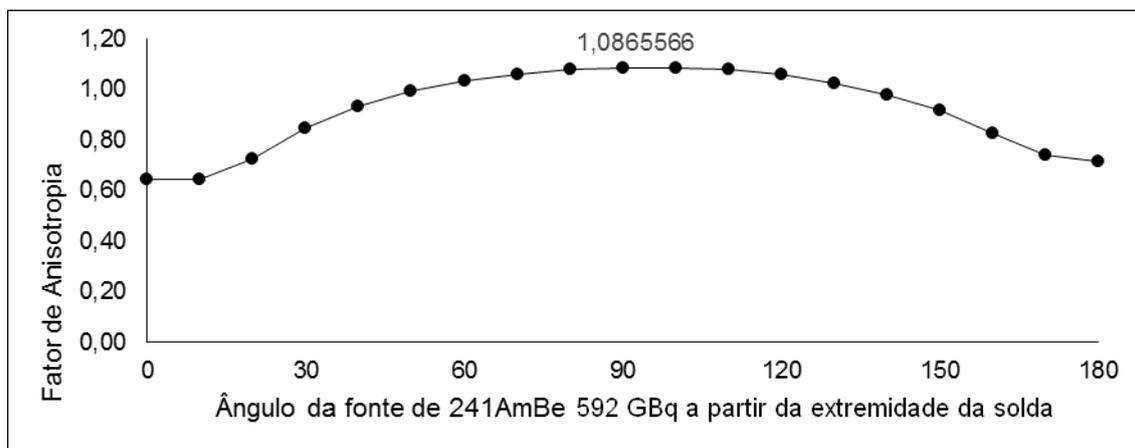


Figura 7. Fatores de anisotropia para a fonte de nêutrons encapsulada de  $^{241}\text{AmBe}$  592 GBq, referentes aos dados da Tabela 7.

Tabela 7. Fatores de anisotropia para uma fonte de nêutrons encapsulada de  $^{241}\text{AmBe}$  592 GBq. A medição foi realizada em intervalos de  $10^\circ$ .

$^{241}\text{Am-Be}$ 592 GBq	
Ângulo $\theta^\circ$	$F_I(\theta)$
0	0,6460
10	0,6439
20	0,7276
30	0,8456
40	0,9330
50	0,9932
60	1,0372
70	1,0586
80	1,0806
90	1,0865
100	1,0848
110	1,0792
120	1,0603
130	1,0266
140	0,9778
150	0,9178
160	0,8256
170	0,7405
180	0,7169

#### 4.4 $^{238}\text{PuBe}$ 1,85 TBq

O fator de anisotropia foi determinado em 4,35%. Os resultados mostraram que a fonte de  $^{238}\text{PuBe}$ , mesmo tendo maior atividade, possui menor fator de anisotropia comparado com a fonte de  $^{241}\text{AmBe}$  592 GBq, pois a razão entre a altura e o diâmetro está mais próxima de 1.

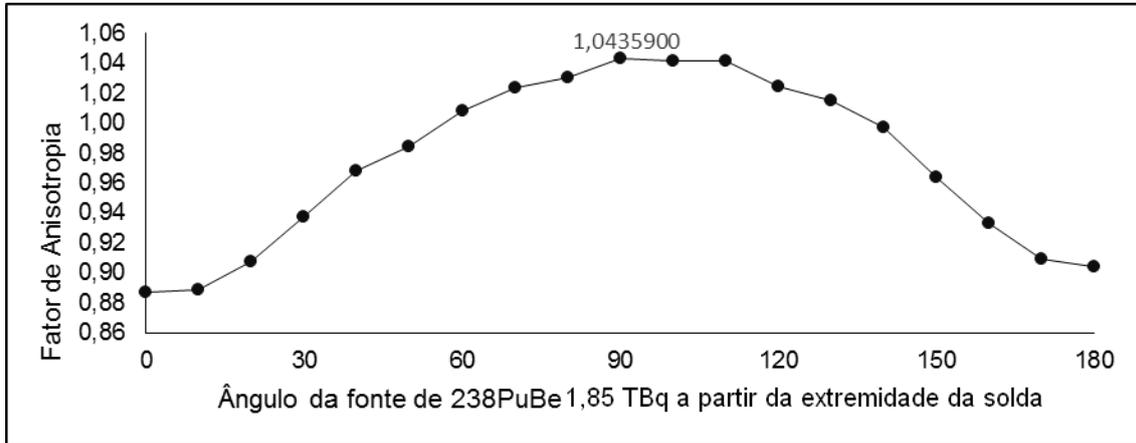


Figura 8. Fatores de anisotropia para a fonte de nêutrons encapsulada de  $^{238}\text{PuBe}$  1,85 TBq, referentes aos dados da Tabela 8.

Tabela 8. Fatores de anisotropia para uma fonte de nêutrons encapsulada  $^{238}\text{PuBe}$  1,85 TBq. A medição foi realizada em intervalos de  $10^\circ$ .

$^{238}\text{Plutônio-Berílio 1,85 TBq}$	
Ângulo $\theta^\circ$	$F_i(\theta)$
0	0,8871
10	0,8887
20	0,9077
30	0,9372
40	0,9682
50	0,9843
60	1,0085
70	1,0240
80	1,0307
90	1,0435
100	1,0417
110	1,0416
120	1,0244
130	1,0149
140	0,9972
150	0,9637
160	0,9333
170	0,9088
180	0,9037

## 5. CONCLUSÃO

Considerando que as fontes de radionuclídeos são amplamente utilizadas para calibrar dispositivos sensíveis a nêutrons, o conhecimento do fator de anisotropia na emissão de uma fonte de nêutrons a partir deste procedimento pode representar uma contribuição para a diminuição da incerteza na fluência de nêutrons em um dispositivo. E em algumas situações, é necessária a mais alta precisão, como por exemplo, na medição e padronização da fluência de nêutrons monoenergéticos.

Ainda que nas calibrações seja convencionalmente considerada como limite adequado uma faixa entre 5 a 10%, as avaliações das incertezas relacionadas à calibração de instrumentos devem estar de acordo nas intercomparações com outros laboratórios. Sendo assim, um procedimento de medição que leve em consideração o fator de anisotropia de fontes de nêutrons contribuirá para a solução de alguns problemas, particularmente com relação às grandes incertezas associadas à dosimetria de nêutrons para radioproteção. Beneficiando assim tanto os profissionais da área de radioproteção quanto aqueles que estão expostos a campos de nêutrons, além de servir para ampliar os padrões de nêutrons no Laboratório de Metrologia de Nêutrons e contribuir nos resultados relativos ao sistema de calibração secundário de fontes de nêutrons de laboratórios que utiliza o PLC.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATTIX, F. H. **Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry**. 1ed. Madison, Wisconsin. USA. University of Wisconsin Medical School. 2004.

BARDELL, A. G., BURKE, M., HUNT, J. B., TAGZIRIA, H. e THOMAS, D. J., **Anisotropy of Emission from Radionuclide Neutron Sources**, NPL Report CIRM 24, December. 1998.

BOUTIN. C. **Calibrating the Calibrator: The National Standard Neutron Source**. Disponível em: <<https://www.nist.gov/news-events/news/2017/01/calibrating-calibrator-national-standard-neutron-source-2017>>. Acessado em 05 de julho de 2017.

British Nuclear Energy Society. **Radiation dose management in the nuclear industry**. 2nd International Conference on Remote Techniques for Nuclear Plants, Stratford-upon-Avon (United Kingdom). Pag. 71 -73, 260f. 1995

BYRNE, J. **Neutrons, Nuclei and Matter: An Exploration of the Physics of Slow Neutrons**. 1ª ed. Philadelphia, USA. Institute of Physics, 2011

CURTISS, L. F. **Introduction to Neutron Physics**. Princeton, Van Nostrand. 1ed. 1959.

SILVA, F. S. **Irradiador Portátil com uma Fonte de Plutônio-Berílio para Medições de Eficiência do Banho de Sulfato de Manganês**. 116f. Dissertação (Mestrado em Radioproteção e Dosimetria.) – Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Rio de Janeiro, BR. 2016

EISENHAUER, C. M., HUNT, J. B. e SCHWARTZ, R. B. **Calibration techniques for neutron personal dosimetry**. Radiat. Prot. Dosim. Vol.10 n°.1-4. Pag.43-57. 1958

FRATIN, L. **Dosimetria de nêutrons**. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de física. Universidade de São Paulo, São Paulo, BR. 1993

FREITAS, B.M. **Estudo da contribuição de espalhamento na determinação do valor do equivalente de dose individual para irradiação de monitores**

**individuais de nêutrons em fontes de  $^{241}\text{Am}$ -Be no Salão de Baixo Espalhamento do Laboratório de Nêutrons do Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações ionizantes.** Monografia (Bacharelado em Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, BR. 2012.

HAWKES, N. P., FREEDMAN, R. TAGZIRIA, H. e THOMAS, D.J. **Measurement and calculation of the emission anisotropy of an  $X1\ ^{525}\text{Cf}$  Neutron Source.** Radiat. Prot. Dosim. Vol.126 n°.1-4. Pag.78-82. 2007

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO, **Radiation protection - Sealed radioactive sources: General requirements and classification.** ISO 2919. 2ed. Geneva. 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO, **Reference neutron radiation- part 1: Characteristics and methods of production.** ISO 8529-1, 1ed. Geneva. 2001.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO, **Reference neutron radiation- part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field.** ISO 8529-2, 1ed. Geneva. 2000

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement.** 4rd ed., USA, Wiley. 2010

KOWATARI, M., ONUMA, I., TANIMURA, Y., KAWASAKI K., SAEGUSA, J. e YOSHIZAWA, M. **Determination of the Anisotropic Emission Factor for Neutrons from  $^{241}\text{Am}$ -Be Source.** Radioisotopes. Vol. 57. N°9. 559-569. 2008.

LEITE, S. P. **Estudo de um Sistema Alternativo para Determinação da Eficiência do Banho de Sulfato de Manganês.** Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro, BR. 2010

LN/LNMRI – **Laboratório de Baixo Espalhamento.** Disponível em <[http://ln.ird.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=54&Itemid=53](http://ln.ird.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=54&Itemid=53)>,

acessado em 20 de julho de 2017

MASSAND, O. P. **Investigation of Some Properties of the Precision Long Counter**. Commission of the European Communities. CBNM, Luxembourg. pag. 6-7 60f. 1972.

PANGHER, J., NICHOLS, L.L., A. **Precision Long Counter For Measuring Fast Neutron Flux Density**. In: Report BNWL-260, Pacific Northwest Laboratory. 1966.

TAGZIRIA. H.,ROBERTS, N., BENNETT, A. e THOMAS, D. J. **Calibration and Monte Carlo Modelling of the NPL Long Counters at 22.8 keV**. NPL Report CIRM 48. 2001.

TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. 10<sup>a</sup> revisão, IRD/CNEN, Rio de Janeiro, p. 344, 2014.

TERREMOTO, L. A. A. **Fundamentos de Tecnologia Nuclear: Reatores**. Divisão de Ensino – Secretaria de Pós-Graduação. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, BR. 2004

ZAMBONI, C. B., **Fundamentos da Física de Nêutrons**, Livraria da Física, São Paulo, Brasil. 2007.

## **APÊNDICE**

### **Proposta para Procedimento de Determinação do Fator de Anisotropia de Fontes de Nêutrons no Sistema de Qualidade do Laboratório de Nêutrons**

Neste apêndice é apresentado uma proposta de procedimento a fim de determinar experimentalmente o fator de anisotropia de fontes de nêutrons usadas no Laboratório de Metrologia de Nêutrons, com o intuito de contribuir para os resultados do sistema de calibração secundária de fontes de nêutrons.

## SUMÁRIO

- 1 OBJETIVO
  - 2 CAMPO DE APLICAÇÃO
  - 3 DOCUMENTOS COMPLEMENTARES
  - 4 TERMINOLOGIA, SIGLAS E ABREVIATURAS
  - 5 PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DE ANISOTROPIA
  - 6 REGISTROS
  - 7 BIBLIOGRAFIA
- 

### 1 OBJETIVO

Descrever o procedimento de medição do fator de anisotropia de fontes de nêutrons utilizando o *Precision Long Counter* (PLC)

### 2 CAMPO DE APLICAÇÃO

Este procedimento se aplica ao Laboratório de Metrologia de Nêutrons/LNMRI no processo de determinação de anisotropia de fontes..

### 3 DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

ISO 8529                    International Organization for Standardization

CIRM 24                    Centre for Ionising Radiation Metrology

MONOGRAFIA            Procedimento para medição de Anisotropia de Fontes de Nêutrons

### 4 TERMINOLOGIA, SIGLAS E ABREVIATURAS

LNMRI: Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes

LN: Laboratório de Metrologia de Nêutrons

LBE: Laboratório de Baixo Espalhamento

PLC: Precision Long Conter

### 5 PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DE ANISOTROPIA

#### 5.1 METODOLOGIA

---

### 5.1.1 Grandeza a ser medida

A grandeza a ser medida é expressa pela mudança na emissão de nêutrons, em fluência, em função da dependência angular para uma distância fixa.

### 5.1.2 Princípios Básicos da Medição

Na ausência de qualquer meio de dispersão, a taxa de fluência de nêutrons,  $\phi$ , em um ângulo  $\theta$ , medido em relação ao eixo do cilindro a um determinado ponto de calibração numa distância  $L$  do centro da fonte, cuja taxa de emissão total absoluta é  $B$  e  $F_1(\theta)$  é o fator de anisotropia, é representada pela expressão(1) e sua unidade é dada em  $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$ :

$$\phi(L, \theta) = \frac{B F_1(\theta)}{4\pi L^2} \quad (1)$$

Em que:

$\phi(\theta, L)$ : Anisotropia em função do ângulo e da distância

$B$ : Taxa de emissão total absoluta

$F_1(\theta)$ : Fator de anisotropia

$4\pi L$ : Expressão relacionada a área superficial à uma distância  $L$  da fonte.

Se a emissão de nêutrons de uma fonte cilíndrica não depender do ângulo azimutal  $\alpha$ , mas somente sobre o ângulo  $\theta$ , aplica-se então a expressão (2) em qualquer prática de calibração:

$$B = 2\pi L^2 \int_{\theta=0}^{\pi} \phi(L, \theta) \sin \theta d\theta \quad (2)$$

Onde:

$B$ : Taxa de emissão total absoluta.

$\Phi$ : ângulo azimutal compreendido no intervalo  $[0, 2\pi]$

$L$ : distância até o centro da fonte

---

$\theta$ : ângulo polar compreendido no intervalo de  $[0, 2\pi]$

O fator de anisotropia  $F_1(\theta)$  é definido a partir da substituição da expressão (1) na expressão (2) que resultará na equação (3). As medições devem realizadas com variações de dez graus ou menos.

$$F_1(\theta) = \frac{2\phi(L, \theta)}{\int_{\theta=0}^{\pi} \phi(L, \theta) \sin \theta d\theta} \quad (3)$$

A integral pode ser substituída pela soma dos fatores de anisotropia  $F_1(\theta_\alpha)$ , pois ambas as funções na integração apresentam-se contínuas dentro dos limites de integração. Para cada ângulo de medição  $\theta_\alpha$ . Onde  $C(L, \theta_i)$  é a taxa de contagem no ângulo  $\theta_i$  corrigida para os efeitos de tempo morto numa distância  $L$  e aplicado para todos os ângulos entre  $(\theta_{i-1} + \theta_i)/2$  e  $(\theta_i + \theta_{i+1})/2$ . Sendo assim, modificando a equação (3) para a equação (4) pode-se avaliar os coeficientes de anisotropia num ângulo  $\Theta_\alpha$  a partir do eixo da fonte.

$$F_1(\theta_\alpha) = \frac{2C(L, \theta_\alpha)}{\sum_{i=1}^n C(L, \theta_i) \times \left[ \cos\left(\frac{\theta_{i-1} - \theta_i}{2}\right) - \cos\left(\frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2}\right) \right]} \quad (4)$$

Onde:

$\Theta_\alpha$ : ângulo de interesse para cada medição;

$\Theta_i$ : ângulo para cada medição "i", que vai de 1 a 19, assumindo valores a partir de  $\theta_i = (i - 1) \times 10^\circ$ ;

$F_1(\theta_\alpha)$ : Coeficiente de anisotropia da fonte num ângulo  $\alpha$ ;

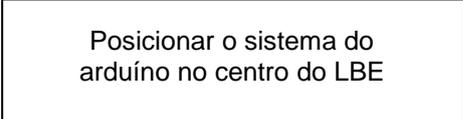
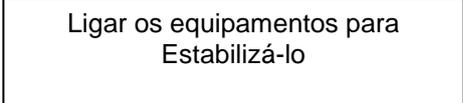
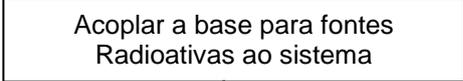
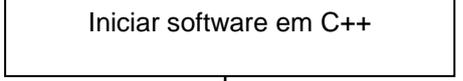
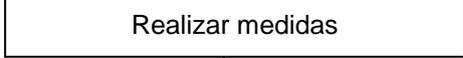
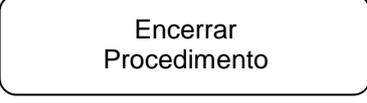
$C(L, \theta_i)$ : Taxa de contagem obtida numa distância  $L$  a partir do PLC;

$C(L, \theta_\alpha)$ : Taxa de fluência de nêutrons em uma posição  $(L, \theta)$  em relação ao centro da fonte para a mesma distância  $L$  de uma fonte isotrópica pontual com a mesma taxa de emissão total.

## 5.2 Procedimento de medição

### 5.2.1 Panorama geral do Procedimento

O procedimento de medição segue o seguinte fluxograma básico:

O QUE	QUEM	COMO
	Técnico	No AUTOLAB, de acordo com o item 5.2.2
	Técnico	De acordo com o item 5.2.2
	Técnico autorizado	No AUTOLAB, de acordo com o item 5.2.2
	Técnico ou pessoa designada pela chefia.	No AUTOLAB, de acordo com o item 5.2.3
	Técnico	No AUTOLAB, de acordo com o item 5.2.4
	Técnico	No AUTOLAB, de acordo com o item 5.2.4
		

## 5.2.2 Equipamentos de medição e materiais auxiliares

Todos os equipamentos devem ser ligados por trinta minutos antes do início do procedimento para fins de estabilização do sistema de medição.

### 5.2.2.1 Materiais Auxiliares

Os equipamentos auxiliares não influem ou influem indiretamente no procedimento de medição. São estes listados a seguir:

- Notebook (com compatibilidade com sistema Arduíno)
- Refrigerador de ar.
- Garra metálica (para manuseio da fonte)
- Pinça metálica (para manuseio da fonte)

### 5.2.2.2 Sistema Arduíno e Software

O sistema Arduíno é composto por uma placa de Arduíno uno versão 1.8.2. Software elaborado em C++.

### 5.2.2.3 Estabilizador

Estabilizador eletrônico de tensão alternada (faixa de 0 a 2000 volts)

### 5.2.2.4 Analisador Multicanal

Analisador multicanal Canberra DAS 1000

### 5.2.2.5 Detector PLC

Na preparação da calibração os seguintes passos devem ser realizados:

- O ambiente deve ser climatizado com temperatura controlada no intervalo entre 18°C e 26°C.
- O detector LC deve estar no trilho 4 do sistema de posicionamento do LN.
- A eletrônica deve ser ligada e a alta tensão do detector estabilizada em 1287 kV por cerca de 1 hora.
- Para evitar interferências as luzes do salão devem ser mantidas desligadas durante as medições.

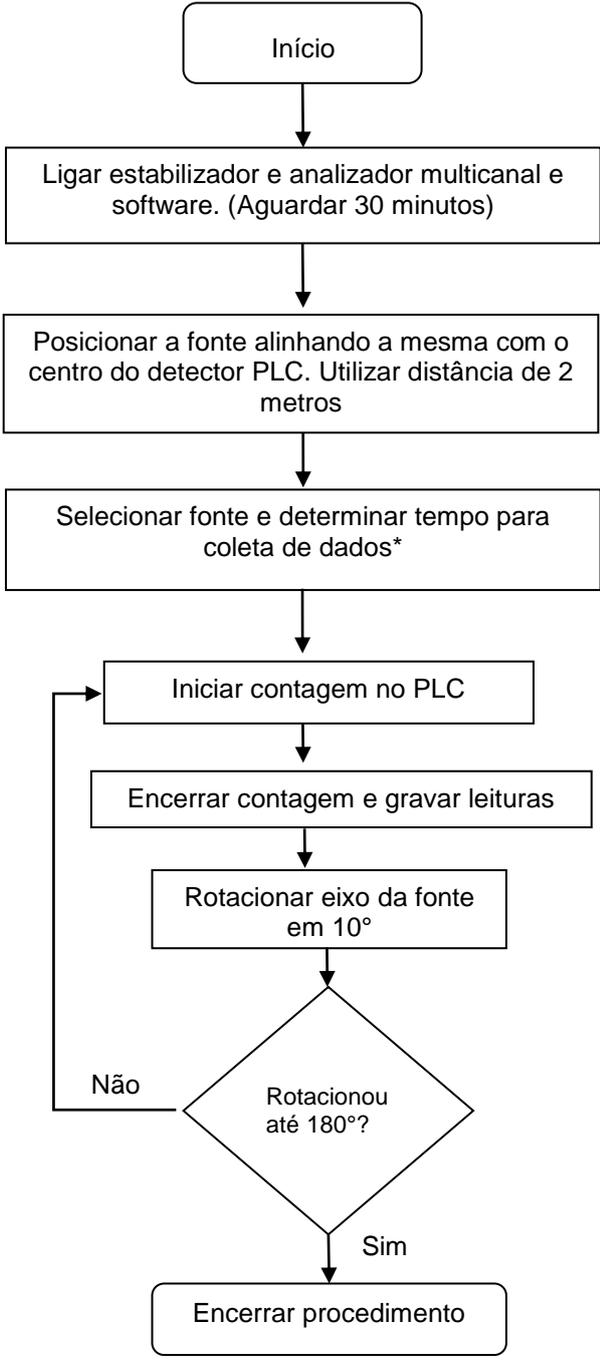
### 5.2.2.6 Base para fonte de Nêutrons

Mesa de tomografia

---

### 5.2.3 Medição

A medição deverá ser realizada de acordo com o fluxograma abaixo:

O QUE	QUEM	COMO
 <pre> graph TD     Inicio([Início]) --&gt; Ligar[Ligar estabilizador e analisador multicanal e software. (Aguardar 30 minutos)]     Ligar --&gt; Posicionar[Posicionar a fonte alinhando a mesma com o centro do detector PLC. Utilizar distância de 2 metros]     Posicionar --&gt; Selecionar[Selecionar fonte e determinar tempo para coleta de dados*]     Selecionar --&gt; Iniciar[Iniciar contagem no PLC]     Iniciar --&gt; Encerrar[Encerrar contagem e gravar leituras]     Encerrar --&gt; Rotacionar[Rotacionar eixo da fonte em 10°]     Rotacionar --&gt; Decidir{Rotacionou até 180°?}     Decidir -- Não --&gt; Iniciar     Decidir -- Sim --&gt; EncerrarProc([Encerrar procedimento])         </pre>	<p>Técnico ou RT</p>	<p>Utilizando o AUTOLAB</p>

\* O tempo para coleta deve ser selecionado de forma a manter a incerteza em aproximadamente 1% sobre a contagem média.

## 6 REGISTROS

Todos os registros gerados durante a execução deste procedimento são armazenados no programa AUTOLAB.

## 7 BIBLIOGRAFIA

ISO-8529-1

Neutron Reference Radiation – Part 1: Characteristics and methods of production

CIRM 24

Centre for Ionising Radiation Metrology: Anisotropy of Emission from Radionuclide Neutron Sources, NPL Report CIRM 24

---